

5. Окисление металлов, Т. I. Теоретические основы. М., Металлургия, 1968.
6. Б. И. Хайкин.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1977.
7. А. П. Алдушин. ПМТФ, 1974, 3, 445.
8. А. Г. Мержанов, Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. ПМТФ, 1972, 6, 99.
9. А. П. Алдушин, Т. П. Ивлева и др.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПЕРЕНОСА НА ТУРБУЛЕНТНУЮ СКОРОСТЬ ВЫГОРАНИЯ

В. П. Карпов, Е. С. Северин

(Москва)

Турбулентное горение в настоящее время хорошо изучено, но тем не менее остается не вполне ясным влияние многих факторов на величину турбулентной скорости горения. Результаты исследования турбулентного горения околопредельных смесей водорода при использовании аргона и гелия в качестве инертных разбавителей [1] показали существование зависимости турбулентной скорости выгорания от молекулярных свойств смеси: от отношения коэффициентов диффузии к температуропроводности исходной смеси, т. е. от критерия Льюиса L . С этой же точки зрения можно рассматривать и результаты сопоставления турбулентных скоростей горения богатых и бедных водородно-воздушных смесей. Более высокие величины скоростей турбулентного горения в бедных смесях были получены как при определении скорости турбулентного горения по передней границе пламени [2], так и при определении турбулентных скоростей выгорания [1].

В настоящей работе делается попытка выявить влияние критерия L на турбулентное горение в более широком диапазоне изменения параметров смеси. Возможность расширения диапазона связана с использованием скоростей турбулентного выгорания, определение которых в условиях бомбы постоянного объема с известным полем турбулентности не связано с регистрацией границ турбулентного пламени и позволяет вести исследования при значительных пульсационных скоростях, малых температурах пламени, нормальных скоростях и при больших коэффициентах температуропроводности. Установка и метод определения турбулентной скорости выгорания описаны в [3]. Результаты экспериментального исследования представлены в виде зависимости турбулентной скорости выгорания w от пульсационной скорости, причем $u_{\Sigma}' = \sqrt{3} \cdot u'$ — среднеквадратичное значение вектора пульсационной скорости, где u' — проекция u_{Σ}' на ось.

На рис. 1 приведена зависимость турбулентной скорости выгорания от пульсационной для метано-воздушных и пропано-воздушных смесей. Видно, что при одинаковых нормальных скоростях и близких температурах горения w богатых смесей пропана выше, чем бедных. Для смесей метана — наоборот, бедные смеси имеют более высокие скорости. Например, смесь метана с воздухом при $\alpha = 0,7$ горит лишь при крайне слабой турбулентности даже при увеличенной мощности источника поджигания. А более богатая смесь пропана ($\alpha = 0,65$) горит со значительными скоростями при высоких интенсивностях турбулентности, несмотря на более низкую нормальную скорость и температуру горения по сравнению с метановой смесью $\alpha = 0,7$. Смещение максимума турбулентных скоростей горения в бедные смеси метана и в богатые пропана и бутана наблюдалось ранее, и в том числе, при горении в условиях бомбы [4].

