

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Прудников.— В сб.: Вопросы турбулентного горения. М., «Оборонгиз», 1960.
2. Е. С. Шетинков. Физика горения газов. М., Физматгиз, 1965.
3. Ш. А. Ершин. Докт. дис. КазНИИ энергетики, Алма-Ата, 1972.
4. R. Guenther, H. Simon. XII-th Symposium on Combustion (International, 1969, p. 1069—1079.
5. В. Ф. Соколенко. Канд. дис. ИХКиГ, Новосибирск, 1974.
6. Б. Гаусгорн и др.— В сб.: Вопросы горения. Т. 1. М., ИЛ, 1953
7. В. К. Баев, В. А. Ясаков. ФГВ, 1975, 11, 1, 138.
8. В. П. Карпов и др. Докл. АН СССР, 1960, 32, 1341.
9. А. С. Гиневский и др. МЖГ, 1966, 4, 88.
10. В. И. Андреев.— В сб.: Теория и практика сжигания газа. Л., «Недра», 1964.
11. С. М. Ильяшенко, А. В. Талантов. Теория и расчет прямооточных камер сгорания М., «Машиностроение», 1964.
12. Ю. В. Игнатенко, В. Ф. Соколенко. ФГВ, 1971, 7, 4, 585.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СОСТАВНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПЛАМЕН

В. А. Коваленко, Л. П. Ярин

1. В развитие выполненных ранее исследований [1—3] рассмотрим структуру составных турбулентных пламен, образующихся при горении системы факелов неперемешанных газов или однородной смеси. Предварительно обсудим некоторые закономерности распространения составных турбулентных струй, отражающие специфику рассматриваемых типов струйных течений.

Измерения показывают, что в поле течения составной струи, истекающей из системы осесимметричных сопел, расположенных вдоль некоторой окружности, можно выделить четыре характерных участка. На первом из них, расположенном в окрестности плоскости среза сопел, профили скорости имеют следующий вид. Вблизи оси симметрии — зоне, ограниченной внутренними границами струй, — продольная составляющая средней скорости практически равна нулю. В пределах элементарных струй распределение $\langle u \rangle$ аналогично распределению средней скорости в затопленных струях.

При слиянии элементарных струй формируется единый профиль скорости с характерным провалом вблизи оси. При удалении (по потоку) от точки слияния пограничных слоев провал на профилях $\langle u \rangle$ вырождается. Концу второго участка отвечает типичное для свободных струй распределение с максимумом $\langle u \rangle$ на оси и монотонным уменьшением ее к периферии. Третья зона — участок трансформации трехмерного струйного движения в двумерное осесимметричное. В конце ее профили скорости приобретают вид профилей, отвечающих автомодельному струйному движению. Четвертый участок — область двумерного (в среднем) автомодельного течения. В этой зоне составная струя полностью вырождается в осесимметричную.

Отмеченные особенности аэродинамики составных струй характерны и для газовых пламен. В обоих случаях наблюдается существенное искривление условных границ в пределах первого и второго участков, увеличение скорости вдоль оси течения и т. д.

Исследование аэродинамики составного турбулентного диффузионного факела проводилось на прямоугольной многосопловой горелке с регулируемым расстоянием между осью и центрами сопел. При четырех- и шестисопловой компоновке отношение r/R изменялось от 0,2 до

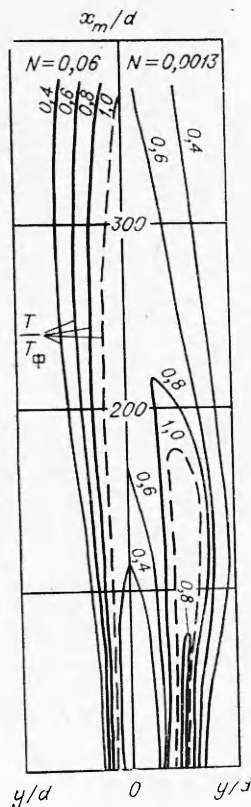


Рис. 1. Распределение температуры в составном турбулентном факеле.

0,015 (r — радиус сопла, R — радиус, на котором расположены сопла). Факел стабилизировался с помощью системы дежурных пламен, находящихся у среза каждого сопла. Такая система стабилизации обеспечивала устойчивое горение неподогретого газа (пропана) при скорости истечения 30 м/с.

