

УДК 544.452.42

А. Г. Шмаков^{1,2}, **Г. Р. Грек**³, **В. В. Козлов**^{2,3}
Ю. А. Литвиненко^{2,3}, **О. П. Коробейничев**¹

¹ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
ул. Институтская 3, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

³ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

*shmakov@kinetics.nsc.ru, grek@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru
litur@itam.nsc.ru, korobein@kinetics.nsc.ru*

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ КРУГЛОЙ МИКРОСТРУИ СМЕСЕЙ ВОДОРОДА С МЕТАНОМ, ГЕЛИЕМ И АЗОТОМ *

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода с метаном, гелием и азотом. Установлено, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с метаном, гелием или азотом связаны с образованием области «перетяжки» пламени, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Обнаружено, что процесс диффузионного горения смеси водород/метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в область перетяжки пламени, срыва пламени при сохранении горения в область перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода. Установлено, что вышеперечисленные стадии горения смеси водород/метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи (200÷500 м/с), чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода (600÷800 м/с). Показано, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

Ключевые слова: круглая микроструя, диффузионное горение смеси газов, область перетяжки пламени, теневой метод исследования, теневые картины горения.

Введение

В работах [1–5] представлены результаты экспериментальных исследований режимов горения и структуры диффузионного пламени водорода, образующегося при истечении с высокой скоростью водорода в

воздух через круглые отверстия различных диаметров. Найден диапазон скоростей истечения водородной струи и диаметров сопловых отверстий, в котором пламя разделяется на две зоны – ламинарную и турбулентную. Зона с ламинарным течением является стабилизатором горения всего

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10330).

пламени в целом, а в зоне с турбулентным течением происходит интенсивное смешение основной части горючего с окислителем с последующим горением. Горение в этих двух зонах может происходить независимо друг от друга, но наиболее устойчивый режим наблюдается только при существовании пламени в зоне с ламинарным течением.

Исследованная система может представлять интерес с точки зрения организации эффективного перемешивания различных потоков и их подогрева. В таком режиме сгорает только небольшая часть водорода, а остальная смешивается с продуктами горения и воздухом, в результате чего температура такой смеси может варьироваться (путем подбора скорости потока и диаметра сопла) от близкой к начальной до температуры самовоспламенения водорода. Кроме того, такая система может служить своеобразным «реактором» для осуществления, например, в мягких и контролируемых условиях различных термолитических реакций, таких как синтез наночастиц металлов и оксидов металлов из летучих металлосодержащих прекурсоров, обработка углеводородного сырья и др. Кроме того, такие системы могут быть использованы для организации эффективного смешения топлива с воздухом и подогрева смеси в прямоточных реактивных двигателях.

В связи с этим важно изучить влияние газообразных добавок в поток водорода с различными химическими (инертные и реагирующие) и физическими (с разным молекулярными весами, теплопроводностью и диффузией) на режимы горения микроструй смесей водорода с другими газами при их истечении из круглых сопел в воздух. Ранее подобные исследования процессов горения высокоскоростных микроструй водородных смесей в воздухе не проводились.

Методика проведения экспериментов

Для изучения процесса горения смеси газов в круглой микроструе использовался метод записи на цифровую видеокамеру. Процесс горения фиксировался как в виде непосредственного изображения пламени,

так и в виде его теневой картины с использованием методики Тёплера (Шлирен-метод). На рис. 1 показана схема эксперимента.

Расход каждого из газов устанавливался с помощью регуляторов массового расхода газов (MKS Instruments, Inc., USA) с точностью $\pm 0,1 \text{ см}^3/\text{с}$.

Диффузионное горение микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4)

Диффузионное горение микроструи чистого водорода (H_2) и чистого метана (CH_4)

На рис. 2 показаны теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода (H_2) в зависимости от скорости истечения струи и картины диффузионного горения круглой микроструи метана (CH_4) в зависимости от скорости струи. Видно, что развитие пламени в ситуации горения микроструи водорода (H_2) связано с возникновением области «перетяжки» пламени, характеристики развития которого с ростом скорости истечения струи были представлены ранее в работе [1].

Совершенно иная ситуация при диффузионном горении аналогичной микроструи, но уже метана (CH_4). Можно наблюдать неустойчивость пламени, его отрыв от среза сопла при скорости истечения струи $U_{\text{струи}} = 20 \text{ м/с}$ и срыв пламени с последующим прекращением горения при $U_{\text{струи}} = 25,5 \text{ м/с}$.

Таким образом, горение микроструи чистого метана является неустойчивым, пламя срывается, и горение прекращается в узком диапазоне изменения скорости истечения микроструи.

Диффузионное горение микроструи смеси водорода (H_2) и метана (CH_4)

Экспериментальные исследования горения смеси горючих газов (водород/метан) проведены с использованием теневой методики, позволяющей более детально рассмотреть структуру и характеристики развития пламени. Это достигалось за счет четкого выделения, с помощью данной методики, особенностей изменений градиен-