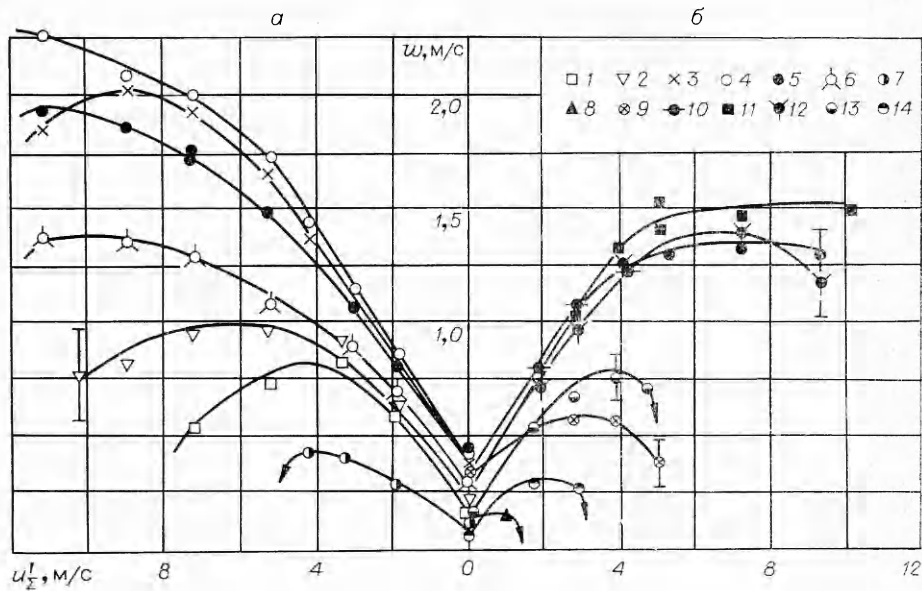


Рис. 1. Зависимость турбулентных скоростей выгорания воздушных смесей пропана (а) и метана (б) от пульсационной скорости.
 α равен: 1—0,6, 2—0,65, 3—0,8, 4—0,9, 5—1,0, 6—1,2, 7—1,4, 8—0,7, 9—0,8, 10—1,0, 11—1,1, 12—1,2, 13—1,4, 14—1,6.

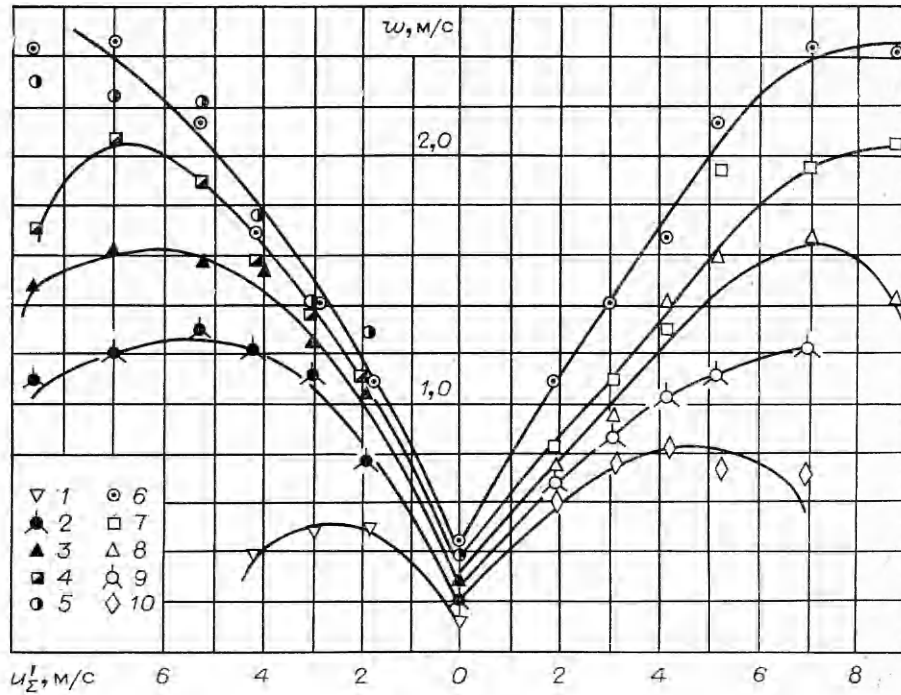


Рис. 2. Зависимость турбулентных скоростей выгорания воздушных смесей этана от пульсационной скорости.
 α равен: 1—0,6, 2—0,65, 3—0,7, 4—0,8, 5—0,9, 6—1,0, 7—1,2, 8—1,3, 9—1,35, 10—1,4.