Исследование температурного поля показало, что в зависимости от относительного удаления сопел от оси горелки в составном факеле могут реализоваться три различных режима горения. Малым значениям r/R , отвечающим большим удалениям сопел от оси горелки, соответствует разомкнутый режим, характеризующийся слабым взаимодействием элементарных факелов и отсутствием единого фронта пламени. При сближении сопел — увеличении отношения r/R — взаимодействие элементарных пламен друг с другом усиливается. Некоторому «критическому» значению $(r/R)_{кр}$ отвечает смыкание элементарных пламен и образование единого фронта пламени. При $r/R > (r/R)_{кр}$ реализуется сомкнутый режим, при котором фронт пламени представляет поверхность сложной формы, пересекающую ось в двух точках. Как будет показано ниже, при не плотной компоновке режим горения составного диффузионного факела определяется значением параметра заполнения $N = n \cdot r^2/R^2$, учи-

тывающего как относительное удаление сопел от горелки, так и число их в блоке — n . Режим горения составного факела зависит также от стехиометрии и ряда других факторов, которые могут быть учтены приведенным стехиометрическим комплексом $B = \beta \sigma \sqrt{\omega} / 2 \cdot N^{0.5}$ [3], где σ — турбулентное число Прандтля, $\beta = c_{1,0}/c_{2,\infty} \cdot \Omega + 1$, $c_{1,0}$, $c_{2,\infty}$ — концентрация горючего и окислителя в окружающем пространстве, Ω — стехиометрический коэффициент реакции, $\omega = T_{\phi}/T_{1,0}$, а индексы соответствуют параметрам газа: 0 — на выходе из сопла, ϕ — на фронте пламени, ∞ — в окружающем пространстве, 1 — параметры горючего, 2 — параметры окислителя.

На рис. 1 для двух значений параметра N , отвечающих сомкнутому и разомкнутому режиму горения, приведены данные измерений температуры в составном факеле. На графике показаны изотермы в сечении, проходящем через ось симметрии горелки и центры сопел одного диаметра, а также линии фронта пламени. Из графика видно, что при разомкнутом режиме элементарные фронты пламени сохраняют свою индивидуальность на всем протяжении факела, а при сомкнутом — лишь вблизи устья течения.

На рис. 2 показано распределение температуры

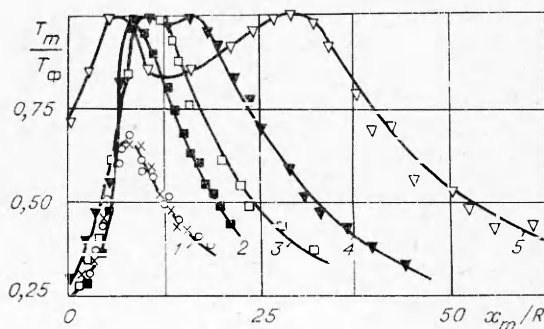


Рис. 2. Распределение температуры вдоль оси составного турбулентного факела.

N равно: 1 — 0,0013 (\times — $n=6$; \circ — $n=4$), 2 — 0,0025; 3 — 0,0045; 4 — 0,008; 5 — 0,018.

вдоль оси составного факела при изменении параметра N . Области значений N от 0,0013 до 0,0045 соответствует разомкнутый режим, для которого характерно наличие одного максимума температуры на оси. Кривая $T_m/T_\phi = f(x/R)$, соответствующая значению $N = 0,0045$, граничная и разделяет область разомкнутого и сомкнутого режима. При увеличении параметра N — уменьшении расстояния между осями элементарных факелов — величина максимума температуры на оси возрастает. Предельному значению $T_m/T_\phi = 1$ отвечает точка на оси, в которой происходит слияние фронтов элементарных факелов.

Среди серии кривых $T_m/T_\phi = f(x/R)$, приведенных на рис. 2, имеются две, для которых при различном числе элементарных факелов в блоке и расстоянии между ними величина N одинакова. Данные, относящиеся к одинаковым значениям N , но различным R и n , группируются вблизи единой кривой.

Результаты изменения температуры вдоль оси факела при сомкнутом режиме горения приведены также на рис. 2. Они заметно отличаются от распределения T при разомкнутом режиме. Для зависимости $T_m/T_\phi = f(x/R)$ характерно наличие двух максимумов, отвечающих точкам пересечения оси течения фронтом пламени, и минимума, соответствующего внутренней области факела. При увеличении N первый (левый) максимум смещается к соплу, второй — к вершине факела.