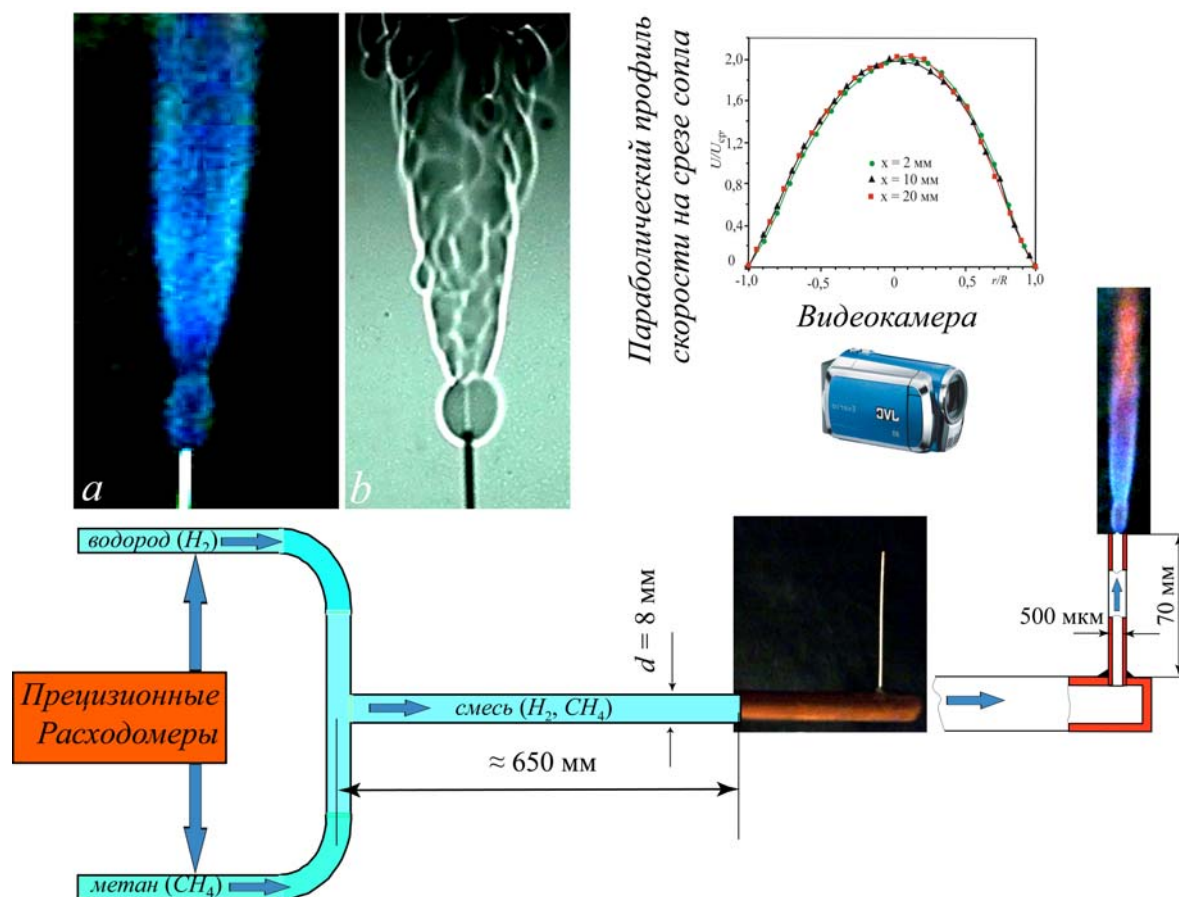


Рис. 1. Схема эксперимента и картины пламени при горении водорода: *a* – непосредственная съемка; *b* – теневая картина диффузионного горения круглой микроструи водорода

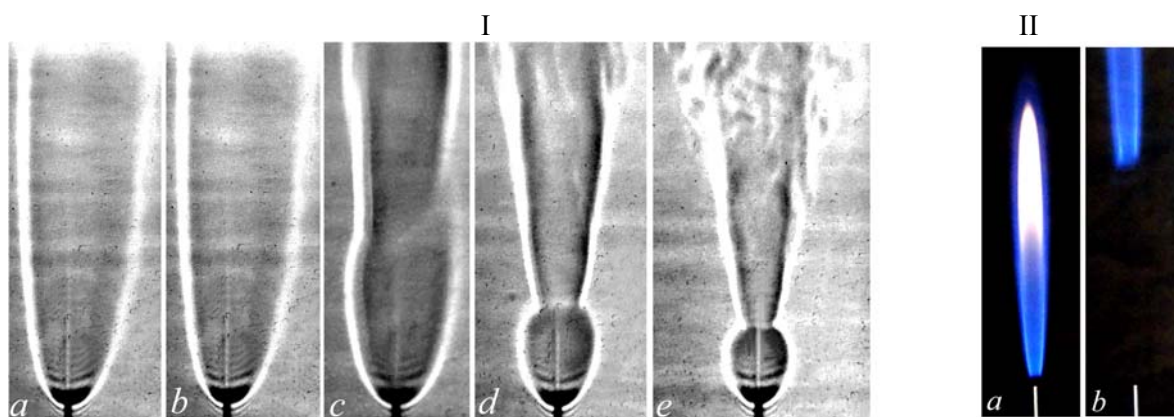


Рис. 2. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода (H_2) в зависимости от скорости струи $U_{\text{струи}}$, м/с (*a*–*e*: 102, 204, 306, 408, 510 соответственно) – *I*, и картины диффузионного горения круглой микроструи метана (CH_4) в зависимости от скорости струи $U_{\text{струи}}$, м/с (*a* – 20 м/с, $M = 2,9$ мг/с, $M = 3,6$ мг/с), диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм – *II*

тов плотности горячей смеси газов истекающей микроструи. Исследована структура и характеристики развития пламени при го-

рении чистого водорода и его смеси с метаном в условиях различного соотношения их расходов, но в пределах одного диапазона

общего расхода смеси газов и скорости истечения струи ($Q_{\text{общ.}} = 20 \text{ см}^3/\text{с}$ при $U_{\text{струи}} = 102 \text{ м/с}$, $Q_{\text{общ.}} = 40 \text{ см}^3/\text{с}$ при $U_{\text{струи}} = 204 \text{ м/с}$, $Q_{\text{общ.}} = 60 \text{ см}^3/\text{с}$ при $U_{\text{струи}} = 306 \text{ м/с}$, $Q_{\text{общ.}} = 80 \text{ см}^3/\text{с}$ при $U_{\text{струи}} = 408 \text{ м/с}$, $Q_{\text{общ.}} = 100 \text{ см}^3/\text{с}$ при $U_{\text{струи}} = 510 \text{ м/с}$). Ниже представлены результаты данных исследований.

Диффузионное горение чистого водорода и его смеси с метаном при скорости струи $U_{\text{струи}} = 102 \text{ м/с}$. Результаты исследований представлены в табл. 1 и на рис. 3. Отметим, что здесь и далее соотношение массового и объемного расхода газов обозначено символами $k = M_{\text{водород}}/M_{\text{метан, гелий, азот}}$ (мг/с / мг/с) и $K = Q_{\text{водород}}/Q_{\text{метан, гелий, азот}}$ (см³/с / см³/с) соответственно. При данном общем расходе ($Q_{\text{общ.}} = 20 \text{ см}^3/\text{с}$) и скорости истечения струи ($U_{\text{струи}} = 102 \text{ м/с}$) можно отчетливо наблюдать ламинарную струю и ламинарное

пламя во всем диапазоне массового соотношения водород/метан (k), появление области перетяжки пламени [1] наблюдается лишь при $k = 0,042$, и, наконец, прекращение горения смеси водород/метан происходит при $k = 0,03$.