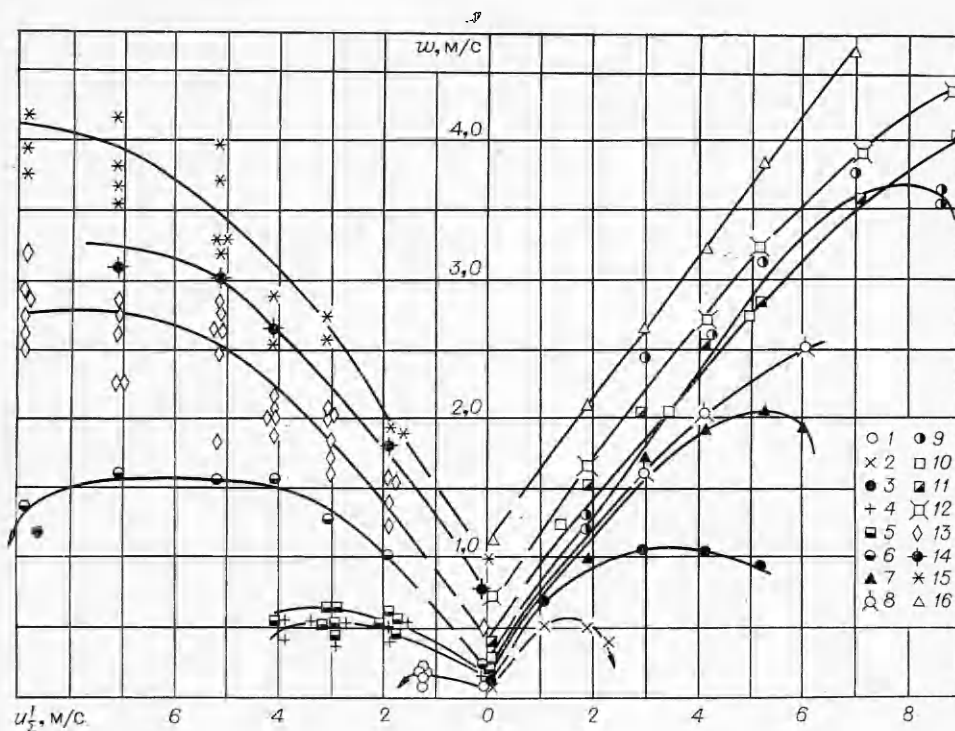


Рис. 3. Зависимость турбулентных скоростей выгорания смесей водорода от пульсационной скорости (обозначения см. в табл. 1).

В свете влияния критерия L на турбулентные скорости горения углеводородов исследованы скорости выгорания этано-воздушных смесей, поскольку по молекулярным свойствам этан занимает промежуточное положение между метаном и пропаном. Напомним значения коэффициентов диффузии: метан — воздух $D_{12} = 0,196 \text{ см}^2/\text{с}$, этан — воздух $0,148$, пропан — воздух $0,11$, азот — кислород $0,18$. Таким образом, можно ожидать, что при турбулентном горении максимум будет смещен в богатые смеси, но он меньше, чем в смесях пропана. Приведенные на рис. 2 данные полностью подтверждают сделанное предположение.

Особый интерес представляет горение тройных смесей водорода, поскольку можно сопоставлять смеси при неизменных температурах горения, нормальных скоростях (при известных L). Из данных работы [5] известно, что при равных температурах горения бедные смеси горят с более высокими турбулентными скоростями, чем стехиометрические, разбавленные до той же температуры азотом. Характер изменения турбулентных скоростей выгорания при значительном расширении диапазона изменения составов тройных смесей $2\text{H}_2 + m \cdot \text{O}_2 + n \cdot \text{N}_2$ также подтверждает, что бедные смеси имеют более высокие w (см. рис. 3 и табл. 1).

Рассмотрим случаи с неизменной концентрацией водорода при неизменной температуре горения, что практически соответствует неизменной суммарной концентрации кислорода и азота, т. е. $m + n = \text{const}$. Изменение турбулентной скорости выгорания для таких смесей приведено на рис. 4 и в табл. 2. Видно, что обеднение смеси за счет частичной замены азота на кислород приводит к росту w . При постоянной интенсивности турбулентности скорость выгорания растет сначала резко, но при $m > 2$ замедляется. Обеднение смеси сопровождается некоторым увеличением нормальной скорости u_n .

Сопоставим изменение турбулентных скоростей выгорания при одинаковых нормальных скоростях. Например, смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 16 \cdot \text{N}_2$ имеет нормальную скорость $0,07 \text{ м/с}$ при температуре горения 1120 К . Смесь

