

УДК 536.46

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПЛАМЕН ИМПАКТНЫХ И ВСТРЕЧНЫХ СТРУЙ ТОПЛИВА

В. К. Баев, А. Н. Бажайкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, bazhan@itam.nsc.ru

Экспериментально исследована устойчивость диффузионного горения топливных струй при соударении с преградами и при взаимодействии двух струй — чистого пропан-бутана и с добавкой углекислого газа. Получены данные по условиям срыва горения при различных вариантах встречи струй, по составу продуктов сгорания, коэффициенту избытка воздуха и полноте сгорания перед срывом. Показано, что область устойчивого горения импактных и встречных струй расширяется более чем на порядок по сравнению с горением свободных одиночных струй.

Ключевые слова: диффузионное горение, встречные струи, срыв горения, стабилизация пламени, критерий гомохронности, балластирование топлива углекислым газом.

DOI 10.15372/FGV20160502

### ВВЕДЕНИЕ

При натекании струи на преграду и растекании образовавшейся смеси вдоль поверхности условия стабилизации пламени существенно улучшаются по сравнению с диффузионными пламенами свободных струй, так как одно из условий стабилизации — равенство скорости распространения пламени скорости потока при натекании на преграду — выполняется всегда. Встречные соосные струи могут рассматриваться как две импактные струи, направленные навстречу друг другу. Второе условие стабилизации — соответствие толщины турбулентного пламени области реакционноспособных составов — выполняется на определенном расстоянии от сопла, где пограничный слой струи (слой смешения) приобретает необходимые размеры.

Таким образом, с точки зрения критериального описания стабилизации пламени естественно предположить, что основным будет критерий гомохронности, как и для случаев, описанных в [1–3]:

$$\text{Но} = u_0 \tau_* / d, \quad (1)$$

где  $u_0$  — скорость истечения топливной струи из сопла диаметром  $d$ ;  $\tau_*$  — характерное время горения гомогенной смеси данного топлива с окислителем, затабулированное в [4] для пяти видов топлив. Критерий Но связывает газодинамические условия распространения струи

( $u_0$ ,  $d$ ) с химическими характеристиками горения конкретного топлива ( $\tau_*$ ). Эксперименты показывают, что устойчивое горение оторванной от сопла одиночной струи (без срыва и прекращения горения) происходит в относительно узких диапазонах изменения  $u_0$  и Но. Например, при горении пропан-бутана 70/30 % (масс.) срыв происходит при Но = 40 [3], что для сопла диаметром 1.6 мм соответствует скорости струи  $u_0 = 43$  м/с, выше которой осуществлять устойчивое горение затруднительно. Это обстоятельство лимитирует применение рассматриваемых свободных струй в энергетических установках. Поэтому для расширения диапазона горения применяются различные способы стабилизации пламени, одним из которых является организация горения соударяющихся топливных струй.

При взаимодействии горящей струи с преградой или с другой струей образуется зона торможения (стабилизации пламени), которая служит источником поджига новых порций топлива и продолжения горения. Пределы стабилизации пламени в этой зоне определяются составом смеси, условиями турбулентного обмена между реагирующими средами, макрокинетическими характеристиками (нормальной скоростью распространения пламени  $u_n$ , характерным временем горения  $\tau_*$ ).

Целью экспериментальных исследований являлось определение границ устойчивого горения при различных условиях впрыска топлива из сопел (трубок диаметром 0.5 мм) в по-

коящийся воздух. Рассматривалось соударение струи с преградами (проницаемой и непроницаемой) и взаимодействие струй, встречной, расположенной соосно, с встречной, расположенной несоосно, а также струй, пересекающихся под углами  $90$  и  $135^\circ$  при различных расходах топлива  $G_T$  и скоростях его истечения  $u_0$ . В качестве топлива использовался пропан-бутан 70/30, в ряде экспериментов топливо балластировалось углекислым газом. В экспериментах регистрировалось расстояние между срезом сопла и преградой ( $l$ ) либо между соплами ( $l_c$ ), при которых происходил срыв горения. Значения  $l$  и  $l_c$  характеризуют минимальную длину струи, при которой горение устойчиво.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Сопла с помощью кронштейнов устанавливались на рельсе и могли перемещаться относительно друг друга. Горючие газы (или смесь газов) из баллонов через редукторы, газовые объемные счетчики и жиклеры подавались в смеситель, из которого поступали в сопла. Проходной диаметр жиклеров выбран равным  $0.2$  мм для реализации на них сверхзвуковых перепадов давления в целях независимого регулирования расходов каждого из газов и для обеспечения интенсивного смешения газов перед соплами. Тарировка жиклеров проводилась с использованием газовых счетчиков ГСБ-400 и по измерению массы баллонов. Это позволяло определить не только расходную характеристику жиклера, но и плотность газа. Давление газов перед соплами контролировалось перепадамером. При работе на чистом пропан-бутане магистраль с  $\text{CO}_2$  не включалась.

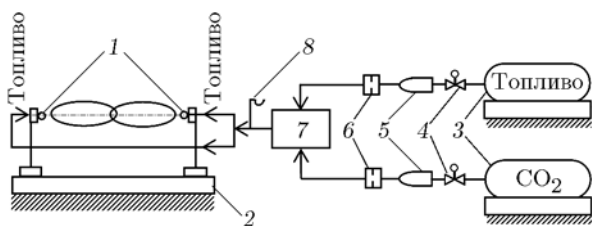


Рис. 1. Схема установки:

1 — сопло, 2 — рельс-основание, 3 — баллон с газом, 4 — редукторы, 5 — объемный счетчик ГСБ-400, 6 — жиклер, 7 — смеситель, 8 — перепадамер

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГОРЯЩЕЙ СТРУИ ПРОПАН-БУТАНА С ПРЕГРАДОЙ

В качестве преграды использовались:

- пластина толщиной  $10$  мм и диаметром  $100$  мм из высокопроницаемого ячеисто-пористого материала — муллитокорундовой керамики,
- пластина толщиной  $0.5$  мм и диаметром  $100$  мм из стали,
- комбинация пластин из высокопроницаемого ячеисто-пористого материала и стали (одна за другой).