Диффузионное горение чистого водорода и его смеси с метаном при скорости струи $U_{\text{струи}} = 204 \text{ м/с}$. Результаты исследований представлены в табл. 2 и на рис. 4. В данной ситуации при общем расходе ($Q_{\text{общ.}} = 40 \text{ см}^3/\text{с}$) и скорости истечения струи ($U_{\text{струи}} = 204 \text{ м/с}$) можно отчетливо наблюдать ламинарную струю и как ламинарное, так и турбулентное пламя в диапазоне массового соотношения водорода с метаном ($k = 0,87 \div 0,075$), появление области перетяжки пламени [1] наблюдается при $k = 0,87$, и она сохраняется в широком диапазоне соотно-

Таблица 1

№ п/п	$U_{\text{струи}}$, м/с	$M_{\text{водород}}$, мг/с	$M_{\text{метан}}$, мг/с	$\rho_{\text{водород}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{метан}}$, кг/м ³	K	k
a	102	1,8	0	0,08987	0,7168	–	–
b		1,34	3,6			15/5	0,37
c		0,9	7,2			10/10	0,125
d		0,45	10,75			5/15	0,042
e		0,45	10,75			5/15	0,042
f		0,36	11,5			4/16	0,03

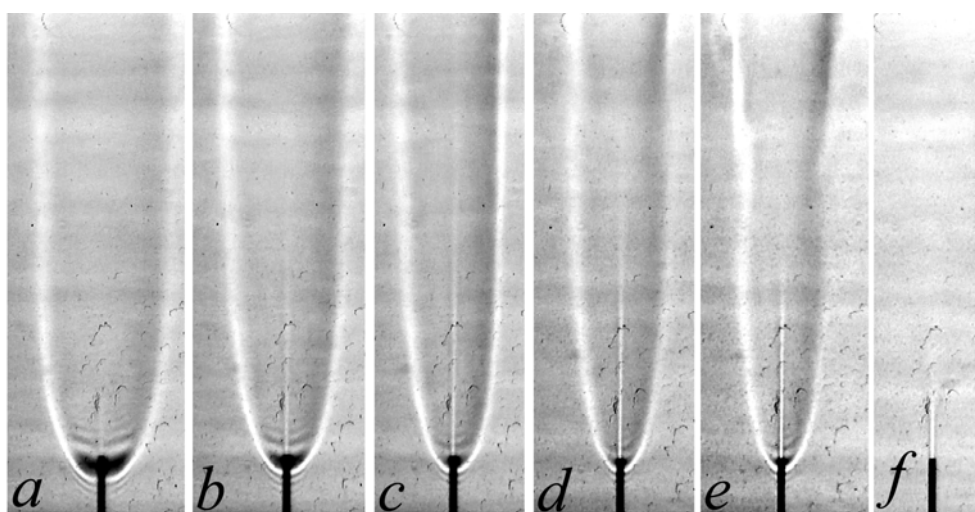


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от их массового соотношения k (a – водород (1,8 мг/с); b – 0,37; c – 0,125; d – 0,042; e – 0,042; f – 0,03) при скорости истечения струи $U_{\text{струи}} = 102 \text{ м/с}$, диаметр выходного сопла $d = 500 \text{ мкм}$

Таблица 2

№ п/п	$U_{\text{струи}}$, м/с	$M_{\text{водород}}$, мг/с	$M_{\text{метан}}$, мг/с	$\rho_{\text{водород}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{метан}}$, кг/м ³	K	k
a	204	3,6	0	0,08987	0,7168	–	–
b		3,14	3,6			35/5	0,87
c		2,7	7,17			30/10	0,38
d		2,7	7,17			30/10	0,38
e		2,25	10,75			25/15	0,21
f		2,25	10,75			25/15	0,21
g		1,8	14,3			20/20	0,126
h		1,35	17,9			15/25	0,075
i		1,35	17,9			15/25	0,075
j		1,35	17,9			15/25	0,075

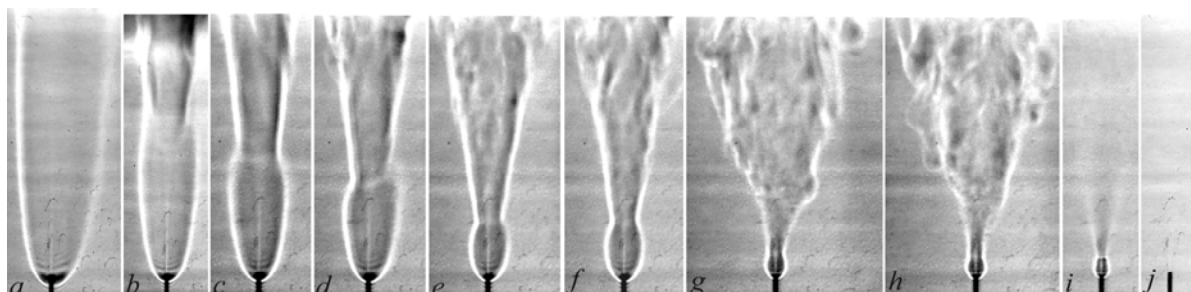


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от их массового соотношения k (a – водород (3,6 мг/с); b – 0,87; c – 0,38; d – 0,38; e – 0,21; f – 0,21; g – 0,126; h – 0,075; i – 0,075; j – 0,075) при скорости истечения струи $U_{\text{струи}} = 204$ м/с, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

шения водород/метан ($k = 0,87 \div 0,075$). Видно, что размер области перетяжки пламени с уменьшением массового соотношения водород/метан также уменьшается, как и в ситуациях, исследованных ранее в работах [1–5], но только с ростом скорости истечения микроструи. Другой важный аспект связан с отрывом турбулентного пламени от среза сопла, но с сохранением процесса горения в области перетяжки пламени ($k = 0,126 \div 0,075$). Однако, с другой стороны, можно наблюдать в очень узком диапазоне массового соотношения водорода с метаном ($k \approx 0,075$) как отрыв турбулентного пламени с горением в области перетяжки пламени (рис. 4, h), так и прекращение горения турбулентной струи с сохранением горения в области перетяжки пламени (рис. 4, i) и, наконец, общее прекращение горения микроструи смеси водород/метан (рис. 4, j).

Диффузионное горение чистого водорода и его смеси с метаном при скорости струи $U_{\text{струи}} = 306$ м/с. Результаты исследований представлены в табл. 3 и на рис. 5. В данной ситуации при общем расходе ($Q_{\text{общ.}} = 60$ см³/с) и скорости истечения струи ($U_{\text{струи}} = 306$ м/с) можно отчетливо наблюдать ламинарную струю и как ламинарное, так и турбулентное пламя в диапазоне массового соотношения водорода с метаном ($k = 1,36 \div 0,25$), появление области перетяжки пламени [1] наблюдается уже при горении микроструи чистого водорода (рис. 5, a), и она сохраняется далее в широком диапазоне соотношения водород/метан ($k = 1,36 \div 0,25$). Видно, что размер области перетяжки пламени с уменьшением массового соотношения водород/метан также уменьшается, как и в ситуациях исследованных ранее, но только с ростом скорости истечения микро-

струи. Другой важный аспект связан с отрывом турбулентного пламени от среза сопла, но с сохранением процесса горения в области перетяжки пламени ($k = 0,25$). С другой стороны, можно наблюдать прекращение горения турбулентной струи с сохранением горения в области перетяжки пламени (рис. 5, g) и, наконец, общее прекращение горения микроструи смеси водород/метан (рис. 5, h).