Изменения длины составного диффузионного факела в зависимости от приведенного стехиометрического комплекса B (при четырех- и шестисопловой компоновке) показывают, в частности, что рост плотности компоновки — уменьшение радиуса окружности, на которой расположены сопла, — сопровождается значительным увеличением длины факела. Это объясняется уменьшением суммарной интенсивности смешения (уменьшением поверхности смешения) при сближении элементарных пламен и переходе от разомкнутого режима к сомкнутому. В исследованном диапазоне изменения параметра B ($0,5 < B < 5,5$) безразмерная длина факела есть линейная функция параметра заполнения.

3. Исследование структуры составного гомогенного факела проводилось на прямотруйной горелке специальной конструкции, снабженной четырьмя соплами с диаметром выходного отверстия $d_b = 10$ мм. Элементарные факелы стабилизировались с помощью кольцевых стабилизаторов, расположенных на расстоянии 1 мм от среза. При проведении опытов геометрические и режимные параметры изменялись в следующих пределах: $0,17 < r/R < 0,42$; $0,59 < \alpha < 0,93$; $u_0 = 30$ м/с, начальная температура T_0 смеси (пропан — воздух) была равна 300 К.

На основе данных по распределению скорости и температуры сделан вывод, что структура составного гомогенного факела существенно зависит от плотности компоновки струй в блоке. В качественном отношении картина изменения режима горения такого факела в зависимости от относительного удаления сопел от оси горелки аналогична картине изменения режимов горения составного диффузионного факела. В обоих случаях в зависимости от величины r/R могут реализоваться три характерных режима — сомкнутый, критический и разомкнутый, — существенно отличающиеся по аэродинамике течения, конфигурации фронта пламени и т. д.

Характер распределения скорости и температуры в поле течения составного гомогенного факела иллюстрирует рис. 3, где представлены в виде серии изотак и изотерм данные измерений скорости и температуры в плоскости, проходящей через ось горелки и центры сопел, расположенных на одном диаметре. Штриховые линии на графике — фронт пламени.

Приведенные данные показывают, что при сомкнутом режиме факел имеет сложную форму, существенно отличающуюся от формы

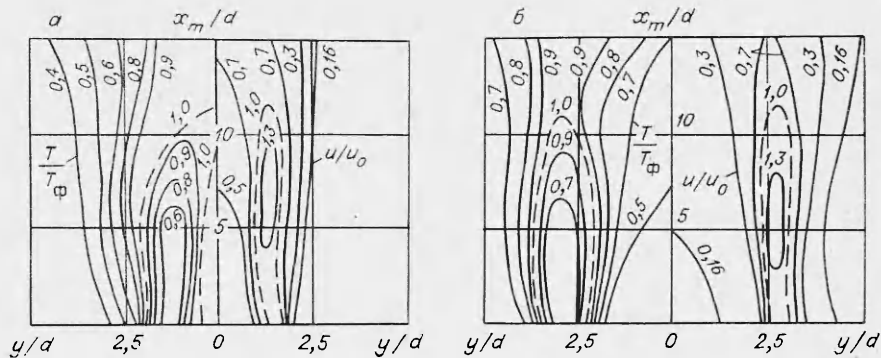


Рис. 3. Распределение скорости и температуры в составном гомогенном факеле.
 а) сомкнутый режим, $r/R=0,42$; б) разомкнутый режим, $r/R=0,17$.

бунзеновского пламени. При разомкнутом режиме конфигурация фронта близка к конфигурации фронта в затопленном гомогенном факеле, заметно также ускорение газа в поле течения составного факела. Область значительного прироста скорости (зона, ограниченная изотакнами $u/u_0 > 1$) расположена внутри зоны, очерченной фронтом пламени, т. е. в области максимальных градиентов температуры.

4. Расчет составных турбулентных пламен сопряжен с исключительными трудностями, связанными прежде всего с решением задачи о распространении системы взаимодействующих турбулентных струй. Для приближенного расчета такого течения целесообразно использовать метод эквивалентной задачи теории теплопроводности [4]. О степени сходимости расчета по этому методу с экспериментом можно судить по рис. 4. Видно, что в исследованном диапазоне изменений x/d соответствие опытных и расчетных данных может быть признано удовлетворительным. Это (как и результаты работы [5]) свидетельствует о перспективности приложения указанного выше метода к расчету структуры составных турбулентных пламен.