Преграда устанавливалась на расстоянии  $50 \div 200$  мм от сопла и подвергалась воздействию одиночной струи. На рис. 2 представлено изображение струи, горящей на преграде из высокопроницаемого ячеисто-пористого материала, которая разогревалась до  $800 \div 1000$  °С в зависимости от расхода топлива ( $G_T = 0.04 \div 0.10$  г/с). Значения  $G_T$  задавались давлением впрыска топлива, по величине которого рассчитывались скорость истечения топлива  $u_0$  и критерий гомохронности  $Но$  по формуле (1).

При определенных значениях давления впрыска топлива струя поджигалась, после чего преграда отодвигалась от сопла до расстояния срыва горения  $l$ . На рис. 3 показаны зависимости безразмерного расстояния срыва горения  $L = l/d$  от критерия гомохронности для перечисленных выше видов преграды. Наиболее эффективно стабилизировала горение керамическая преграда (кривая 1), причем с ростом  $Но$  границы устойчивого горения все более раздвигались, при этом температура пре-

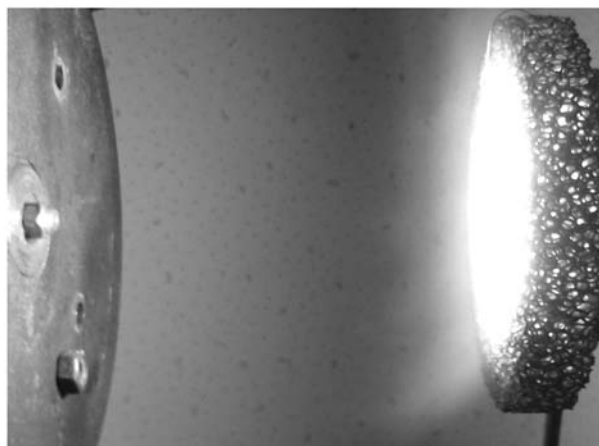


Рис. 2. Горение струи на преграде

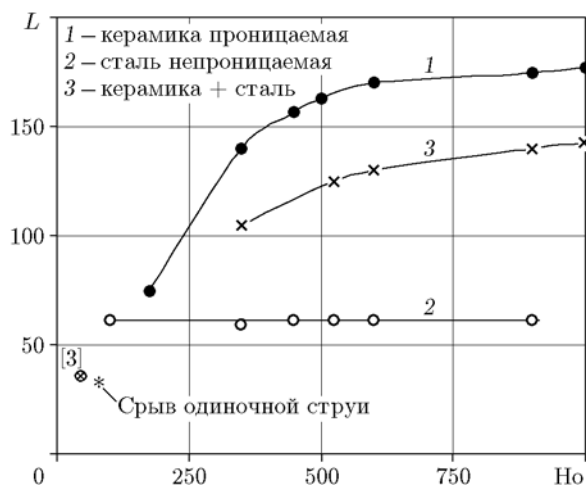


Рис. 3. Зависимость расстояния срыва одиночной струи на преграде от критерия гомохронности

грады достигала  $900 \div 1050$  °С. Наименее эффективной оказалась стальная непроницаемая преграда (кривая 2), из-за значительного теплоотвода она нагревалась до  $750 \div 800$  °С. Комбинированная преграда (кривая 3) занимала промежуточное положение, поскольку теплоемкая керамика сохраняет тепло и нагревается, но часть тепла отдается прижатой сзади теплопроводной стальной преграде. Эффект стабилизации пламени на преграде особенно четко виден при сравнении с данными по срыву свободных одиночных струй. Точка \* на рис. 3 соответствует срыву пламени с параметрами  $L = 35$  и  $Но = 90$  (соответствует  $u_0 = 30$  м/с) для сопла диаметром 0.5 мм, а точка  $\otimes$  взята из [3] для сопла диаметром 1.6 мм и соответствует значениям  $L = 38$ ,  $Но = 40$  ( $u_0 = 31$  м/с). Это означает, что при  $u_0 > 31$  м/с свободная пропан-бутановая струя не горит, в то время как срыв на преграде в описываемых условиях достигнут при  $Но = 1000$ . Следовательно, стабилизация на преграде раздвигает диапазон стабильного горения струи на порядок, причем наиболее эффективно — на теплоемкой керамической преграде.

Для изучения таких важных характеристик горения струи, как состав продуктов сгорания, коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  и полнота сгорания  $\eta$ , проводился газовый анализ с помощью газоанализатора ТЕСТ. Пробы газа отбирались позади проницаемой преграды путем сканирования тонкой отсосной трубкой вдоль диаметра сечения горячей струи на пре-