Диффузионное горение чистого водорода и его смеси с метаном при скорости струи $U_{\text{струи}} = 408$ м/с. Результаты исследований представлены в табл. 4 и на рис. 6. В данной ситуации при общем расходе ($Q_{\text{общ.}} = 80$ см³/с) и скорости истечения струи ($U_{\text{струи}} = 408$ м/с) можно отчетливо наблюдать ламинарную струю и как ламинарное, так и турбулентное пламя в диапазоне массового соотношения водорода с метаном ($k = 1,87 \div 0,38$), появление области перетяжки пламени [1] наблюдается уже при горении микроструи чистого водорода (рис. 6, a), и она сохраняется далее в широком диапазоне соотношения водород/метан ($k = 1,87 \div$

0,27). Видно, что размер области перетяжки пламени с уменьшением массового соотношения водород/метан также уменьшается, как и в ситуациях исследованных ранее, но только с ростом скорости истечения микроструи. Другой важный аспект связан с отрывом турбулентного пламени от среза сопла, но с сохранением процесса горения в области перетяжки пламени ($k = 0,38$). С другой стороны, можно наблюдать прекращение горения турбулентной струи с сохранением горения в области перетяжки пламени (рис. 6, f, g) и, наконец, общее прекращение горения микроструи смеси водород/метан (рис. 6, h).

Диффузионное горение чистого водорода и его смеси с метаном при скорости струи $U_{\text{струи}} = 510$ м/с. Результаты исследований представлены в табл. 5 и на рис. 7. В данной ситуации при общем расходе ($Q_{\text{общ.}} = 100$ см³/с) и скорости истечения струи ($U_{\text{струи}} = 510$ м/с) можно отчетливо наблюдать ламинарную струю и как ламинарное, так и турбулентное пламя в диапазоне массового соотношения водорода с метаном

Таблица 3

№ п/п	$U_{\text{струи}}$, м/с	$M_{\text{водород}}$, мг/с	$M_{\text{метан}}$, мг/с	$\rho_{\text{водород}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{метан}}$, кг/м ³	K	k
a	306	5,4	0	0,08987	0,7168	–	–
b		4,9	3,6			55/5	1,36
c		4,5	7,2			50/10	0,625
d		4,0	10,75			45/15	0,37
e		3,6	14,3			40/20	0,25
f		3,6	14,3			40/20	0,25
g		3,14	18,0			35/25	0,17
h		2,7	21,5			30/30	0,125

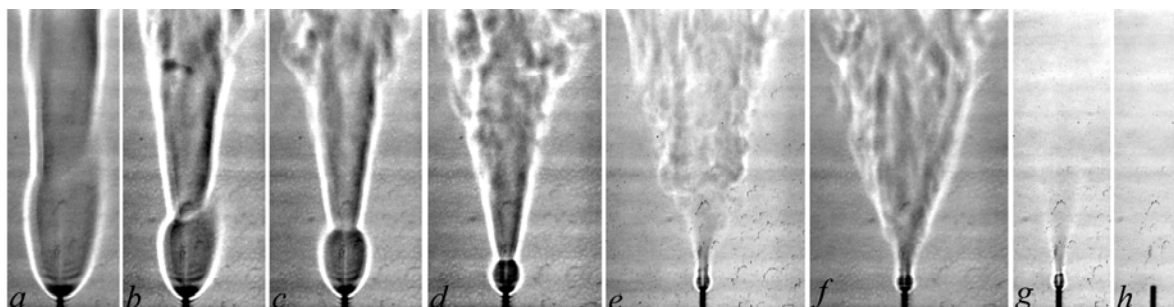


Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от их массового соотношения k (a – водород (5,4 мг/с); b – 1,36; c – 0,625; d – 0,37; e – 0,25; f – 0,25; g – 0,17; h – 0,125) при скорости истечения струи $U_{\text{струи}} = 306$ м/с, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

Таблица 4

№ п/п	$U_{\text{струи, м/с}}$	$M_{\text{водород, мг/с}}$	$M_{\text{метан, мг/с}}$	$\rho_{\text{водород, кг/м}^3}$	$\rho_{\text{метан, кг/м}^3}$	K	k
a	408	7,2	0	0,08987	0,7168	–	–
b		6,74	3,6			75/5	1,87
c		6,3	7,2			70/10	0,87
d		5,8	10,75			65/15	0,54
e		5,4	14,3			60/20	0,38
f		5,4	14,3			60/20	0,38
g		4,9	17,9			55/25	0,27
h		4,9	17,9			55/25	0,27

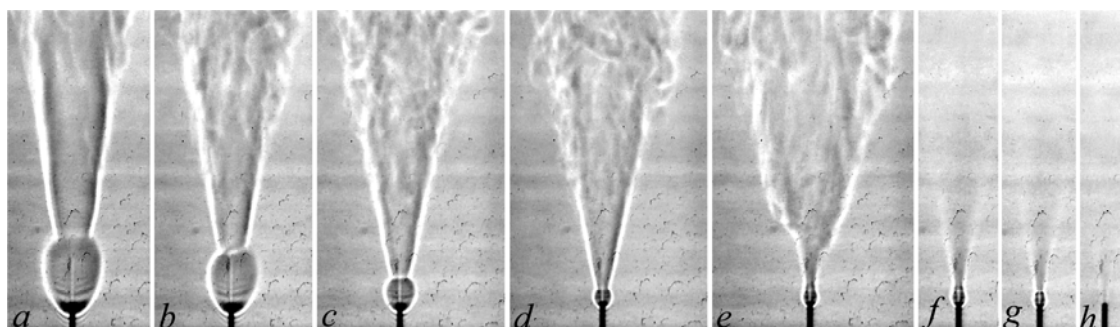


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от их массового соотношения $k = \text{водород (мг)}/\text{метан (мг)}$ (a – водород (7,2 мг/с); b – 1,87; c – 0,87; d – 0,54; e – 0,38; f – 0,38; g – 0,27; h – 0,27) при скорости истечения струи $U_{\text{струи}} = 408$ м/с, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

Таблица 5

№ п/п	$U_{\text{струи, м/с}}$	$M_{\text{водород, мг/с}}$	$M_{\text{метан, мг/с}}$	$\rho_{\text{водород, кг/м}^3}$	$\rho_{\text{метан, кг/м}^3}$	K	k
a	510	9	0	0,08987	0,7168	–	–
b		8,5	3,6			95/5	2,36
c		8	7,2			90/10	1,11
d		7,63	10,75			85/15	0,71
e		7,2	14,3			80/20	0,5
f		7	15,8			78/22	0,44

