

Х. ЛУБИ, Х. НУРСТЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЯЩИХ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СТРУЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ ТЕЧЕНИЯ

С точки зрения аэродинамики можно различать два крайних режима течения — ламинарный и турбулентный. Поскольку переход от ламинарного к турбулентному происходит не мгновенно, а постепенно, то существует переходный режим течения. Критерием классификации того или другого режима служит число Рейнольдса. Как показано в ряде работ [1, 2], в свободных турбулентных струях число Re не является определяющим, однако помогает ориентировочно судить о характере течения.

При изучении свободных струй в области $Re = (2 \div 10) \cdot 10^3$ авторы работы [1] показали, что распространенное мнение о том, что движение турбулентно практически у самого начала среза сопла, в общем случае неверно. Струя становится турбулентной лишь на некотором расстоянии от среза сопла.

В горящем факеле в поперечных сечениях струи имеются большие градиенты температуры, поэтому картина течения еще более усложняется. Из-за повышения температуры увеличиваются местные скорости. В то же время увеличивается и вязкость. Поскольку вязкость $\nu \sim (T_2/T_1)^{1.5}$, а скорость $u \sim (T_2/T_1)^{0.5}$, то значения $Re = u \cdot d/\nu$ с повышением температуры уменьшаются. Следовательно, наступление турбулентного режима должно произойти при больших значениях Re (относенных к истечению из сопла при начальных параметрах). Это подтверждено многими исследователями [2-4], изучавшими развитие диффузионных факелов. По данным их работ, переходной области в горящих струях соответствуют значения $Re \approx (7 \div 10) \cdot 10^3$, зависящие при этом и от диаметра сопла.

Существующие расчетные методы диффузионных факелов предполагают, однако, турбулентное течение струи. При определении длины диффузионных факелов многие авторы исходят из теории турбулентных струй, основываясь на сходстве процесса массообмена в горящих и изотермических струях.

С точки зрения химической кинетики также можно различать два крайних режима горения газа: диффузионное горение и горение заранее перемешанных газоздушных смесей (кинетическое горение).

В практике сжигания газа имеют большое распространение смешанные схемы, когда газ и окислитель (воздух) лишь частично переме-

шаны — диффузионно-кинетические факелы. Создание теории расчета таких факелов требует систематических исследований. Пока имеются лишь некоторые работы [5, 6], дающие зависимость видимой длины факела от степени предварительного смешения газа с окислителем. Расчет такого факела проводится в предположении, что перемешанная доля воздуха ведет себя как инертный разбавитель; тем самым избегают рассмотрения влияния химической кинетики на развитие струи.

Проведенные нами эксперименты [7], однако, показывают различие между расчетными и экспериментальными длинами таких факелов. Поэтому дальнейшие исследования в этой области горения должны быть направлены на изучение внутренней структуры диффузионно-кинетических факелов.

Исходя из характера течения можно предположить, что изменение режима горения наиболее заметно влияет на развитие горящей струи именно в переходной области течения.

Анализ работающих инжекционных и других смесительных горелок показывает, что режимы развития горящих струй лежат там в переходной или близкой к ней области течения, причем степень предварительного смешения газа с воздухом колеблется в широких пределах.

Учитывая сказанное выше, нами при имеющихся лабораторных возможностях исследовались горящие газозвоздушные струи природного газа, вытекающие из сопел диаметрами 19; 21,5 и 24,5 мм и с выходными скоростями газозвоздушной струи от 9 до 18 м/сек, что соответствует $Re = (10 \div 30) \cdot 10^3$.

Так как развитие турбулентных струй зависит от начальных условий [8], то параллельно с изучением горящих струй нами велось изучение изотермических струй при тех же химических составах, диаметрах сопел и начальных условиях.

Основные опыты проводились при следующих параметрах: диаметр сопла $d = 21,5$ мм, начальная среднеобъемная скорость смеси $u_0 = 15$ м/сек. Доля воздуха в исходной газозвоздушной смеси изменялась дискретно $\alpha = 0; 0,1; 0,2; \dots; 1,0$.

Подробное описание опытной установки дано в работе [6]. Измерение скоростного напора проводилось с помощью охлаждаемой водой трубки полного напора внутренним диаметром 2,0 мм, через которую отбирались пробы для последующего анализа на хроматографе. Температура измерялась платино-платино-родиевой термопарой. Газ — природный, состав его во время опытов почти не изменялся ($Q_H^P = 8750$ ккал/м³; $\rho = 0,78$ кг/м³).

Полученные результаты показывают, что развитие горящей диффузионной струи по сравнению с изотермической имеет свою особенность — склонность к менее интенсивному затуханию. Изменяя степень предварительного смешения газа с воздухом в горящих струях, можно наблюдать еще большее различие в аэродинамических характеристиках струи.