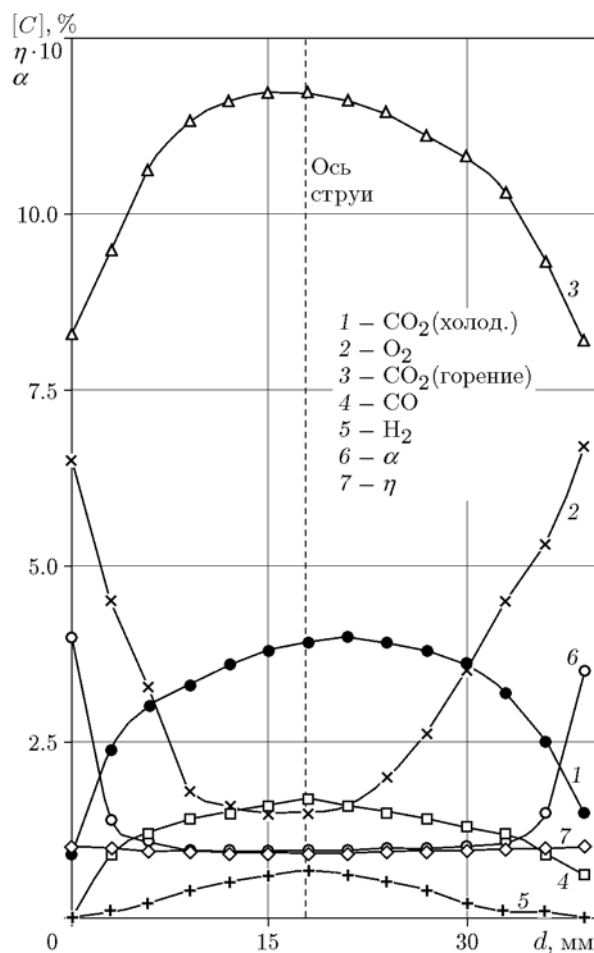


Рис. 4. Состав продуктов сгорания в сечении струи, горящей на преграде

граде. Предварительно такую процедуру проводили с холодной струей CO<sub>2</sub> (имитирующей пропан-бутан по плотности), чтобы получить исходное распределение концентрации топлива по сечению струи. На рис. 4 показаны результаты газового анализа и расчетные значения  $\alpha$  и  $\eta$  на преграде, расположенной на расстоянии 65 мм от сопла. Исходное распределение топлива в сечении струи (кривая 1) является типичной параболической зависимостью с максимумом на оси струи, где концентрация составляет 4 %, что соответствует стехиометрической объемной концентрации пропан-бутана в смеси с воздухом. Полученный профиль концентрации в холодной струе задает качественное распределение продуктов горения. Профиль концентрации кислорода (кривая 2) имеет минимум на оси струи, равный 1.5 %. Концентрация CO<sub>2</sub> меняется до максимума 11.6 % (кри-

вая 3). Концентрация CO плавно меняется от 0.9 % на краю струи до 1.7 % на оси (кривая 4). Установлено также наличие  $H_2$  — до 0.7 % на оси струи (кривая 5). Концентрации несгоревших углеводородов  $C_mH_n$  составляли сотые доли процента и на рис. 4 не показаны. По данным газового анализа рассчитывались значения  $\alpha$  и  $\eta$  по формулам [5]

$$\alpha = 1 / \left( 1 - \frac{O_2 - 0.5H_2 - 0.5CO - 2C_mH_n}{21} \right), \quad (2)$$

$$\eta = 1 - \frac{43.14CO + 36.87H_2 + 122C_mH_n}{102.5(CO_2 + CO + C_mH_n)}. \quad (3)$$

Расчетные значения  $\alpha$  (кривая 6 на рис. 4) изменяются от  $3.5 \div 4$  в периферийных участках сечения струи до 0.95 в приосевых участках, что обуславливает неполноту сгорания (в центре струи  $\eta = 0.93$ , кривая 7). Таким образом, данные газового анализа показывают, что состав продуктов сгорания и характеристики горения ( $\alpha$ ,  $\eta$ ) в сечении осесимметричного пламени на преграде существенно меняются в радиальном направлении и определяются исходным распределением концентрации топлива в негорящей струе. Локальные зоны горения с определенными значениями  $\alpha$  и составом продуктов сгорания расположены на концентрических окружностях в сечении струи.

Приведенные на рис. 4 результаты соответствуют стабильному горению струи на преграде и перед ней до тех пор, пока между соплом и преградой не достигается расстояние срыва пламени  $L$ . Для определения условий срыва проведены дополнительные исследования, включающие в себя измерение концентрации топлива на оси холодной струи по ее длине, а также определение состава смеси и температуры на преграде в момент срыва горения. Имитация впрыска холодной струи пропан-бутана проводилась с помощью  $CO_2$ , концентрация которого измерялась на разных расстояниях  $L$ . На рис. 5 показано распределение концентрации углекислого газа  $C_{CO_2}$  при разных расходах топлива. Аппроксимирующие кривые представляют собой гиперболы  $C_{CO_2} = k/L$ , причем коэффициент  $k$  увеличивается с ростом расхода топлива и кривые располагаются друг над другом. По измеренным концентрациям  $CO_2$  рассчитывались коэффициенты избытка воздуха  $\alpha$  для пропан-бутана, также представленные на рис. 5, дающие исходные

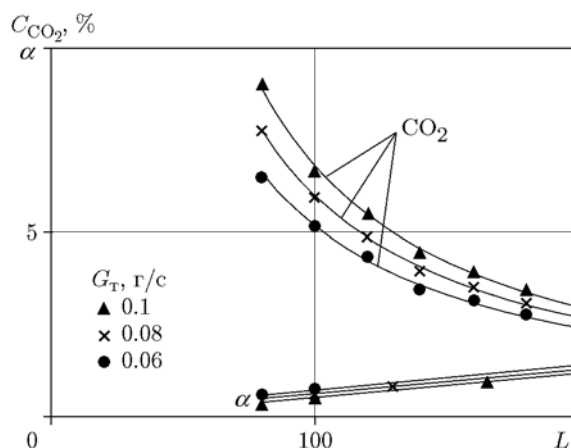


Рис. 5. Зависимости концентрации  $CO_2$  и коэффициента избытка воздуха на оси холодной струи от расстояния до сопла

характеристики холодных струй перед горением.

