

ет вниз, а подъемные силы имеют существенное значение. Здесь формально достаточно поменять знак у члена, учитывающего количество движения топлива. Однако при этом возникают трудности в правильном определении объема.

Таким образом, рассмотрение вопроса о длине диффузионного пламени в предположении о квазиодномерности струи (пламени) позволяет проанализировать влияние большого числа факторов, определяющих условия горения и рекомендовать полученные количественные зависимости для приближенного расчета длины диффузионного пламени.

Поступила в редакцию
4/IV 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Шваб. В сб. «Исследование процессов горения натурального топлива». М.—Л., 1948.
2. В. Хауторн, Д. Уэдделл, Г. Хоттель. В сб. «Вопросы горения». ИЛ, 1953.
3. Л. А. Вулис, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярин. Основы теории газового факела. «Энергия», 1968.
4. П. А. Либби. Ракетная техника и космонавтика, 1962, 32, 3.
5. A. Goldburg, Chen Sin. I. Combustion and Flame, 1969, 9, 3.
6. П. В. Левченко, Б. И. Китаев. Сталь, 1952, 3.
7. F. R. Steward. Combustion and Flame, 1964, 8, 3.
8. J. H. Masliyah, F. R. Steward. Combustion and Flame, 1969, 13, 6.
9. К. А. Замятина. В сб. «Вопросы горения». М., 1970.
10. А. Кинк. Изв. АН ЭССР, 1970, 19, 3.
11. В. Б. Рutowский. Изв. ВУЗов, Авиационная техника, 1967, 1.
12. К. Воль, К. У. Шипмэн. В сб. «Процессы горения». М., Физматгиз, 1963.
13. С. Н. Шорин, О. Н. Ермолаев. Теплоэнергетика, 1959, 2.
14. В. А. Спейшер. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
15. L. Vanquickenborne, A. van Tiggelen. Combustion and Flame, 1966, 10, 1.

УДК 620.113.2

К МЕТОДИКЕ ОТБОРА ГАЗОВОЙ ПРОБЫ ИЗ СВЕРХЗВУКОВОГО РЕАГИРУЮЩЕГО ПОТОКА

С. И. Рожицкий, В. Н. Строкин

(Москва)

Отбор газовой пробы из реагирующего потока и последующий химический анализ ее является наиболее распространенным методом определения степени завершенности процесса горения. Особенно успешно он используется в исследованиях горения при дозвуковых скоростях движения смеси [1, 2].

Применение этого метода к исследованию горения в сверхзвуковых потоках связано с рядом практически не исследованных особенностей, основной из которых является образование вблизи отборника ударных волн, вызывающих частичное или полное догорание смеси в точке отбора пробы. В связи с этим форма отборника и метод отбора газовой пробы должны прежде всего обеспечить ослабление или невозможность возникновения скачков уплотнения в отбираемой из потока струйке тока. Этим требованиям, на наш взгляд, удовлетворяют отборники двух видов: конусный, принцип действия которого изложен в [3], но его возможности практически не исследованы до настоящего времени, и клиновидный, рассматриваемый, по-видимому, впервые в настоящей статье.

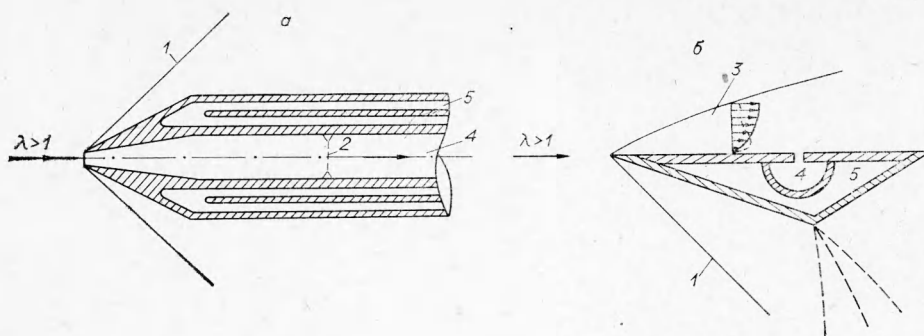


Рис. 1. Схема конусного (а) и клиновидного (б) отборников.