Во-первых, обращает на себя внимание полученное нами различие в затухании осевого скоростного напора при разных режимах горения по отношению к величине предварительного смешения. Затухание струи при разных α представлено на рис. 1, где также дано затухание динамического напора для изотермической струи, что хорошо согласуется с литературными данными [9]. Относительная дальнобойность струи в горящем диффузионном факеле ($\alpha = 0$) оказывается больше, чем в изотермической струе. При увеличении доли предварительно перемешанного воздуха дальнобойность увеличивается, достигая своего максимального значения в режиме $\alpha = 0,4$. Дальнейшее увеличение доли

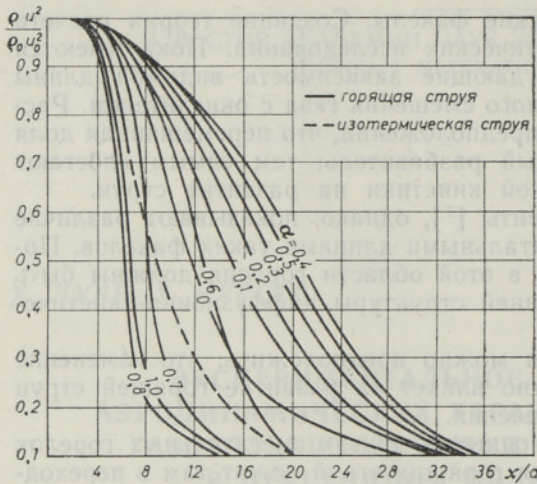


Рис. 1. Изменение относительного скоростного напора вдоль оси изотермической газовой струи и горящих газовых струй в зависимости от степени их предварительного смешения с воздухом.

Отмеченная закономерность подтверждается и профилями скоростного напора в поперечных сечениях струи. В качестве примера рассмотрим сечение $x/d = 10$. Сравнивая расширение горящего факела при $\alpha = 0,4$ с изотермической струей (см. рис. 2), можно заметить, что го-

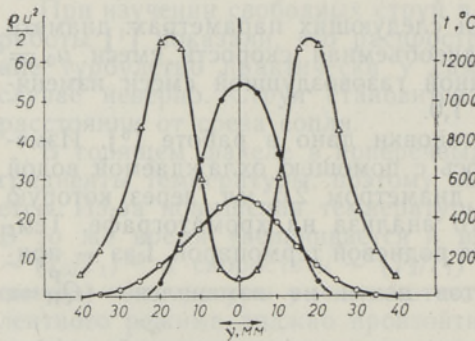


Рис. 2. Скоростной напор и температура в сечении $x/d = 10$ в горячей (при $\alpha = 0,4$) и изотермической струях.

● — горящая струя; ○ — изотермическая струя; △ — температура.

рящая струя, имеющая большую дальность, имеет соответственно меньшую ширину, чем изотермическая. Нами проводились измерения скоростного напора в интервале сечений $x/d = 2 \div 20$ калибров для режимов горения $\alpha = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и 1,0, и на базе этого вычислялось расширение струи. Обобщенная зависимость приведена на рис. 3.

Различия в массообмене горящих и изотермических струй отмечались и другими авторами [10]. Вычислениями скорости в сечении $x/d = 10$ по измеренным скоростным напорам и температурам установ-

воздуха приводит к уменьшению дальности струи. Связано это, как нам представляется, с изменением структуры факела — с установлением внутреннего фронта горения (внутреннего конуса). В режиме $\alpha = 0,6$ наблюдается тенденция ко все более резкому затуханию скоростного напора. В режиме $\alpha = 0,8$, когда скорость распространения пламени максимальна, внутренний фронт горения подходит наиболее близко к устью сопла, и затухание струи самое эффективное.

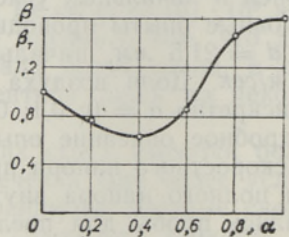


Рис. 3. Относительное расширение горячей струи по отношению к изотермической в зависимости от степени предварительного смешения с воздухом. β — угол расширения горячей струи; β_0 — угол расширения изотермической струи.

лено, что приращение массы в горячей струе почти в два раза меньше, чем в изотермической. Это можно объяснить характерной для диффузионного факела структурой струи. Выгорание происходит в кольцевой оболочке струи при характерных для нее высоких температурах, что сильно ламинизирует течение и является причиной менее интенсивного массообмена. Проведенные измерения температуры, а также визуальные наблюдения показывают, что толщина боковой реакционной зоны горения зависит от степени предварительного смешения газа с окислителем.

Чем больше предварительно подготовлена смесь, тем плотнее и уже становится внешняя кольцевая оболочка фронта горения и тем дальнобойнее становится струя. Можно полагать, что в таком случае вся центральная область струи позднее вступает в реакцию горения.

Таким образом, изменяя степень предварительного смешения газа с воздухом, можно изменить структуру факела и его аэродинамику.

Появление внутреннего конуса в режиме $\alpha = 0,5 \div 0,6$ (т. е. в узкой по отношению к α зоне) происходит непосредственно у концентрационного предела воспламенения природного газа [11], что еще раз свидетельствует о тормозящем влиянии бокового фронта горения на массообмен струи с воздухом.

Аналогичные исследования на водяном газе проводились Н. Норкиным [12]. Так как водяной газ содержит большое количество водорода, то появление внутреннего конуса наблюдается при гораздо меньших значениях α , что согласуется с концентрационными пределами воспламенения водяного газа.