При горении значения  $\alpha$  увеличиваются в связи с повышением температуры и снижением плотности смеси, но качественные зависимости от  $L$  являются априорной информацией. Реальная информация об условиях до срыва и во время срыва горения получена в результате измерения температуры, концентрации компонентов смеси и характеристик горения на оси струи, которые приведены в табл. 1.

Эволюция представленных в таблице характеристик показывает (варианты 1–4 и 5–7), что при приближении к границе срыва полнота сгорания уменьшается, поскольку увеличивается концентрация основных непрореагировавших компонентов смеси  $O_2$  и  $C_mH_n$ , что ведет к уменьшению промежуточных ( $H_2$  и  $CO$ ) и конечного ( $CO_2$ ) продуктов горения. Все это приводит к падению температуры горения и увеличению коэффициента избытка топлива, который достигает низшего предела воспламенения смеси ( $\alpha = 1.7$  [6]) и превосходит его ( $\alpha = 1.7 \div 2.5$ ). Из табл. 1 видно, что на одном и том же расстоянии  $L$  значения  $\alpha$  и значения  $\alpha_x$  для холодной струи практически близки при устойчивом горении и различаются в два раза при срыве горения. Наблюдения показали, что перед срывом имеет место неустойчивое горение в виде затухания-оживления процесса: при затухании, вероятно, идет накопление топлива внутри нагретой пористой преграды, при благоприятных условиях ( $\alpha < 1.7$ ) накопленная порция топлива воспламеняется и сгорает

Таблица 1

Вариант	$G_T$ , г/с	$L$	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	$C_mH_n$	$\alpha$	$\alpha_x$	$T$ , °C	$\eta$	Примечания
			% (по объему)									
1	0.04	130	1.5	0.7	1.5	11.6	0.04	0.95	1.0	1050	0.93	Горение
2	0.04	140	9.8	0.7	1.3	5.1	2.2	1.22	1.25	1025	0.63	—//—
3	0.04	150	15.5	0.3	0.5	2.2	2.5	1.9	1.3	800	0.34	—//—
4	0.04	155	17.8	0.2	0.3	1.3	2.7	2.3	1.4	650	0.17	Срыв
5	0.06	150	13.5	0.4	1.0	2.8	2.9	1.4	1.1	800	0.4	Горение
6	0.06	160	15.3	0.3	0.5	2.0	2.75	1.7	1.2	750	0.3	—//—
7	0.06	170	18.0	0.1	0.1	0.4	2.7	2.5	1.3	700	0.15	Срыв
8	0.08	175	14.7	0.2	0.35	1.9	3.1	2.1	1.1	825	0.28	—//—
9	0.1	180	17.1	0.1	0.1	1.5	3.3	1.7	0.9	850	0.26	—//—

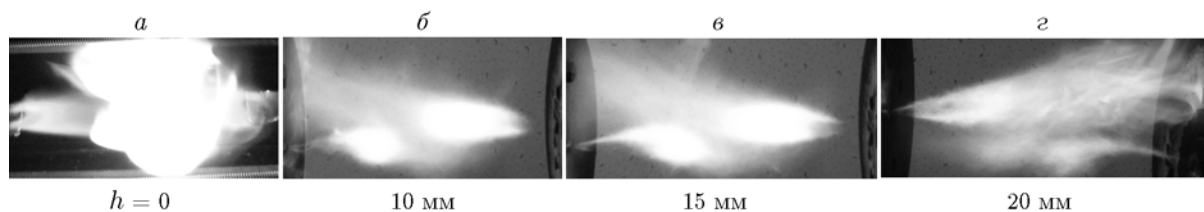


Рис. 6. Изображение встречных струй

до следующей паузы. Далее процесс повторяется до остывания преграды ниже температуры воспламенения смеси, когда горение прекращается. Такой пульсирующий режим, по-видимому, поддерживает горение при отмеченных выше значениях  $\alpha = 1.7 \div 2.5$ , при которых процесс должен бы прекратиться, если исходить из пределов воспламенения смеси. Следует отметить, что на стальной сплошной преграде пульсирующее горение не наблюдалось — срыв наступал сразу.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ И ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ СТРУЙ

Экспериментальное исследование взаимодействия горящих струй пропан-бутана, инжектируемого из противоположно расположенных сопел диаметром 0.5 мм, проводилось по схеме рис. 1. Данные экспериментов приведены в виде зависимости  $L_c(Но)$ , аналогично результатам взаимодействия одиночной струи с преградой (см. рис. 3), где  $L_c = l_c/d$ ,  $l_c$  — половина расстояния между соплами при равенстве условий впрыска обеих струй. При горении струй сопла отодвигались друг от дру-

га до момента срыва пламени, что фиксировалось значением  $L_c$ . На рис. 6 изображены четыре варианта встречи струй при смещении их осей относительно друг друга, характеризуемом параметром  $h$ . У соосно расположенных струй ( $h = 0$ ) зона взаимодействия расширяется во все стороны в основном перпендикулярно осям в виде бело-желтого сажистого пламени (рис. 6,а). Смещение осей струй на  $h = 10$  мм (рис. 6,б) качественно меняет картину: общее пламя расширяется в сторону сопел в виде прижатых друг к другу струй голубого цвета. Увеличение  $h$  до 15 мм (рис. 6,в) еще больше расширяет общее пламя, причем сердцевина одной струи совпадает с периферией другой струи. По-видимому, эта ситуация наиболее благоприятна для стабилизации пламени, поскольку в зоне взаимодействия происходит перемешивание участков с максимальной и минимальной концентрациями топлива. Дальнейшее отдаление струй до  $h = 20$  мм (рис. 6,г) характеризуется касанием их периферийных, относительно бедных топливом участков; струи меньше влияют друг на друга, что приводит к потере устойчивости. Данные наблюдения подтверждаются экспериментальными