1 — присоединенный скачок уплотнения; 2 — скачок уплотнения внутри отборника; 3 — пограничный слой; 4 — канал для отбора пробы, соединяемый с вакуумированным объемом; 5 — канал водяного охлаждения.

Схемы указанных отборников приводятся на рис. 1. Принцип действия конусного отборника состоит в «проглатывании» прямого скачка уплотнения, образующегося у его входа при отсутствии потока газа (рис. 1, а). Если в процессе отбора пробы скачок располагается в цилиндрической части канала отборника, то в предшествующей расширяющейся части канала происходит дополнительное ускорение сверхзвукового потока. Вследствие этого статическое давление и температура потока снижаются и происходит газодинамическое «замораживание» химических реакций. Если при дальнейшем течении газа происходит интенсивная теплоотдача в стенки отборника, то к моменту прохождения газа через скачок возможно существенное снижение температуры, исключающее повторное воспламенение смеси. В этом случае состав отбираемой газовой пробы будет соответствовать составу газа в набегающем потоке.

Принцип действия клиновидного отборника состоит в отборе газа из низкотемпературной части пограничного слоя, образующегося на плоской охлаждаемой поверхности клина, ориентированной параллельно сверхзвуковому потоку (см. рис. 1, б). Это позволяет избежать образования ударных волн в области течения, из которой производится отбор пробы газа и осуществить охлаждение газа еще до поступления пробы в канал отборника.

В настоящей статье приводятся результаты испытаний отборников обоих типов в сверхзвуковом потоке реагирующей водородно-воздушной смеси.

Рассмотрим конусный отборник. В расширяющемся коническом участке газоотборного канала происходит значительное снижение статических параметров потока. Так, при отборе пробы из сверхзвукового потока с коэффициентом скорости $\lambda = 1,8$ (число Маха $\approx 2,4$), температурой торможения $T^* = 2000^\circ \text{K}$ и полным давлением 5 атм коэффициент скорости в случае пятикратного увеличения площади поперечного сечения канала отборника увеличится в условиях изэнтропического расширения до 2,2, статическое давление составит 0,17 атм, а температура 560°K . Это приводит к возрастанию характерного времени химической реакции примерно на три порядка, и в пределах расширяющегося участка длиной около 10 мм отношение времени пребывания к времени реакции составит примерно 10^{-6} , т. е. в расширяющемся участке канала произойдет «замораживание» химических реакций.

Полагая поэтому, что в потоке, поступающем в канал постоянного сечения отборника, химические реакции прекращены, выясним теоретически возможность догорания смеси при ее последующем движении, когда смесь проходит через прямой скачок уплотнения, находящийся

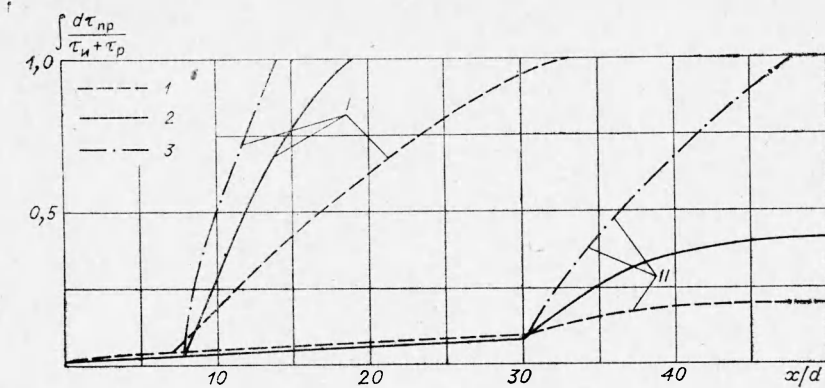


Рис. 2. Изменение отношения времени пребывания ко времени химической реакции при течении горючей смеси в канале при переменном положении скачка уплотнения: $\lambda=1,8$, $p^*=5$ атм, $T_w=300^\circ\text{K}$, $Re_x=10^3$.