Таблица 1

Обозначения на рис. 3	Смесь	u_n , м/с	T_r , К
1	$2H_2 + O_2 + 16 \cdot N_2$	0,07	1120
2	$2H_2 + 6,6 \cdot O_2 + 24,8N_2$	0,07	800
3	$2H_2 + 5,6 \cdot O_2 + 21 \cdot N_2$	0,09	860
4	$2H_2 + O_2 + 14 \cdot N_2$	0,13	1220
5	$2H_2 + O_2 + 13,5N_2$	0,14	1250
6	$2H_2 + O_2 + 12 \cdot N_2$	0,26	1350
7	$2H_2 + 4,5 \cdot O_2 + 16,9 \cdot N_2$	0,16	970
8	$2H_2 + 4,2 \cdot O_2 + 15,8 \cdot N_2$	0,17	1050
9	$2H_2 + 4 \cdot O_2 + 15 \cdot N_2$	0,17	1060
10	$2H_2 + 3,8 \cdot O_2 + 14,3 \cdot N_2$	0,20	1100
11	$2H_2 + 2,7 \cdot O_2 + 10,1 \cdot N_2$	0,40	1350
12	$2H_2 + 2 \cdot O_2 + 7,52 \cdot N_2$	0,75	1630
13	$2H_2 + O_2 + 9 \cdot N_2$	0,45—0,5	1600
14	$2H_2 + O_2 + 7 \cdot N_2$	0,77—0,8	1820
15	$2H_2 + O_2 + 6 \cdot N_2$	1,00	1970
16	$2H_2 + 1,4 \cdot O_2 + 5,26 \cdot N_2$	1,15	2200

$2H_2 + 6 \cdot O_2 + 16 \cdot N_2$ имеет $u_n = 0,07$ м/с, но при $T_r = 970$ К. Температура снизилась за счет добавления пяти молекул кислорода. Тем не менее w бедной смеси почти на порядок выше, чем w стехиометрической смеси при более высокой температуре горения. Смеси состава $2H_2 + m \cdot O_2 + n \cdot N_2$ при $m + n = \text{const}$ удобны для сопоставления еще и тем, что при неизменной интенсивности турбулентности должны быть одинаковыми и такие характеристики турбулентности, как диссипативные масштабы. Поэтому сопоставление турбулентных скоростей выгорания для таких смесей вполне корректно.

Таблица 2

Обозначения на рис. 4	Смесь	u_n , м/с	T_r , К
1	$2H_2 + O_2 + 16 \cdot N_2$	0,07	1120
2	$2H_2 + 1,1 \cdot O_2 + 15 \cdot N_2$	0,12	1160
3	$2H_2 + 1,2 \cdot O_2 + 15,5 \cdot N_2$	0,12	1150
4	$2H_2 + 1,2 \cdot O_2 + 15 \cdot N_2$	0,13—0,14	1155
5	$2H_2 + 1,5 \cdot O_2 + 15,5 \cdot N_2$	0,13—0,14	1130
6	$2H_2 + 1,5 \cdot O_2 + 15 \cdot N_2$	0,17	1150
7	$2H_2 + 2 \cdot O_2 + 14,6 \cdot N_2$	0,23	1150
8	$2H_2 + 4 \cdot O_2 + 12,6 \cdot N_2$	0,23	1150
9	$2H_2 + 4 \cdot O_2 + 15 \cdot N_2$	0,15	1050
10	$2H_2 + 4 \cdot O_2 + 15,7 \cdot N_2$	0,10	1020
11	$2H_2 + 12 \cdot O_2 + 4,5 \cdot N_2$	0,27	1150
12	$2H_2 + 6 \cdot O_2 + 16 \cdot N_2$	0,07	970

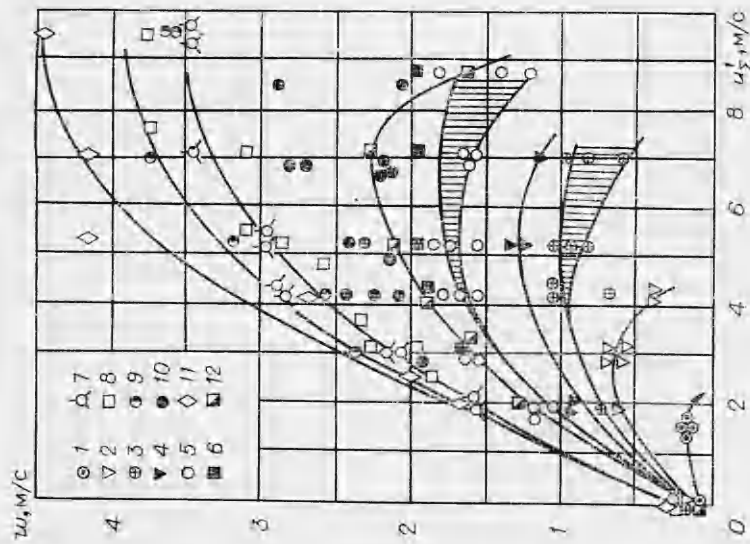


Рис. 4. Зависимость турбулентных скоростей выгорания водородокислородно-аргоновых смесей от пульсационной скорости (обозначения см. в табл. 2).