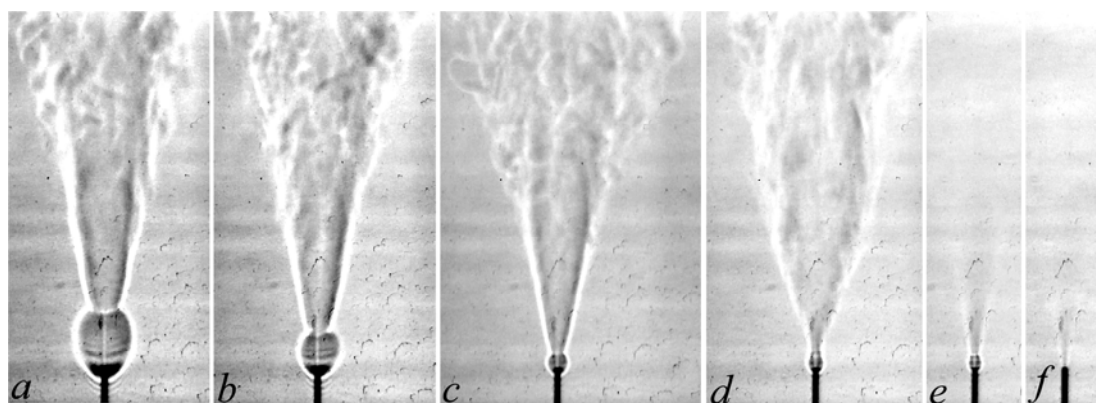


Рис. 7. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от их массового соотношения k (a – водород (9 мг/с); b – 2,36; c – 1,11; d – 0,71; e – 0,5; f – 0,44) при скорости истечения струи $U_{\text{струи}} = 510$ м/с, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

($k = 2,36 \div 0,71$), появление области перетяжки пламени [1] наблюдается уже при горении микроструи чистого водорода (рис. 7, а), и она сохраняется далее в широком диапазоне соотношения водород/метан ($k = 2,36 \div 0,5$). Видно, что размер области перетяжки пламени с уменьшением массового соотношения водород/метан также уменьшается, как и в ситуациях исследованных ранее, но только с ростом скорости истечения микроструи. Другой важный аспект связан с отрывом турбулентного пламени от среза сопла, но с сохранением процесса горения в области перетяжки пламени ($k = 0,5$). С другой стороны, можно наблюдать прекращение горения турбулентной струи с сохранением горения в области перетяжки пламени (рис. 7, е) и, наконец, общее прекращение горения микроструи смеси водород/метан (рис. 7, ф).

Таким образом, эксперименты показали, что диффузионное горение микроструи смеси водород/метан сопровождается появлением области перетяжки пламени, как и в случае горения чисто водородной микроструи [1–5]. С другой стороны, продемонстрировано, что с ростом доли метана при диффузионном горении микроструи смеси водород/метан и с ростом скорости истечения микроструи размер области перетяжки пламени уменьшается, как и в случае горения чисто водородной микроструи. В целом, механизм и характеристики развития пламени при диффузионном горении микроструи как чистого водорода, так и его смеси с метаном сохраняются в обеих ситуациях.

Следует отметить, что при диффузионном горении микроструи водорода с ростом скорости ее истечения можно наблюдать процесс поэтапного прекращения горения. Этот процесс состоит из нескольких стадий: 1) отрыв турбулентного пламени от среза сопла при сохранении горения в области перетяжки пламени; 2) прекращение горения турбулентной струи при сохранении горения в области перетяжки пламени; 3) прекращение горения микроструи водорода. С другой стороны, горение микроструи смеси водород/метан также сопровождается поэтапным прекращением горения, связанным не только с ростом скорости истечения микроструи, но и с объемным K (или массовым k) соотношением смеси водород/метан (табл. 6 и рис. 8).

Видно, что при диффузионном горении смеси микроструи водород/метан с ростом скорости истечения струи наблюдается и рост доли водорода (как массовой, так и объемной) при горении его смеси с метаном. Причем смена этапов прекращения горения микроструи в пределах одной скорости ее истечения также связана с ростом доли водорода в смеси. Зависимость изменения размера области перетяжки пламени при горении микроструи смеси водород/метан от их объемного соотношения и скорости истечения струи показана на рис. 9.

Видно, что геометрический размер области перетяжки пламени при горении микроструи смеси водород/метан уменьшается как с ростом скорости истечения струи, так и с уменьшением объемной доли водорода в смеси при одинаковой скорости истечения струи.

В целом, диффузионное горение смеси горючих газов водорода и метана указывает на то, что механизм и характеристики процесса их развития и горения в микроструе практически совпадает с диффузионным горением чистого водорода в микроструе. Однако неустойчивость диффузионного горения микроструи чистого метана (см. рис. 2) оказывает существенное влияние на характеристики горения смеси водород/метан, ускоряя процессы отрыва и срыва пламени и, наконец, прекращения горения микроструи.

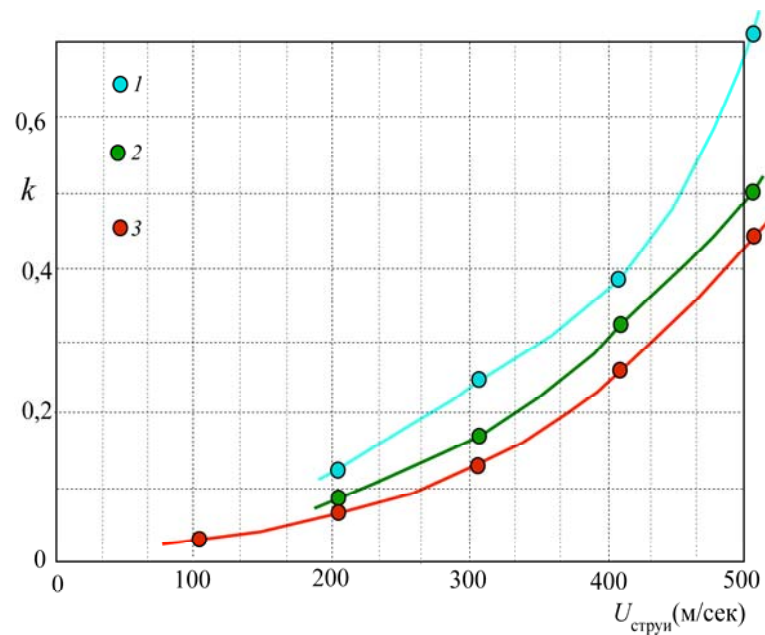
Таблица 7 и фотографии (рис. 10) процесса диффузионного горения как чистого водорода, так и его смеси с метаном, представленные ниже, показывают, что наличие области перетяжки пламени наблюдается в ситуации горения и чистого водорода, и его смеси с метаном.

$$S_{\text{сопла}} = \pi d^2 / 4 = 3,14 \times 0,05 \times 0,05 / 4 = 0,00196 \text{ см}^2,$$