На рис. 5 для ряда значений параметра N сопоставлены экспериментальные и расчетные данные по изменению температуры вдоль оси составного турбулентного диффузионного факела. При $N \leq 0,02$ соответствие может быть признано удовлетворительным. При $N > 0,02$ расхождение данных, относящихся к начальному и переходному участкам, заметно возрастает. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении распределения температуры в поперечных сечениях составного факела.

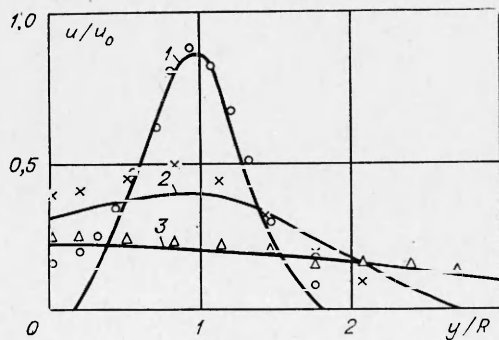


Рис. 4. Сопоставление опытных и расчетных данных по распределению скорости в составной турбулентной струе, $N=0,391$.
 x/d : 1 — 7, 2 — 15, 3 — 50.

Некоторое улучшение сходимости расчета и эксперимента может быть достигнуто при учете изменения молекулярного веса, теплоемкости и т. д. Однако такое уточнение не может привести к существенному изменению результатов в начальном участке, где погрешность приближенного решения, связанная с пренебрежением конечным размером сопел, резко возрастает. Кроме того, принятое в расчете допущение об изобарности течения в начальном участке составного факела, по-видимому, весьма грубо.

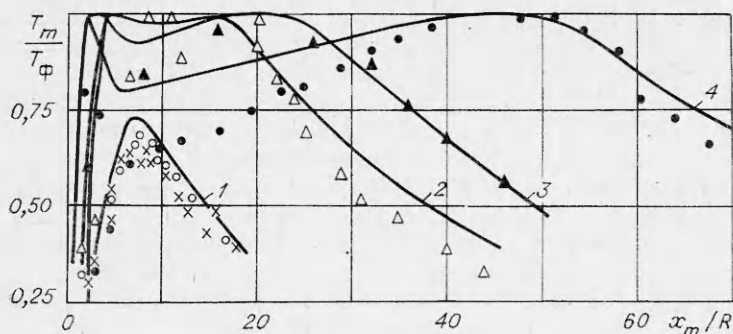


Рис. 5. Сопоставление опытных и расчетных данных по распределению температуры вдоль оси составного диффузионного факела.
 N равно: 1 — 0,0013, 2 — 0,008, 3 — 0,015, 4 — 0,06.

В целом расчет по методу эквивалентной задачи теории теплопроводности [3] правильно отражает качественную картину развития составного диффузионного факела и обеспечивает при соответствующем выборе значений эмпирических постоянных удовлетворительную сходимость с экспериментом. Расчет составных гомогенных факелов должен учитывать наличие заметных градиентов давления, ускорение газа в окрестности фронта пламени и т. д. Решение такой задачи требует привлечения более общих методов расчета сложных турбулентных течений и дальнейшего накопления данных о структуре гомогенных пламен.

Ленинградское высшее
военно-морское инженерное
училище им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
28/IV 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Вулис, Л. П. Ярин. ФГВ, 1974, 10, 2.
2. В. А. Коваленко, Л. П. Ярин. IV Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Аннотации докладов, Черногловка, 1974.
3. В. А. Коваленко, Л. П. Ярин.— В сб.: Теория и практика сжигания газа. Т. 6 Л., «Недра», 1975.
4. Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. Теория струй вязкой жидкости. М.—Л., «Наука», 1965.
5. Я. А. Ваграменко. МЖГ, 1971, 6.

К ОЦЕНКЕ ОГНЕГАСЯЩЕЙ И ОГНЕЗАДЕРЖИВАЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Е. К. Кисляхов, Э. В. Конев

Известно, что тушить кромку лесного пожара можно как в активном, так и в пассивном режиме. Тушение включает в себя стадии потухания пламени и тлеющих обугленных остатков [1, 2 и др.]. При этом потухание тлеющих остатков при пассивных методах тушения, т. е. после предварительной обработки горючего материала некоторыми агентами, происходит еще до погасания факела, что создает предпосылки для предотвращения повторного воспламенения горючего материала. В связи с этим представляются полезными дальнейшие поиски соответствующих огнегасящих агентов и оптимальных условий их применения.

Ниже описана методика, позволяющая определять огнезадержива-