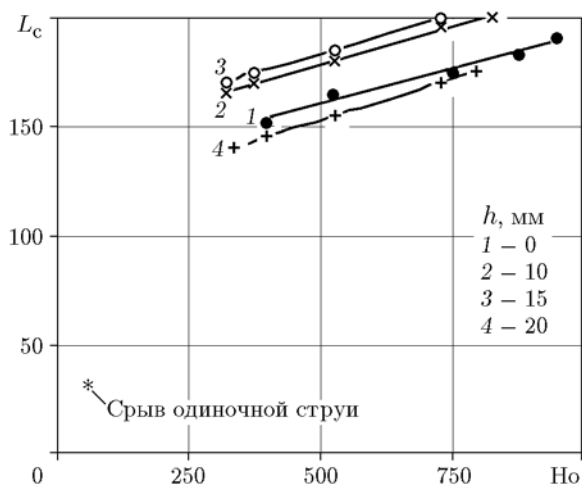


Рис. 7. Зависимость расстояния срыва от критерия гомотронности при разных несоосностях ( $h$ ) расположения сопел

ми зависимостями  $L_c(\text{No})$  при разных значениях  $h$ , приведенными на рис. 7. Видно, что длина срыва  $L_c$  практически линейно зависит от критерия гомотронности, с ростом которого устойчивость горения повышается. Лобовое столкновение струй ( $h = 0$ ) представлено кривой 1. Сдвиг осей струй  $h = 10$  мм на  $5 \div 8$  % повышает устойчивость горения (кривая 2 расположена выше кривой 1). Вероятно, в местах касания противоположно направленных струй возникают участки вихревых течений, которые оказывают дополнительно стабилизирующее влияние на горение. На расстоянии между осями  $h = 15$  мм стабилизирующий эффект достигает максимума (кривая 3 лежит выше кривой 2), далее при  $h = 20$  мм устойчивость горения резко падает (кривая 4 расположена ниже кривых 3, 2, 1). Следовательно, расстояние  $h = 15$  мм можно считать оптимальным. Сравнение с приведенными на рис. 7 данными для срыва одиночной струи ( $L_c = 35$ ,  $\text{No} = 75$ ) показывает, что границы устойчивого горения встречных струй существенно расширяются: по  $\text{No}$  — на порядок и более, по  $L_c$  — в 6–8 раз, что является важным положительным результатом. Более того, горение одиночной струи возможно до определенных значений  $\text{No}$ , выше которых происходит срыв; горение встречных струй с повышением  $\text{No}$  становится все более устойчивым. Поскольку критерий  $\text{No}$  пропорционален скорости истечения  $u_0$  (по формуле (1)), которая, в свою очередь, пропорциональна  $\sqrt{G_T}$ , то с повышением значения  $G_T$

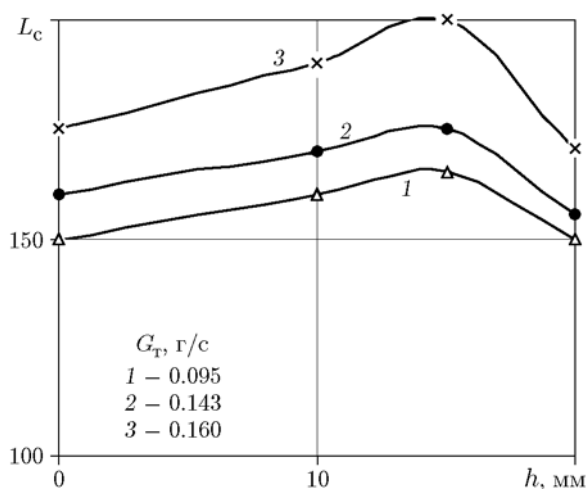


Рис. 8. Зависимость расстояния срыва горения от смещения осей сопел

горение встречных струй все более стабилизируется, что наглядно показано на рис. 8: все три зависимости  $L_c(h)$  подобны и имеют максимумы при  $h = 15$  мм. Кривая 1, построенная для наименьшего расхода топлива ( $G_T = 0.095$  г/с — суммарный расход для двух сопел), располагается ниже кривой 2 ( $G_T = 0.143$  г/с) и тем более ниже кривой 3 ( $G_T = 0.16$  г/с), что свидетельствует о росте устойчивости горения с увеличением  $G_T$ . Это означает, что можно создавать горелочные устройства на встречных струях увеличенной мощности и энергонапряженности со стабильными режимами горения.

При определенных углах пересечения струй образуются зоны торможения. Как показали эксперименты, в диапазоне углов  $\theta = 90 \div 180^\circ$  горение устойчивое; при острых углах зоны торможения практически не образуются и пересечение струй не дает стабилизирующего эффекта. Экспериментальные за-

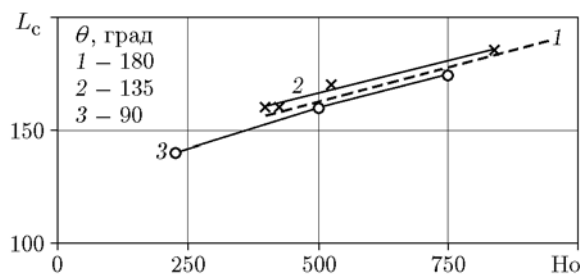


Рис. 9. Зависимость длины срыва от критерия гомотронности при пересечении струй под разными углами

висимости  $L_c(\text{Но})$  при разных углах встречи струй показаны на рис. 9. В диапазоне углов  $90 \div 180^\circ$  наблюдается примерно одинаковый эффект (в пределах ошибок измерений) стабилизации. Поэтому пересекающиеся струи, как и встречные, могут успешно применяться в горелочных устройствах, в том числе сложной конфигурации.

