

**ЯВЛЕНИЕ «ЗАБРОСА» ПЛАМЕНИ
ПРИ ГОРЕНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ ГАЗОВ
В ПРОТОЧНОЙ СИСТЕМЕ**

Ф. Б. Моин, В. У. Шевчук
(Борислав)

При горении предварительно перемешанных газов в открытом факеле скорость проскока пламени определяется свойствами горючей смеси и гидродинамической обстановкой внутри трубы, подводящей газ в сторону горения. Согласно теории ламинарного проскока пламени [1, 2], скорость истечения газа, при которой наступает проскок пламени — скорость проскока — для цилиндрической трубы равна:

$$w = k u_n^2 \frac{D}{a}, \quad (1)$$

где u_n — нормальная скорость горения; D — диаметр трубы; a — коэффициент температуропроводности; k — коэффициент, примерно равный 0,01 [2, 3].

Критическое условие турбулентного проскока [3]

$$S = 0,5 \operatorname{Re}^{0,9} \quad (2)$$

можно преобразовать к виду:

$$\frac{w}{u_n} = 1,78 \operatorname{Re}^{0,1}. \quad (3)$$

Для ламинарного режима максимальное значение величины $\frac{w}{u_n}$ получается при подстановке в уравнение (1) критического значения $\operatorname{Re} = 2300$, что дает $\frac{w}{u_n} = 4,3$.

В турбулентном режиме, как следует из уравнения (2), w весьма слабо зависит от числа Рейнольдса: при $\operatorname{Re} = 10000$ $\frac{w}{u_n} = 4,2$, а при $\operatorname{Re} = 100000$ — $\frac{w}{u_n} = 5,3$. Таким образом, в условиях работы промышленных горелочных устройств ($\operatorname{Re} = 10^4 - 10^5$) скорость проскока в открытом факеле не превышает нормальную скорость горения более чем в 5,3 раза.

Однако при горении предварительно перемешанных смесей в проточных системах иногда наблюдаются проскоки пламени из зоны горе-

ния в зону смешения при скоростях истечения газа из горелки, значительно превышающих скорость проскока в открытом факеле [4].

При горении предварительно перемешанных метано-кислородных смесей состава $O_2 : CH_4 = 0,6-0,7$ в туннеле диаметром 80—100 мм и подаче газовой смеси в зону горения цилиндрической трубой диаметром 20—30 мм нами наблюдались проникновения пламени в зону смешения при скоростях 100—150 м/сек, в то время как нормальная скорость распространения пламени для смесей указанного состава не превышает 150 см/сек. Таким образом, фактическая скорость газа была более чем на порядок выше максимально возможной для указанных смесей скорости проскока в открытом факеле. Такой проскок пламени часто наблюдается при колебаниях давления или расхода смеси в режимах неустойчивого горения.

Причиной указанных проскоков пламени могло быть либо возникновение детонации при горении метано-кислородных смесей, либо особенности горения в проточной системе, в частности пульсационное горение.

Специально поставленные опыты показали, что смеси указанного выше состава не способны к детонации. Наличие проникновения пламени в зону смешения при скоростях истечения на порядок превышающих скорость проскока в открытом факеле заставляет искать причину этого явления в специфике горения в проточных системах на границе устойчивости. Особенностью горения на границе устойчивости является возможность возникновения чередующихся воспламенений и погасаний пламени в камере горения. Это чередование приводит к часто наблюдающемуся пульсационному горению, обычно предшествующему окончательному срыву пламени.

При таком пульсационном горении происходят одиночные или повторяющиеся вспышки в камере горения, сопровождающиеся пульсациями давления. Не исключена возможность, что во время очередной вспышки давление в камере возрастет до величины, превышающей давление в зоне смешения. При этом, естественно, возникнет обратный ток горячего газа и пламя будет заброшено из камеры горения в зону смешения. Следовательно, такие забросы пламени не исчерпывают всех возможных причин проникновения пламени в смеситель, особенно вдали от области неустойчивого горения. Тем не менее изучение забросов при пульсационном горении представляет большой интерес, так как позволяет предсказать возможность проскока пламени по этой причине и определить условия, исключаящие появление забросов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 изображена схема установки для изучения забросов пламени при пульсационном горении. Предварительно приготовленная смесь через ротаметр 1 поступает в форкамеру 2, а из нее через сопло 3 в камеру сгорания 6. Камера сгорания снабжена на выходе диафрагмой 8, имитирующей гидродинамическое сопротивление системы отвода и сбора газов промышленных устройств. Электроды 4 служат для зажигания смеси искрой от индукционной катушки. Опыты проводились следующим образом.