Проделанное нами исследование позволяет выделить два различных по структуре режима горения газоздушных струй природного газа:

диффузионный — соответствует диапазону $\alpha = 0 \div 0,6$ и имеет из-за бокового фронта горения менее интенсивный массообмен с окружающей средой, что обуславливает большую дальнобойность струи по сравнению с изотермической;

кинетический — соответствует природному газу в диапазоне $\alpha > 0,6$ и имеет четко проявляющийся внутренний конус, в котором происходит основное выгорание топлива, и область догорания, в которой смешение происходит без препятствия со стороны бокового фронта горения. Продукты сгорания и газ, нагретые до более высоких температур по сравнению с изотермической, имеют меньшую плотность и поэтому интенсивно расширяются (см. рис. 3), вследствие чего такие струи менее дальнобойны.

Поскольку в кинетическом режиме из-за двухконусной структуры факела улучшаются условия перемешивания, а за счет горения во внутреннем конусе улучшаются условия подогрева, то в итоге процесс догорания происходит намного интенсивнее. Это безусловно должно вызывать более быстрое убывание общей длины горящего факела, что и наблюдалось в наших опытах [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вулис Л. А., Живов В. Г., Ярин Л. П., ИФЖ, XVII, № 2 (1969).
2. Лисиенко В. Г., Китаев Б. И., Кокарев Н. И., Капичев А. Г., Усовершенствование методов сжигания мазута в мартеновских печах. М., 1967.
3. Хоттел Г., Гаусорн В., В сб.: Вопросы горения, М., 1953.
4. Мартиросян Э. А., Ярин Л. П., Физика горения и взрыва, Новосибирск, 1970.
5. Аверин С. И., Цыганков Г. Т., Семикин И. Д., Изв. ВУЗов, Черная металлургия, № 12 (1968).
6. Луби Х., Исаева С., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 20, 330 (1971).

7. Луби Х., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., № 4 (1971).
8. Арсеева Н. В., Арсеев А. В., Китаев Б. И., В сб.: Теория и практика сжигания газа, Л., 1967.
9. Вулис Л. А., Ершин Ш. А., Ярин Л. П., Основы теории газового факела, Л., 1968.
10. Чубаев С. М., Арсеев А. В., В сб.: Разработка конструкций топочных и горелочных устройств и методов их расчета, Свердловск, 1970.
11. Льюис Б., Эльбе Г., Горение, пламя и взрывы в газах, М., 1968.
12. Норкин Н. Н., В сб.: Промышленные печи, М., 1953.

Институт термодинамики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
16/VII 1971

H. LUBI, H. NURSTE

LOODUSLIKU PÖLEVGAASI JA ÖHUJAO AERODÜNAAMILISED KARAKTERISTIKUD VOOLAMISEL ÜLEMINEKUREŽIIMIS

(Eksperimentaalne uurimistöö)

Põlemisrežiimist tingituna erineb põleva gaasijoa levimine isothermilise joa levimisest. Segades gaasi eelnevalt mitmeti õhuga ja muutes nii põlemise kineetikat, muudame põleva joa struktuuri ja koos sellega tema aerodünaamilisi karakteristikuid.

Kui tõsta õhu esialgset segunemisastet ($\alpha = 0 \div 0,4$), aeglustub joa struktuurist tingitud massivahetus ja pikeneb joa löögikaugus. Piirkonnas $\alpha = 0 \div 0,6$ võib loodusliku gaasi joas põlemist käsitleda difuusse põlemise mudeli abil.

Suuremate segunemisastmete puhul ($\alpha > 0,6$) muutub joa struktuur sisemise iseiseiva põlemisfrondi tekkimise tõttu oluliselt. Viimane aga intensiivistab omakorda järelpõlemise kulgu. Selle tagajärjel lüheneb leegi nähtav pikkus märgatavalt, massivahetuse intensiivistumine, võrreldes isothermilise olukorraga, aga tingib joa kiirema kustumise.

H. LUBI, H. NURSTE

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AERODYNAMICAL CHARACTERISTICS OF AIR-NATURAL GAS JET, IN THE CONDITIONS OF COMBUSTION IN TRANSITIONAL REGION OF FLOW

The development of jet with combustion differs from the development of isothermal jet, due to the influence of combustion. Altering the kinetics of combustion by using different degrees of preliminary mixing of gas and air, it is possible to change the structure of the jet and its aerodynamic characteristics. When increasing the preliminary mixing ($\alpha = 0 \div 0,4$), the maximum penetration increases because of the structure determined by a decreasing mass transfer.

In the region $\alpha = 0 \div 0,6$ it is possible to consider the combustion of natural gas according to a diffusion model.

At greater degrees of mixing ($\alpha > 0,6$), the structure of the jet changes essentially due to the formation of an independent inner front of combustion which determines the intensification of the processes of the termination of combustion. Therefore, at kinetical regime of combustion, the length of the jet decreases essentially. The more intensive mass transfer in comparison with isothermal conditions determines a more rapid decay of jet.