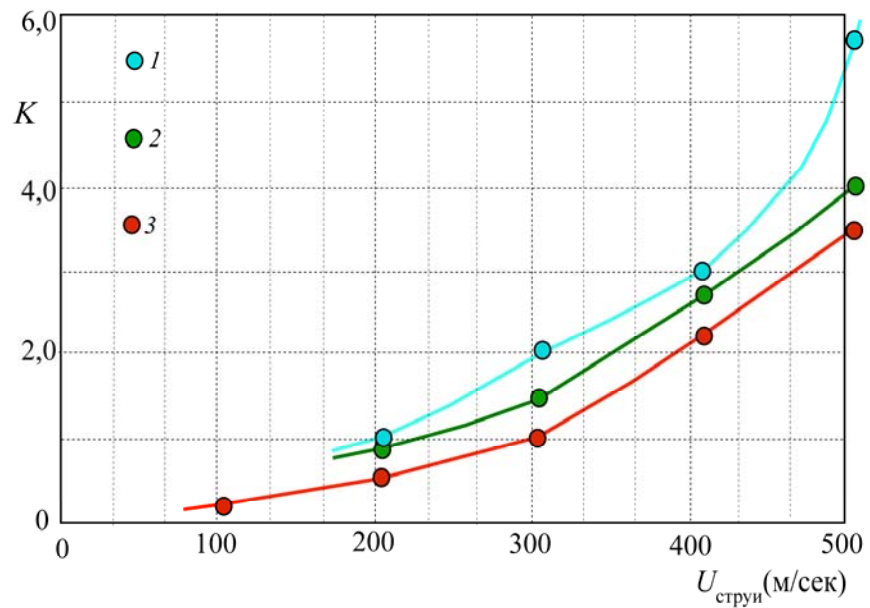
$$U_{\text{струи}} = Q / S_{\text{сопла}},$$

$$\rho_{\text{водород}} = 0,08987 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{метан}} = 0,7168 \text{ кг/м}^3$$

$$k_{(\text{метан/водород})} = \text{метан тяжелее в 8 раз}$$



а



б

Рис. 8. Графики зависимости коэффициентов (а) массового соотношения смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) k и (б) объемного соотношения смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) K от скорости струи ($U_{\text{струи}}$) при диффузионном горении круглой микроструи: 1 – отрыв турбулентного пламени от среза сопла при сохранении горения в области перетяжки пламени; 2 – прекращение горения турбулентной струи при сохранении горения в области перетяжки пламени; 3 – прекращение горения микроструи водорода, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

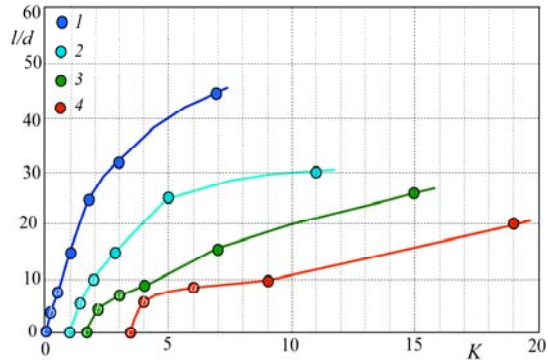


Рис. 9. График зависимости размера области перетяжки пламени l/d от объемного соотношения смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) K при диффузионном горении круглой микроструи и различной скорости ее истечения (1 – 204 м/с, 2 – 306 м/с, 3 – 408 м/с, 4 – 510 м/с). Ситуации последних стадий горения микроструи: *a* – отрыв турбулентного пламени от среза сопла при сохранении горения в области перетяжки пламени; *b* – прекращение горения турбулентной струи при сохранении горения в области перетяжки пламени; *c* – прекращение горения микроструи, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

Рассмотрим детально область перетяжки пламени при диффузионном горении смеси водород/метан в круглой микроструе при различной скорости истечения струи и различном их массовом соотношении k (рис. 11–13)

Как видно из рис. 11, *I–IV*, область перетяжки пламени имеет сферическую форму, внутри этой области можно наблюдать ламинарную микрострую, которая, преодолевая четко фиксируемую узкую область изменения градиента плотности смеси газов, внезапно турбулизуется [6], что можно наблюдать на рис. 4–7. Все наблюдаемые явления, в том числе и уменьшение размера области перетяжки пламени, были обнаружены ранее в работах [1–5] при диффузионном горении микроструи водорода.

Что касается новых явлений, обнаруженных при диффузионном горении смеси водород/метан, следует отметить уменьшение

Таблица 7

№ п/п	$U_{\text{струи}}$, м/с	$M_{\text{водород}}$, мг/с	$M_{\text{метан}}$, мг/с	$\rho_{\text{водород}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{метан}}$, кг/м ³	K	k
a	178	1,8	10,75	0,08987	0,7168	20/15	0,17
b	204	2,7	7,2			30/10	0,375
c	280	4,0	7,2			45/10	0,55
d	306	4,0	10,75			45/15	0,37
e	408	7,2	0			–	–
f	434	7,2	3,6			80/5	2
g	459	7,2	7,2			80/10	1
h	485	7,2	10,75			80/15	0,67
i	485	8,5	0			95/0	–
j	561	8,5	10,75			95/15	0,79
k	587	8,99	10,75			100/15	0,84

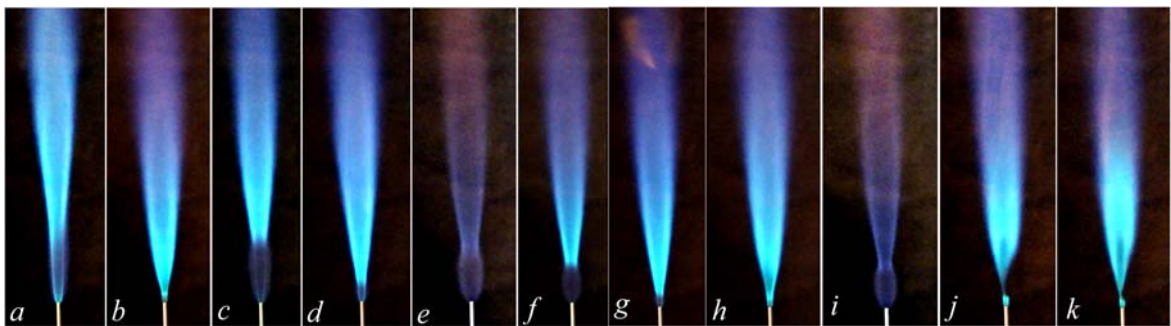


Рис. 10. Фотографии диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от их массового соотношения $k = \text{водород (мг)}/\text{метан (мг)}$ (*a* – 0,17; *b* – 0,375; *c* – 0,55; *d* – 0,37; *e* – водород; *f* – 2; *g* – 1; *h* – 0,67; *i* – водород; *j* – 0,79; *k* – 0,84) при скорости истечения струи ($U_{\text{струи}}$, м/с): (*a–k*: 178, 204, 280, 306, 408, 434, 459, 485, 485, 561, 587 соответственно), диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