Устанавливался заданный расход смеси и после продувки форкамеры 2 и камеры 6 производилось воспламенение потока газа искрой. При этом можно было наблюдать, как пламя распространялось в камере горения по потоку. В какой-то момент времени при подходящих ус-

ловиях происходил «заброс» пламени из камеры горения в форкамеру, где пламя распространялось против потока. Наличие «заброса» легко фиксировалось визуально. Этот процесс соответствует одиночной пульсации давления при пульсационном горении при условии полного погасания пламени в камере горения. Физическая интерпретация явления «заброса» пламени очевидна. После зажигания потока горючей смеси в камере 6 по мере распространения пламени от входа к выходу холодный газ «замещается» горячими продуктами сгорания. Поскольку диафрагма препятствует свободному истечению газа, давление в камере повышается. Если в определенный момент времени давление в камере горения превысит давление в форкамере, возникнет обратный ток газа через сопло и горящий газ будет заброшен в форкамеру, воспламенив имеющуюся там горючую смесь.

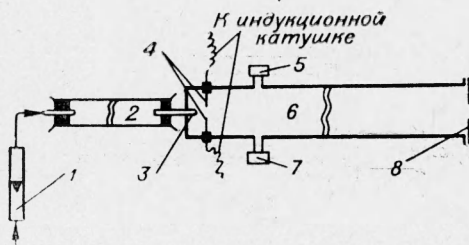


Рис. 1.

Поскольку длительность пульсации невелика, можно принять, что давление в форкамере постоянно. Если давление на входе в камеру горения до вспышки равно p_0 , а во время вспышки повышается до величины $p_2 = p_1 + \Delta p$, то необходимым условием «заброса» пламени будет неравенство

$$p_2 = p_1 + \Delta p > p_0$$

или

$$\Delta p > \Delta p_0,$$

где $\Delta p_0 = p_0 - p_1$ — стационарный (до вспышки) перепад давления на сопле.

Итак, «заброс» пламени может произойти, если величина пульсации давления будет больше стационарного перепада давления на сопле. Поэтому при заданной величине Δp_0 фактором, определяющим возможность «заброса» пламени, является амплитуда пульсации давления Δp .

На описанной установке экспериментально было показано, что «заброс» пламени может происходить при скоростях истечения из сопла, в 10 и более раз превышающих скорость проскока пламени такой же смеси на том же сопле в открытом факеле.

Так, например, «заброс» пламени стехиометрической метано-воздушной смеси через сопло диаметром 8 мм происходил при скорости 20—30 м/сек, в то время как скорость проскока этой смеси на этом же сопле составляет лишь 1,5 м/сек.

Таким образом, для изучения закономерностей «заброса» пламени необходимо определить амплитуду пульсации давления при горении в проточной системе, которая, по-видимому, в процессе работы будет зависеть от размеров камеры горения, свойств горючей смеси и сопротивления на выходе из камеры горения.

Опыты проводились на описанной выше установке, но без форкамеры, т. е. «заброс» пламени не осуществлялся, а только фиксировалось увеличение давления при вспышке. Установка была снабжена датчиком максимального давления 6 и датчиком хода давления 4 (см. рис. 1).

Датчик максимального давления (рис. 2) состоит из рабочей полости 1, сообщающейся с камерой горения и закрытой упругой металлической мембраной 2. К мембране прикасается игла 3, укрепленная на легком рычаге 4, вращающемся с некоторым трением в шарнире 5. Принцип действия датчика следующий. Перед измерением игла опускается до замыкания контакта с мембраной. Наличие контакта фиксируется электронным реле, срабатывающим при сопротивлении входной цепи (игла—мембрана) около 1 *Мом*. В момент пульсации давления мембрана прогибается и поднимает при этом иглу, которая фиксируется трением шарнира 5 в положении максимального прогиба мембраны. После пульсации мембрана возвращается в исходное положение и разрывает контакт с иглой. Затем на мембрану подается медленно повышающееся давление, замеряемое

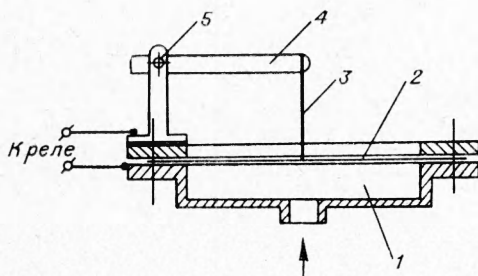


Рис. 2.

U-образным манометром. В момент повторного замыкания контакта между иглой и мембраной давление на датчике будет равно, очевидно, максимальному давлению в момент пульсации. После пульсации мембрана возвращается в исходное положение и разрывает контакт с иглой. Затем на мембрану подается медленно повышающееся давление, замеряемое

U-образным манометром. В момент повторного замыкания контакта между иглой и мембраной давление на датчике будет равно, очевидно, максимальному давлению в момент пульсации.