### ВЛИЯНИЕ БАЛЛАСТИРОВАНИЯ ТОПЛИВА УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ

Важным для практики является использование топлив сложного химического состава. На различных производствах и в энергетических установках применяются такие газообразные топлива, как коксовый, генераторный, доменный газы, биогаз, сланцевый газ и др. Все они содержат горючие и негорючие компоненты, влияние которых необходимо учитывать при организации горения. В последнее время обострился интерес к использованию сланцевого газа в связи со значительным ростом его добычи, несмотря на то что он включает в себя существенную долю инертных компонентов и отличается относительно низкой калорийностью. По данным [6] в сланцевом газе содержится 16 %  $\text{CO}_2$  и до 27 %  $\text{N}_2$  (в сумме 43 %), что значительно снижает его кало-

рийность: она в 2.5 раза ниже, чем у метана. Эти обстоятельства отрицательно влияют на макрокинетические характеристики и устойчивость горения. В [7] при изучении устойчивости диффузионного горения оторванных от сопла одиночных струй метана и пропан-бутана с добавками  $\text{CO}_2$  показано, что длина отрыва монотонно растет с увеличением концентрации  $\text{CO}_2$ , что связано с уменьшением нормальной скорости распространения пламени и увеличением характерного времени горения. Все эти факторы свидетельствуют о снижении устойчивости диффузионного горения свободных струй при балластировании топлива углекислым газом. Эксперименты по изучению влияния добавок  $\text{CO}_2$  к пропан-бутану на устойчивость горения встречных струй проводились по схеме, изображенной на рис. 1, а обработка данных осуществлялась аналогично описанной выше процедуре, путем фиксации условий срыва горения. На рис. 10 показаны зависимости длины срыва пламени  $L_c$  от отношения расхода  $\text{CO}_2$  к расходу топлива:  $\beta = G_{\text{CO}_2}/G_T$  — при разных значениях  $G_T$ . Видно, что при увеличении концентрации балласта устойчивость горения падает, причем при малых расходах топлива падение интенсивнее, чем при больших. Так, при  $\beta = 0.5$  значение  $L_c$  при  $G_T = 0.043$  г/с уменьшается в два раза, а при  $G_T = 0.08$  г/с — на 25 %. Следовательно, устойчивость горения балластированного топлива повышается с ростом расхода топлива. Это наглядно видно на рис. 11, где приведены зависимости  $L_c(G_T)$  при

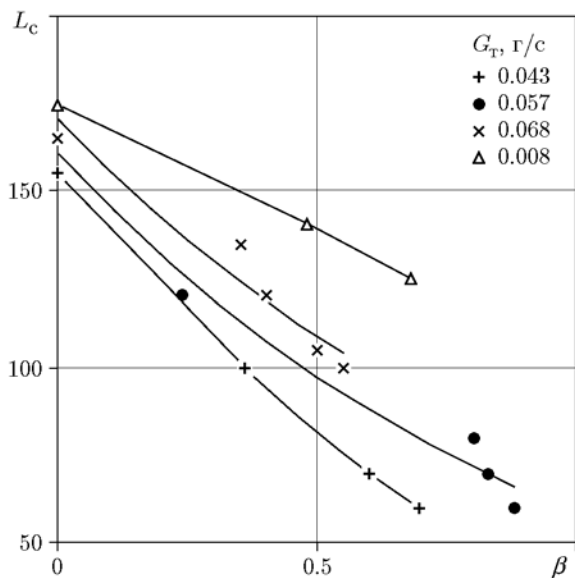


Рис. 10. Зависимость длины срыва пламени встречных струй от отношения  $\beta$  расходов  $\text{CO}_2$  и пропан-бутана

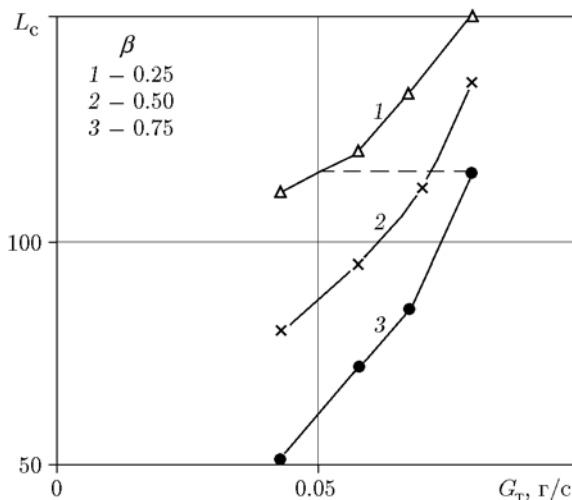


Рис. 11. Зависимость длины срыва пламени от расхода пропан-бутана

$\beta = 0.25, 0.5$  и  $0.75$ . Длина срыва резко увеличивается с повышением расхода топлива, так что одинаковую устойчивость можно получить при разных значениях  $\beta$ , меняя  $G_T$  (см. штриховую линию на рис. 11).