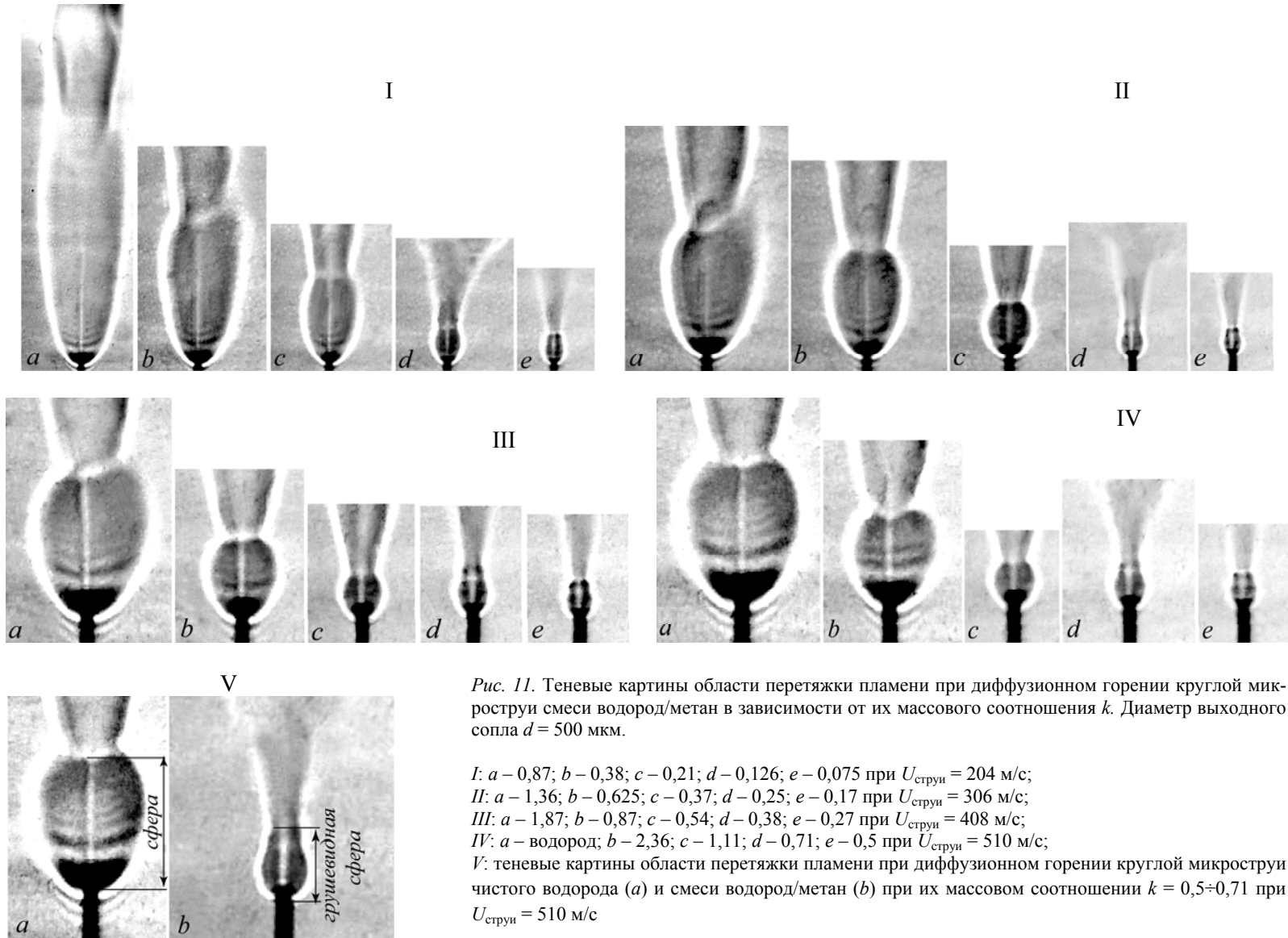


Рис. 11. Теневые картины области перетяжки пламени при диффузионном горении круглой микроструи смеси водород/метан в зависимости от их массового соотношения k . Диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм.

I: $a - 0,87$; $b - 0,38$; $c - 0,21$; $d - 0,126$; $e - 0,075$ при $U_{\text{струи}} = 204$ м/с;

II: $a - 1,36$; $b - 0,625$; $c - 0,37$; $d - 0,25$; $e - 0,17$ при $U_{\text{струи}} = 306$ м/с;

III: $a - 1,87$; $b - 0,87$; $c - 0,54$; $d - 0,38$; $e - 0,27$ при $U_{\text{струи}} = 408$ м/с;

IV: $a -$ водород; $b - 2,36$; $c - 1,11$; $d - 0,71$; $e - 0,5$ при $U_{\text{струи}} = 510$ м/с;

V: теневые картины области перетяжки пламени при диффузионном горении круглой микроструи чистого водорода (a) и смеси водород/метан (b) при их массовом соотношении $k = 0,5 \div 0,71$ при $U_{\text{струи}} = 510$ м/с

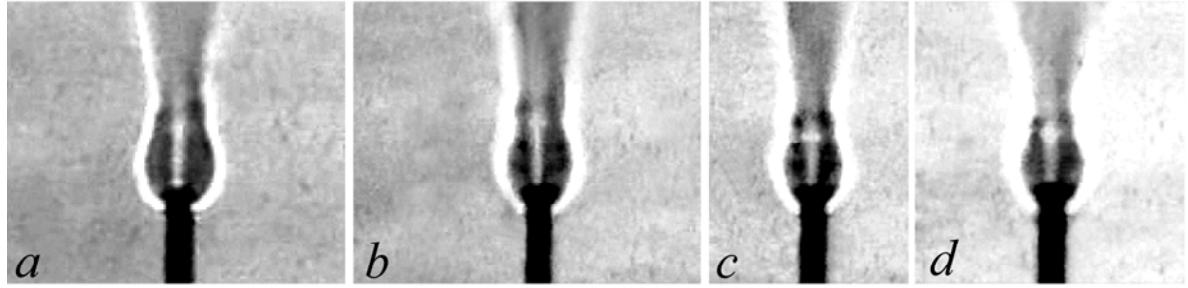


Рис. 12. Теневые картины области перетяжки пламени при диффузионном горении круглой микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) в зависимости от диапазона их массового соотношения k : $a - 0,075 \div 0,126$ при $U_{\text{струи}} = 204$ м/с; $b - 0,17 \div 0,25$ при $U_{\text{струи}} = 306$ м/с; $c - 0,27 \div 0,38$ при $U_{\text{струи}} = 408$ м/с; $d - 0,5 \div 0,71$ при $U_{\text{струи}} = 510$ м/с, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

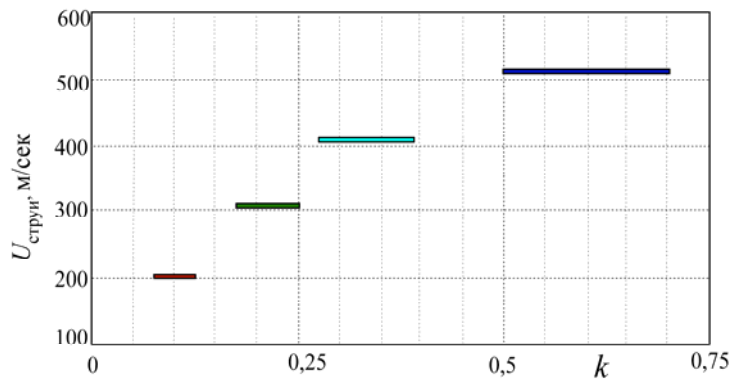


Рис. 13. Диаграмма зависимости наличия грушеобразной формы области перетяжки пламени от скорости микроструи ($U_{\text{струи}}$) и диапазона массового соотношения смеси водород/метан (k) при диффузионном горении круглой микроструи, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

размера области перетяжки пламени с уменьшением доли водорода в смеси водород/метан (см. рис. 11, I–IV) и изменение формы области перетяжки пламени со сферической на грушевидную на стадиях горения смеси с наименьшей долей водорода в ней (см. рис. 11, V). Данный феномен требует дальнейших исследований.