Датчик хода давления представлял собой микрореостат с легким ползунком, связанным с мембраной. Прогиб мембраны под действием пульсации давления вызывает перемещение ползунка и изменяет сопротивление датчика. Падение напряжения на датчике, включенном в цепь постоянного тока, подается на вход электронного осциллографа, на экране которого можно видеть ход давления во времени.

В процессе работы изучалось влияние диаметра и длины камеры горения, скорости газового потока, температуры и состава горючей смеси, сопротивления системы выхода газов, которое имитировалось диафрагмами, установленными на выходе из камеры горения, на амплитуду пульсаций давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов представлены в таблице и на рис. 3 и 4.

Как видно, при постоянном составе и температуре исходной смеси величина амплитуды пульсации давления пропорциональна объему камеры горения и скорости потока и обратно пропорциональна диаметру диафрагмы в степени $\sim 1,7$ (близкой к двум).

Поскольку в наших экспериментах диафрагма имитировала гидродинамическое сопротивление системы сброса газа камеры горения, целесообразно для определения возможной амплитуды пульсации давления в камере горения использовать условную величину «эквивалентного диаметра». Под «эквивалентным диаметром» диафрагмы подразумевается диаметр диафрагмы, установленной на выходе из камеры сгорания, имеющей такое же гидродинамическое сопротивление, как реальная система сброса газа. Если при расходе газа Q $\text{м}^3/\text{час}$ сопротивление системы равно Δp *мм рт. ст.*, то $d_{\text{экв}}$ можно определить по формуле

$$d_{\text{экв}} = \sqrt[1.7]{\frac{Q}{0,76 \alpha \varepsilon \sqrt{\Delta p \cdot p}}}$$

где α и ε — коэффициенты, определяемые графически по [4].

Зависимость амплитуды пульсации давления от размеров камеры горения, скорости газового потока и диаметра диафрагмы

Диаметр камеры, м	Длина камеры, м	Объем камеры, м ³	Диаметр диафрагмы, м	Скорость газа, м/сек	Амплитуда пульсации давления, кг/м ²
0,0405	1,2	0,00154	0,0228	0,360	500
0,0530	1,2	0,00264	0,0228	0,360	855
0,0806	1,2	0,00610	0,0228	0,360	1940
0,0806	0,95	0,00483	0,0360	0,136	745
0,0806	1,2	0,00610	0,0360	0,136	895
0,0806	2,0	0,01010	0,0360	0,136	1415
0,0405	1,2	0,00154	0,0360	0,360	150
0,0405	1,2	0,00154	0,0360	1,340	265
0,0405	1,2	0,00154	0,0360	2,820	460
0,0806	1,2	0,00610	0,0150	0,136	3520
0,0806	1,2	0,00610	0,0228	0,136	1875
0,0806	1,2	0,00610	0,0698	0,136	245

Примечание. Состав исходной смеси в объемных процентах: CH₄—10,2; O₂—18,9; N₂—69,9. Температура смеси — 20° С.

Влияние температуры подогрева на Δp изучалось на камере диаметром 80,6 мм, длиной 120 см, снабженной диафрагмой диаметром 26,8 мм. В опытах использовалась метано-воздушная смесь, содержащая 10,7% CH₄. Установка была оборудована электрическим подогревателем, а камера снабжена теплоизоляцией. Опыты проводились таким образом, что линейная скорость газа в камере при разных температурах была постоянной и равнялась 0,23 м/сек. Результаты опытов представлены на рис. 3. Как видно, с повышением температуры подогрева амплитуда пульсации уменьшается. Это связано с уменьшением плотности газа, истекающего через диафрагму, так что перепад давления на диафрагме, пропорциональный плотности газа, уменьшается с повышением температуры.

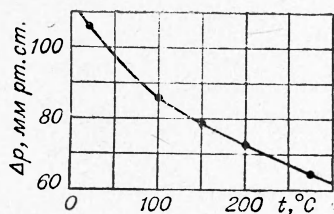


Рис. 3.

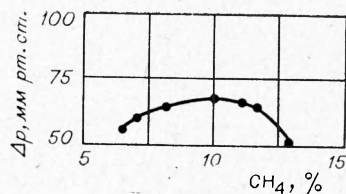


Рис. 4.

Влияние состава метано-воздушной смеси на амплитуду пульсации давления исследовалось на камере диаметром 80,6 мм длиной 1,2 м. На рис. 4 изображено Δp как функция содержания метана в смеси. График зависимости Δp от состава имеет характерный вид кривой колоколообразного типа с максимумом, лежащим вблизи стехиометрии.

Зависимость величины амплитуды пульсации давления от состава смеси должна быть связана с изменением скорости распространения пламени и адиабатической температуры горения, которая определяет относительное изменение объема при сгорании смеси (или давления при горении в замкнутом объеме). Анализ полученных данных показы-