Потеря устойчивости горения при балластировании топлива обусловлена изменением характеристик топливовоздушной смеси, которые рассматривались в [7]. Добавки инертных газов в топливо более 5 % изменяют нормальную скорость распространения пламени  $u_{n,b}$  согласно зависимости [6]

$$u_{n,b} = u_n(1 \div 0.01 [N_2] - 0.012 [CO_2]),$$

где  $u_n$  — нормальная скорость пламени чистого топлива,  $[N_2]$  и  $[CO_2]$  — объемные концентрации азота и углекислого газа в топливе. Так, например, при  $\beta = 0.5$  будет  $u_{n,b} = 0.4u_n$ , что существенно нарушает условие устойчивости горения, определяемое равенством скорости истечения топлива и скорости горения смеси. Также балластирование разбавляет смесь, уменьшая в ней концентрацию топлива и приближая коэффициент  $\alpha$  к пределу воспламеняемости. Перечисленные обстоятельства необходимо учитывать при использовании топлив с инертными добавками в горелочных устройствах.

### КРИТЕРИАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ СОУДАРЯЮЩИХСЯ СТРУЙ ТОПЛИВА

Приближенная критериальная интерпретация рассмотренных результатов взаимодействия горящих струй может быть получена на

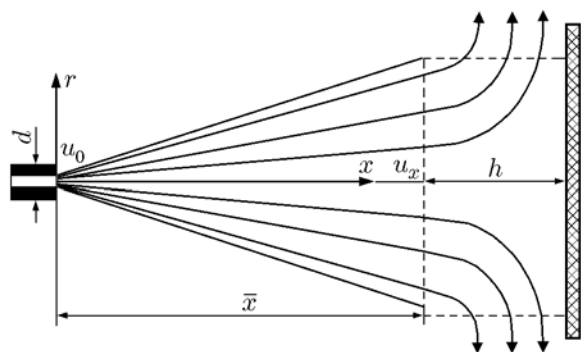


Рис. 12. Схема взаимодействия струи с преградой

основе упрощенных представлений о натекании топливной струи на преграду, схема которого изображена на рис. 12. Струя, впрыснутая из сопла диаметром  $d$ , со скоростью  $u_0$  движется к сплошной преграде и на расстоянии  $h$  в сечении  $\bar{x} = x/d$  тормозится и растекается в радиальном направлении. При этом начальная скорость радиального течения равна скорости в сечении  $\bar{x}$ , т. е.  $u_x$ . В данной ситуации условия стабилизации пламени имеют вид:

$$u_t = \sqrt{D_t/\tau_*} \geq u_x, \quad (4)$$

$$\Delta_t = \sqrt{D_t\tau_*} \leq h, \quad (5)$$

где  $u_t$  — скорость турбулентного горения,  $D_t$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $\Delta_t$  — ширина зоны турбулентного горения.

Условия срыва горения запишем в виде  $u_t = u_x$  и  $\Delta_t = h$ . Поскольку скорость  $u_x$  падает (линейно) до нуля на преграде, условия срыва получаем делением (4) на (5):

$$\frac{u_x}{h} = \frac{u_t}{\Delta_t} = \frac{1}{\tau_*}. \quad (6)$$

Запишем выражение для критерия гомохронности, аналогичное (1), с учетом (6) для сечения  $\bar{x}$ :

$$No_x = u_x\tau_*/h = 1. \quad (7)$$

Формула (6) является условием срыва горения, однако для расчетов входящие в нее величины необходимо выразить через известные из экспериментов значения. Из данных опытов известно эмпирическое соотношение

$$\bar{d}_x \approx 0.27\bar{x}, \quad (8)$$

где  $\bar{d}_x = d_x/d$  — относительный диаметр сечения струи на относительном расстоянии  $\bar{x} = x/d$  от сопла.

Из уравнения импульсов при истечении струи в среду с  $p = \text{const}$  (без спутного потока) следует

$$p_T S_c = \frac{\rho u_0^2}{2} S_c = \frac{\rho u_x^2}{2} S_x, \quad (9)$$

где  $p_T$  — давление впрыска топлива,  $S_c = \pi d^2/4$  — площадь сечения сопла,  $S_x = \pi d_x^2/4$  — площадь сечения струи на длине  $x$ ,  $\rho$  — плотность топлива. После преобразований в (9) получаем соотношение



Таблица 2

Вариант	$u_0$ , м/с	$\bar{x} = L$	$\tau_*$ , мс	$\alpha$	$T$ , °С	Примечания
Струя — преграда						
1	124	110	0.9	0.95	1050	Горение
2	124	140	1.44	1.22	1025	—//—
3	124	150	1.65	1.9	800	—//—
4	124	154	1.74	2.3	650	Срыв
5	175	148	1.14	1.4	800	Горение
6	175	160	1.33	1.7	750	—//—
7	175	170	1.5	2.2	700	Срыв
8	248	176	1.13	2.1	825	—//—
9	304	180	0.97	1.7	850	—//—
Встречные струи						
10	136	155	1.6	—	—	Срыв
11	175	165	1.4	—	—	—//—
12	248	175	1.12	—	—	—//—
13	277	184	1.11	—	—	—//—
14	316	190	1.03	—	—	—//—

$$u_x = u_0 \frac{d}{d_x} = \frac{u_0}{\bar{d}_x}. \quad (10)$$

Из уравнения неразрывности (см. рис. 12) имеем равенство

$$\rho u_x S_x = \rho h 2\pi r_x u_x,$$

из него находим

$$r_x^2 = 2r_x h,$$

откуда

$$h = r_x/2. \quad (11)$$

Подставляя в (7) значения  $u_x$ ,  $h$ , определенные соответственно по формулам (10), (11), и используя (8), получим

$$\frac{u_0 \tau_* 2}{0.27 \bar{x} r_x} = \frac{u_0 \tau_*}{d} \frac{2}{0.27 \bar{x} 0.135 \bar{x}} = 1,$$