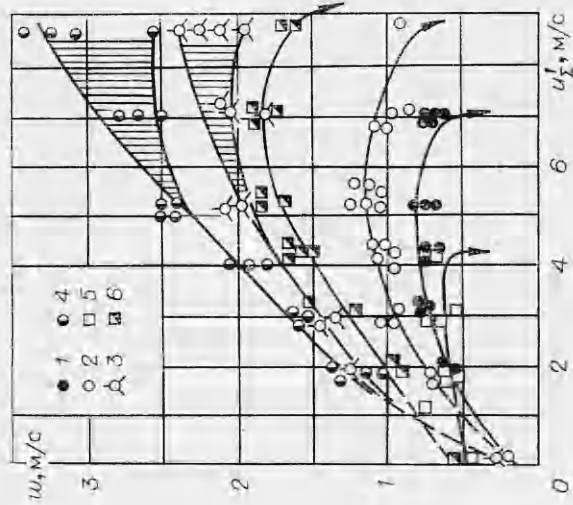


Рис. 5. Влияние аргона в гелии на скорость турбулентного выгорания смеси водорода (обозначения см. в табл. 3).

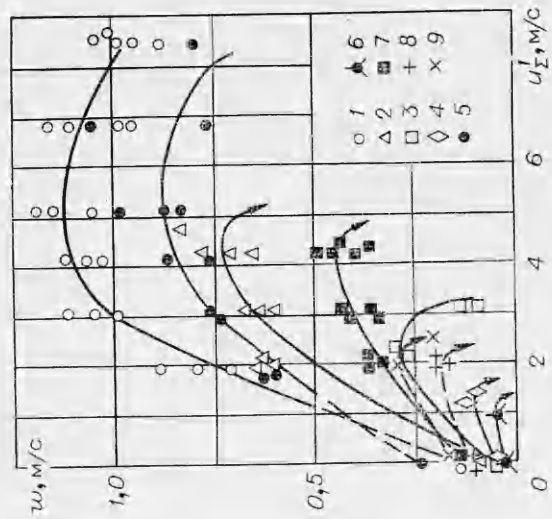


Рис. 6. Турбулентные скорости выгорания бедных смесей углеводородов (обозначения см. в табл. 4).

Таблица 3

Обозначения на рис. 5	Смесь	u_H , м/с	T_r , К
1	$2H_2 + O_2 + 17,7 \cdot Ar$	0,20	1470
2	$2H_2 + O_2 + 17 \cdot Ar$	0,21	1500
3	$2H_2 + 1,5 \cdot O_2 + 17 \cdot Ar$	0,225	1470
4	$2H_2 + 2 \cdot O_2 + 17 \cdot Ar$	0,25	1450
5	$2H_2 + O_2 + 17 \cdot He$	0,43	1500
6	$2H_2 + O_2 + O_2 + 17 \cdot He$	0,51	1450

Поскольку для смесей $2H_2 + m \cdot O_2 + n \cdot N_2$ при $m + n = \text{const}$ неизменным остается и критерий L , увеличение турбулентной скорости выгорания при росте концентрации кислорода можно связать с локальным обогащением зоны реакции недостающим легким компонентом — водородом при снижении локальной концентрации инертного газа, что должно приводить к увеличению локальной скорости реакции. Как следует из эксперимента, эффект усиливается при увеличении интенсивности турбулентности, т. е. при уменьшении диссипативных масштабов.

Аналогичные результаты получены и при исследовании турбулентного горения водородно-кислородных смесей, разбавленных аргоном и гелием. Как видно из рис. 5 (табл. 3), увеличение концентрации кислорода приводит к росту турбулентной скорости выгорания, даже несмотря на некоторое падение температуры горения. В этих опытах еще раз продемонстрировано снижение w при увеличении температуропроводности смеси за счет замены аргона на гелий, несмотря на рост нормальной скорости при этом в 2 раза.

Рассмотрим влияние изменения отношения концентрации кислорода и азота на турбулентные скорости выгорания углеводородов (рис. 6, табл. 4). Качественно результаты такие же, как и при горении водорода: увеличение концентрации кислорода при сохранении неизменной суммарной концентрации кислорода и азота приводит к росту скорости выгорания (температура горения остается неизменной, нормальная скорость при этом растет). При равных величинах нормальных скоростей скорость выгорания выше у смеси с большей концентрацией кислорода несмотря на более низкую температуру горения.