I — $p_{\text{ск}}=0,4$ атм; II — $p_{\text{ск}}=0,3$ атм. T^* , $^\circ\text{K}$: 1 — 1600, 2 — 2000, 3 — 3000.

внутри канала отборника. В качестве критерия, характеризующего эффективность работы отборника и определяющего степень догорания пробы в его канале, примем отношение времени пребывания ($\tau_{\text{пр}}$) к полному времени химической реакции, т. е. к сумме времени индукции ($\tau_{\text{и}}$) и времени реакции ($\tau_{\text{р}}$); величина этого отношения определяется интегралом

$$I = \int_0^l \frac{d\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{и}} + \tau_{\text{р}}} \quad (l — \text{длина канала}).$$

Рассмотрим изменение величины I для движущейся по каналу отборника смеси с различной начальной температурой торможения ($T^*=1500, 2000, 3000^\circ\text{K}$), коэффициент скорости на входе в участок канала с постоянным сечением ($d=2,5$ мм) примем равным 2,2, полное давление $P^*=5$ атм. (Начальные параметры течения, используемые при расчете, выбирались, исходя из возможностей последующей экспериментальной проверки работы отборника.) Для определения температуры и давления потока, изменяющихся по длине канала и влияющих в свою очередь на величины $\tau_{\text{и}}$ и $\tau_{\text{р}}$, воспользуемся методом одномерного расчета течения газа в цилиндрическом канале с трением и теплообменом [4] при заданных начальных условиях, который позволяет найти, с одной стороны, зависимость величин λ и p от T^* и, с другой — изменение T^* по длине канала. Результаты расчета величины I для указанного диапазона параметров и при двух значениях давления за скачком приведены на рис. 2. При давлении за прямым скачком уплотнения, равном 0,4 атм, скачок, расположение которого на рис. 2 определяется началом резкого возрастания величины I , находится вблизи от входа в цилиндрический канал. Величина I для смеси с различной начальной температурой ($T^*=1500, 2000, 3000^\circ\text{K}$) уже на небольшом расстоянии от начала цилиндрического канала отборника становится равной единице и проявляет тенденцию к дальнейшему увеличению. Это свидетельствует о возможности полного догорания смеси за скачком в канале в рассматриваемых условиях. При снижении давления за скачком последний смещается в канале ниже по течению. При давлении за скачком 0,3 атм величина I для потока с $T^*=3000^\circ\text{K}$ достигает единицы, а для потока с $T^*=1500$ и 2000°K становится, согласно расчету, существенно меньшей единицы. Это дает основание предполагать, что присутствующий в набегающем на отборник потоке несгоревший водород окажется и в пробе. Естественно, что еще большее снижение давления в магистрале отбора и, следовательно, за скачком уплотнения приведет к дальнейшему пере-

мещению скачка внутри канала и, как показывают оценки, к дальнейшему снижению I .

Исходя из этого, можно ожидать, что величина коэффициента полноты сгорания, определяемая по составу отбираемой пробы, будет уменьшаться при снижении давления в магистрали отбора, постепенно приближаясь к истинной.

Таким образом, методика определения истинных значений коэффициента полноты сгорания в потоке с помощью конусного отборника должна состоять в сравнении составов проб, отобранных в одинаковых условиях из одной точки сверхзвукового потока реагирующей смеси при различных величинах давления в магистрали отбора. В конечном счете необходимо определение такой величины давления, начиная с которой состав пробы, а следовательно, и величина коэффициента полноты сгорания при отборе из данной точки потока изменяться не будет.

Указанное методическое исследование конусного отборника проводилось на срезе аэродинамической трубы, в которой создавалось сверхзвуковое течение водородно-воздушной смеси. Распределение коэффициентов скорости λ , полноты сгорания η , определенного по составу пробы, и избытка воздуха α (рис. 3) было получено с помощью конусного отборника имеющего следующие размеры: диаметр входного отверстия 1 мм, диаметр цилиндрического газоотборника канала 2,3 мм, длина расширяющегося конического участка 8 мм, длина отборника 70 мм, внешний диаметр 9 мм, угол внешнего конуса 40° . Конический участок отборника был изготовлен из меди, остальные участки — из стали; отборник охлаждался водой под давлением 25 атм.