откуда

$$\text{Но} = \frac{u_0 \tau_*}{d} = 0.0182 \bar{x}^2. \quad (12)$$

Формула (12) является приближенным критериальным соотношением для срыва горения струи на преграде. Зная условия впрыска топлива ( $u_0$ ,  $d$ ,  $\tau_*$ ), можно определить расстояние срыва горения  $\bar{x}$  (в описанных выше

экспериментах  $\bar{x} = L_c$ ). Если из экспериментов известны значения  $u_0$ ,  $d$ ,  $\bar{x}$ , можно определить значения  $\tau_*$ , т. е. решить обратную задачу. В табл. 2 приведены расчетные значения  $\tau_*$  и другие параметры экспериментов при горении пропан-бутановой струи на преграде (варианты 1–9) в предсрывной период горения и при срыве. Для сравнения в таблице представлены значения  $\tau_*$  для встречных струй.

Из табл. 2 видно, что при  $u_0 = 124$  м/с (варианты 1–4) с увеличением  $\bar{x}$  существенно изменяются характеристики горения: снижается температура у преграды, увеличиваются  $\alpha$  и  $\tau_*$  в предсрывных условиях горения. При срыве параметры  $\alpha$  и  $\tau_*$  достигают максимальных значений, а температура минимальна. Характер изменения этих величин сохраняется при увеличении  $u_0$  в 1.5 раза (до 175 м/с) и соответствующем изменении расхода топлива (варианты 5–7), с тем отличием, что при этом параметры  $\bar{x}$ ,  $\tau_*$ ,  $\alpha$  и  $T$  принимают свои значения. Сравнивая значения параметров при срыве, можно отметить, что при росте  $u_0$  (или  $G_T$ ) в 2.5 раза величина  $\tau_*$  снижается в 1.8 раза. При этом снижается коэффициент  $\alpha$  (в 1.3 раза) и повышается темпе-

ратура (с 650 до 850 °С). Резюмируя наблюдения, можно отметить, что устойчивость горения струи на преграде определяется сочетанием характеристик  $\bar{x}$ ,  $\tau_*$ ,  $\alpha$  и  $T$ , значения которых задаются расходом топлива. Данные в табл. 2 (варианты 10–14) по срыву встречных струй показывают, что они примерно соответствуют данным струя — преграда. Это означает, что описанные выше представления и критериальная зависимость (12) могут использоваться при анализе горения встречных струй, где вторая струя рассматривается как преграда, оказывающая тормозящий эффект первой струе.

## ВЫВОДЫ

1. Принятые в качестве критериев устойчивости горения топливных струй критерий гомохронности  $Но$  и относительная длина струи  $L$ , при которой происходит срыв, показали существенное (на порядок и более) повышение устойчивости горения встречных и пересекающихся струй по сравнению со свободной одиночной струей.

2. Устойчивость горения при взаимодействии струи с преградой или другой струей возрастает с увеличением расхода топлива или скорости истечения струи  $u_0$  из сопла. Свободная одиночная струя горит до определенных значений  $u_0$  (или  $Но$ ), выше которых происходит срыв горения.

3. Стабилизация горения струи на преграде существенно зависит от свойств материала и температуры нагрева последнего. Преграда из керамики интенсивно разогревается (в отличие от стальной) и стабилизирует горение наилучшим образом, причем экспериментальные зависимости  $L_0(Но)$  примерно совпадают с данными для встречных струй.

4. Эксперименты по взаимодействию несососно расположенных встречных струй показали, что существует оптимальное расстояние между осями струй, когда устойчивость горения максимальна. При этом середина одной струи (концентрация топлива максимальна) совпадает с краем другой струи (концентрация минимальна).

5. Исследование влияния балластирования топлива углекислым газом показало, что устойчивость горения встречных струй снижается пропорционально концентрации балласта  $\beta = G_{CO_2}/G_T$ . С ростом расхода топлива влияние балласта на устойчивость снижается.

6. На примере взаимодействия струи с преградой предложена приближенная модель горения топлива у преграды и получена критериальная зависимость для условий срыва, из которой по известным начальным условиям ( $u_0$ ,  $d$ ,  $\tau_*$ ) можно найти длину срыва  $\bar{x} = L = l/d$  или по известному из опытов значению  $L$  рассчитывать характерное время горения  $\tau_*$  и по нему определить другие характеристики (например, скорость горения, толщину турбулентного пламени).

7. Газовый анализ показал, что срыв горения происходит при  $\alpha = 1.7 \div 2.5$ , т. е. при достижении предела воспламенения пропан-бутан-воздушной смеси (и выше), что обуславливает существенную неполноту сгорания смеси  $0.15 \div 0.28$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.
2. Баев В. К., Ясаков В. А. Устойчивость диффузионных пламен в затопленных и спутных струях // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 2. — С. 163–177.
3. Баев В. К., Бажайкин А. Н. Уточнение критериального описания стабилизации пламени при горении газовых струй // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 3–8.
4. Баев В. К., Третьяков П. К. Характерные времена горения топливо-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 1968. — № 3. — С. 367–376.
5. Стырикович М. А., Катковская К. Я., Серов Е. П. Котельные агрегаты. — М.; Л.: ГЭИ, 1959.
6. Иссерлин А. С. Основы сжигания газового топлива. — Л.: Недра, 1980.
7. Баев В. К., Бажайкин А. Н. Влияние примеси  $CO_2$  к топливу на горение газовых струй в воздухе // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 3–7.

Поступила в редакцию 13/X 2015 г.