Таблица 4

Обозначения на рис. 6	Смесь	u_H , м/с	T_r , К
1	$CH_4 + 4 \cdot O_2 + 10 \cdot N_2$	0,165	1780
2	$CH_4 + 3 \cdot O_2 + 11,3 \cdot N_2$	0,12	1780
3	$CH_4 + 4 \cdot O_2 + 13 \cdot N_2$	0,073	1500
4	$CH_4 + 2 \cdot O_2 + 12 \cdot N_2$	0,07	1780
5	$C_3H_8 + 5 \cdot 1,35 \cdot (O_2 + 3,76N_2)$	0,24	1930
6	$C_3H_8 + 5 \cdot 2,8 \cdot (O_2 + 1,68 \cdot N_2)$	0,05	1770
7	$C_3H_8 + 5 \cdot 1,4 \cdot (O_2 + 3,76 \cdot N_2)$	0,16	1900
8	$C_3H_8 + 18 \cdot O_2 + 19 \cdot N_2$	0,135	1780
9	$C_3H_8 + 10,1 \cdot O_2 + 26,9 \cdot N_2$	0,18	1780

Поскольку сопоставляются бедные смеси метана и пропана (по понятным причинам аналогичные опыты в богатых смесях лишены смысла), значительное превышение турбулентных скоростей выгорания смесей метана как при равных температурах горения, так и при равных (или близких) нормальных скоростях является дополнительным подтверждением влияния критерия L .

Настоящая работа, проведенная с целью исследования влияния молекулярных свойств смеси на турбулентное горение, показала, что в условиях развитой турбулентности с большими скоростями горят смеси, для которых $D/\kappa > 1$. Объяснение диффузионно-тепловых явлений при $D \neq \kappa$ было дано в [6]. Отметим, что ламинарные пламена исследованных смесей при $D/\kappa > 1$ всегда имели характерную «ячеистую» структуру, усиливающуюся по мере распространения пламени. К сожалению, в настоящее время трудно четко представить детали такого влияния на турбулентное горение, экспериментальная проверка которого и была осуществлена проведенными опытами.

Авторы искренне благодарны Л. Н. Стесику и его сотрудникам за расчеты температур горения.

Поступила в редакцию
1/XII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Карпов, Е. С. Северин. Докл. АН СССР, 1978, 239, 1, 123.
2. В. П. Карпов, А. С. Соколик. Докл. АН СССР, 1961, 141, 2, 393.
3. В. П. Карпов, Е. С. Северин. ФГВ, 1978, 14, 2, 33.
4. В. П. Карпов, А. С. Соколик. Докл. АН СССР, 1961, 138, 4, 874.
5. А. С. Соколик, В. П. Карпов, Е. С. Семенов. ФГВ, 1967, 3, 1, 61.
6. Я. Б. Зельдович. Теория горения и детонации газов. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1944.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПУТНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФФУЗИОННОГО ФАКЕЛА

А. Б. Лебедев

(Москва)

В последние годы большое развитие получили исследования, посвященные турбулентным течениям при наличии горения. Среди различных расчетно-теоретических работ по турбулентному горению наибольшее распространение получили подходы, разработанные в [1—3] и связанные с использованием для описания характеристик турбулентности полуэмпирических дифференциальных уравнений. Применительно к диффузионному горению эти подходы нашли дальнейшее развитие в работах [4, 5]. В имеющихся расчетно-теоретических работах по исследованию течений с горением обычно указывается на необходимость специального подбора постоянных в модельных уравнениях при расчете каждого конкретного типа течения. Кроме того, как правило, возникают затруднения при задании начальных условий при расчете спутных турбулентных течений. Указанные особенности вызывают определенные трудности при исследовании турбулентных спутных течений при наличии диффузионного горения.

В данной работе предпринята попытка исследования течения в спутном факеле с использованием подхода, разработанного для затопленных струй и факелов [6].

1. Рассмотрим истечение с дозвуковой скоростью ($M \ll 1$) струи топлива (водород) из осесимметричного сопла в спутный поток окислителя (воздух). Будем считать, что справедливы допущения, принятые при анализе диффузионного горения — между топливом и окислителем происхо-