В выбранной точке сверхзвукового потока $r/R_0 = 0,67$, где имелось неполное сгорание водорода¹, производился отбор проб через конусный отборник в вакуумированную емкость при разной величине давления в магистрали отбора. Давление варьировалось локальным уменьшением проходного сечения магистрали. Давление в магистрали измерялось на расстоянии 400 мм от носика отборника. Результаты испытания отборника (рис. 4) показывают, что увеличение давления в магистрали отбора вплоть до 0,4 атм практически не влияет на величину η и лишь при 0,8 атм происходит полное догорание смеси в отборнике ($\eta \approx 1$). В опытах не удалось зафиксировать плавного изменения величины промежуточных значений полноты при изменении давления в магистрали отбора. Однако полученные результаты при сравнении их с результатами расчетов (см. рис. 2) показывают, что отборник, использовавшийся в опытах, «замораживает» газовую пробу более эффективно, чем это следует из теоретических оценок. Это проявляется как в том, что отборник «замо-

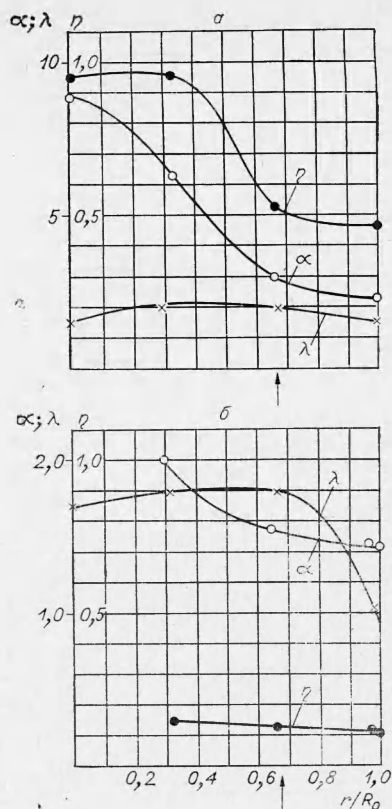


Рис. 3. Распределение на срезе аэродинамической трубы коэффициентов скорости, полноты сгорания и избытка воздуха при T^* , равной 2100 (а) и 1600° К (б) (стрелкой отмечена точка отбора пробы).

¹ Исследование отборника в потоке с $T^* = 3000^\circ \text{К}$ не проводилось, поскольку в этом случае величина η во всем поле течения, определяемая по составу отобранной пробы, составила 0,97—1,0.

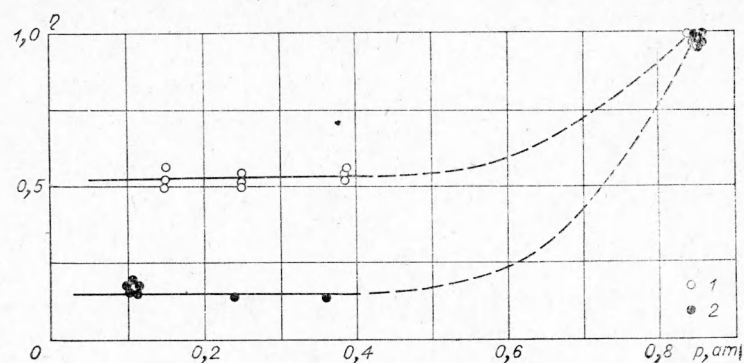


Рис. 4. Изменение коэффициента полноты сгорания от давления в магистрали отбора при T^* , равной 2100 (1) и 1600° К (2).

раживаает» пробу при более высоких давлениях за скачком, так и в том, что снижение давления ниже $p=0,4$ атм не приводит к изменению величины I . В действительности давлению 0,4 атм в магистрали отбора, при котором, судя по данным рис. 4, происходит эффективное «замораживание» в отборнике, соответствует давление за скачком, большее чем 0,4 атм, так как за скачком в цилиндрическом канале газ движется с дозвуковой скоростью и давление падает. Отсюда следует, что теоретически скачок в условиях, когда происходит эффективное «замораживание» пробы, должен еще находиться в расширяющейся части канала отборника.

Сравнение опытных и расчетных данных свидетельствует о том, что работу отборника значительно улучшают факторы, которые невозможно учесть в рамках упомянутой выше методики одномерного расчета.

К числу таких факторов следует отнести пространственную протяженность скачка уплотнения. Известно, что при наличии пограничного слоя в канале при торможении сверхзвукового потока образуется не прямой скачок уплотнения, а система косых, менее интенсивных скачков, имеющая значительную протяженность ($x/d \leq 10$) [5], и вследствие отрывов пограничного слоя интенсифицируется теплоотвод от потока в стенки канала отборника, что в конечном итоге и приводит, по-видимому, к улучшению его работы. По этой причине можно считать, что влияние возможно неполного смыкания пограничных слоев перед скачками, а также влияние наличия определенного количества радикалов (Н, ОН) в потоке, поступающем в отборник, т. е. влияние факторов, ухудшающих работу отборника, пренебрежимо мало.

Рассмотрим теперь способ отбора пробы из пограничного слоя, образующегося на охлаждаемой поверхности клина, расположенной по направлению набегающего сверхзвукового потока. В этом случае (см. рис. 1) точка отбора отстоит на некотором расстоянии от передней кромки клина, которое выбирается так, чтобы над местом отбора расход газа через пограничный слой оказался больше расхода газа, отбираемого через отверстие заданного размера. В этом случае в отборник будет поступать газ из низкотемпературной части пограничного слоя.

Поскольку в пограничном слое (при $T_w < T^*$) реализуется характерный профиль температуры, максимум которого лежит внутри слоя, то не исключена возможность как воспламенения, так и продолжения горения. Однако можно показать [6], что при обтекании холодной поверхности клина (температура стенки $T_w = 300^\circ \text{К}$) водородно-воздушной смесью с параметрами $\lambda = 1,8$, $p = 0,2$ атм, $T^* = 2000\text{—}3000^\circ \text{К}$ и при $Re_x = 10^4 \div 10^5$ (что впоследствии было реализовано в условиях эксперимента) воспламенение смеси внутри пограничного слоя не успеет про-

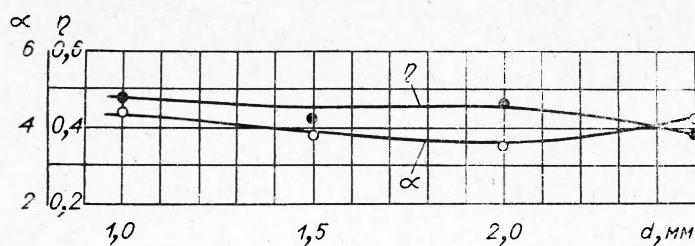


Рис. 5. Зависимость коэффициента избытка воздуха (α) и коэффициента полноты сгорания (η) в точке от диаметра приемного отверстия при отборе с поверхности клина.

изойти. В этих же условиях толщина пограничного слоя над отверстием для отбора будет менее одного миллиметра, т. е. будет сравнима с толщиной фронта пламени.

Можно надеяться, что в таких условиях распространения пламени внутри слоя происходить не будет [7]. Догорание в пробе, вероятнее всего, может произойти лишь в магистрали отбора в случае втекания и торможения газа из высокотемпературной части пограничного слоя. Увеличение количества отбираемого газа в условиях втекания его в отборник с критической скоростью может быть достигнуто увеличением размеров отверстия отбора. Таким образом, метод испытания клиновидного отборника должен состоять в сравнении состава газовых проб, отобранных в одинаковых условиях с помощью одинаковых по конструкции отборников, отличающихся лишь диаметром приемного отверстия. Целью испытаний является определение размера отверстия, начиная с которого состав пробы будет оставаться неизменным.

На основании расчетов и предварительных опытов была разработана конструкция клиновидного отборника, схема которого приведена на рис. 1, б. Расстояние точки отборника от передней кромки клина составляло 15 мм, передний и задний углы клина равны 20° . Поверхность, с которой производился отбор, изготовлена из стали для придания конструкции необходимой жесткости, а нижняя поверхность для лучшего охлаждения кромки клина — из меди. Отборник охлаждался водой при давлении 25 атм.

Испытание клиновидного отборника проводилось в поле течения, показанном на рис. 1, а, при этом приемное отверстие клиновидного отборника располагалось так же, как и при испытаниях конусного отборника, в точке $r/R_0=0,67$. Результаты обработки химического анализа газовых проб представлены на рис. 5, откуда следует, что девятикратное увеличение площади приемного отверстия (т. е. увеличение количества отбираемого газа) не оказало влияния на величину коэффициента полноты сгорания в точке. Следовательно, изменение диаметра отверстия в указанных пределах не влияет на «замораживание» пробы. Этот факт, по-видимому, является следствием сложной пространственной картины втекания газа в отверстие отбора.

Оценки показывают, что температура пробы, определенная по расходу газа, оказывается близкой к температуре стенки ($T_w=500^\circ\text{K}$). Таким образом, хотя приведенные результаты опытов, на наш взгляд, убедительно демонстрируют надежность клиновидного насадка, для его совершенствования и четкого определения возможных границ его использования необходимо изучение течения газа вблизи отверстия отбора пробы.

Из сравнения рис. 4 и 5 следует, что величины η , полученные при отборе в одинаковых условиях с помощью отборников, основанных на совершенно различных принципах, практически совпадают ($\eta=0,52$ —

$\div 0,47$). Это обстоятельство, на наш взгляд, свидетельствует о представительности отбираемой пробы и подтверждает правомерность использования отборников указанных типов.

Поступила в редакцию
11/XI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Tine. Gas Sampling and Chemical Analysis in Combustion Processes, N.—Y., Pergamon Press, 1961.
2. R. Fristrom, A. Westenberg. Flame Structure, N.—Y., McGraw — Hill Book Company, 1965.
3. T. Howells. Sampling of Combustion Gases Fuel Soc. J., 1964. 15, 3.
4. Н. М. Белянин. ИФЖ, 1964, 7, 3.
5. А. И. Зубков, Л. И. Соркин. Изв. АН СССР, механика и машиностроение, 1961, 1, 114.
6. I. Schetz, S. Favin. Comb. and Flame, 1967, 11, 5, 397.
7. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.

УДК 536.468

К ТЕПЛОВОЙ ТЕОРИИ ГЕТЕРОГЕННОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, Т. М. Мартемьянова
(Москва)

Под гетерогенным воспламенением обычно понимают приводящий к горению нестационарный процесс теплового самоускорения реакции, протекающий на поверхности раздела горючего и окислителя. Развитие этого процесса определяется кинетикой гетерогенной реакции и условиями тепло- и массообмена на поверхности горючего и окислителя.

Математическое описание этого процесса в общем случае приводит к необходимости решения многопараметрической системы нелинейных дифференциальных уравнений [1—4], что в сильной степени затрудняет анализ картины развития процесса и использование полученных результатов для различного рода оценок.

Основной момент, приводящий к сложности математической постановки задачи заключается в необходимости учета диффузии исходных компонентов и продуктов реакции. Известно [5], что роль диффузии изменяется в ходе развития процесса. На начальных стадиях процесс протекает в кинетической области; с ростом температуры роль диффузионных факторов увеличивается и при горении (в случае пространственно разделенных реагентов) становится определяющей.

В связи с этим решение задачи о гетерогенном воспламенении без учета процессов диффузии (допущение гетерогенной реакции нулевого порядка) представляет определенный интерес, поскольку позволяет за счет существенного упрощения математической модели получить ясную физическую картину различных сторон явления. Эта модель использована для рассмотрения гетерогенного воспламенения тела неограниченных размеров [6, 7]. Естественно, что режимы горения и потухания без учета диффузии описаны быть не могут.