Из рис. 13 видно, что с ростом скорости истечения микроструи расширяется диапазон изменений доли водорода в смеси газов, при котором пламя имеет грушеобразную форму.

Диффузионное горение микроструи смеси водорода (H_2) с гелием (He)

Экспериментальные исследования горения смеси горючего газа водорода (H_2) с нейтральным (негорючим) газом гелием (He) проведены с использованием теневой методики, позволяющей более детально рассмотреть структуру и характеристики развития пламени. Это достигалось за счет четкого выделения, с помощью данной ме-

тодики, особенностей изменений градиентов плотности горячей смеси газов в истекающей микроструе. Исследована структура и характеристики развития пламени при горении чистого водорода и его смеси с гелием в условиях различного соотношения их расходов и скорости истечения микроструи. Однако один критерий был соблюден, а именно одна и та же доля водорода в смеси ($Q_{\text{водород}} = 50$ см³/с (4,5 мг/с)) при различной доли гелия в смеси ($Q_{\text{гелий}} = 15 \div 50$ см³/с (2,7 ÷ 8,9 мг/с)). Ниже представлены результаты данных исследований.

Диффузионное горение круглой микроструи смеси водорода (H_2) с гелием (He)

Результаты исследований представлены в табл. 8. При данном диапазоне массового соотношения водород/гелий k и диапазоне скорости истечения микроструи можно отчетливо наблюдать наличие области перетяжки пламени, ламинарную струю и ламинарное пламя в области перетяжки пламени, узкую область резкого изменения градиента

Таблица 8

№ п/п	$U_{\text{струи}},$ м/с	$M_{\text{водород}},$ мг/с	$M_{\text{гелий}},$ мг/с	$\rho_{\text{водород}},$ кг/м ³	$\rho_{\text{гелий}},$ кг/м ³	K	k
a	255	4,5	0	0,08987	0,1785	–	–
b	332	4,5	2,7			50/15	1,7
c	337	4,1	3,6			46/20	1,14
d	357	4,5	3,6			50/20	1,25
e	362	4,1	4,5			46/25	0,9
f	469	4,5	7,5			50/42	0,6
g	398	4,5	5,0			50/28	0,9
h	423	3,9	7,1			43/40	0,55
i	449	5,4	5,0			60/28	1,08
j	505	4,4	8,9			49/50	0,49
k	541	6,3	6,4			70/36	0,98
l	663	11,2	0,9			125/5	12,4

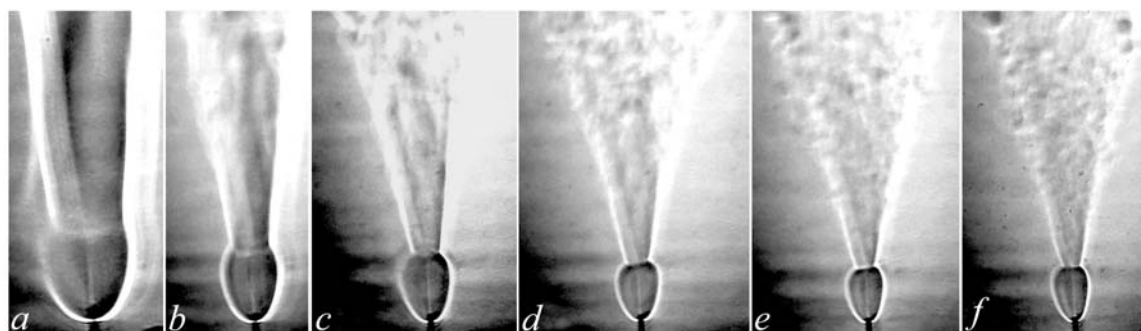


Рис. 14. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с гелием (He) в зависимости от их массового соотношения k ($a - 50$ мг/с (водород); смесь H_2/He : $b - 1,7$; $c - 1,25$; $d - 0,9$; $e - 0,6$; $f - 0,49$) и скорости струи $U_{\text{струи}}$, м/с ($a-f = 255, 332, 357, 398, 469, 505$ соответственно), диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

плотности на выходе струи из области перетяжки пламени, преодолевая который микроструя и пламя становятся турбулентными. Во всем диапазоне массового соотношения водород/гелий k появление области перетяжки пламени [1] наблюдается уже при диффузионном горении микроструи чистого водорода (см. табл. 8 и рис. 14). Далее, с ростом скорости истечения струи и соответственно с уменьшением доли водорода и ростом доли гелия в смеси водород/гелий, размер области перетяжки пламени уменьшается. Таким образом, механизм и характеристики развития микроструи смеси водород/гелий при ее диффузионном горении остаются такими же, как и в ситуации диф-

фузионного горения смеси газов водород/метан, представленной выше, и в аналогичном процессе горения чистого водорода, представленном в работах [1–5].

В табл. 9 и на рис. 14 представлены результаты исследования диффузионного горения смеси водорода с гелием в микроструе в ситуациях горения чистого водорода и его смеси, но при одном и том же массовом расходе водорода в смеси (4,5 мг/с) и с ростом массового расхода примеси (гелий от 2,7 до 8,9 мг/с).

Видно, что область «перетяжки» пламени сохраняется с ростом скорости истечения струи и увеличением доли гелия в смеси газов. Заметно, также, уменьшение размера

Таблица 9

№ п/п	$U_{\text{струи, м/с}}$	$M_{\text{водород, мг/с}}$	$M_{\text{гелий, мг/с}}$	$\rho_{\text{водород, кг/м}^3}$	$\rho_{\text{гелий, кг/м}^3}$	K	k
a	255	4,5	0	0,08987	0,1785	–	–
b	332	4,5	2,7			50/15 (3,3)	1,7
c	357	4,5	3,6			50/20 (2,5)	1,25
d	398	4,5	5,0			50/28 (1,8)	0,9
e	469	4,5	7,5			50/42 (1,2)	0,6
f	505	4,4	8,9			49/50 (0,98)	0,49

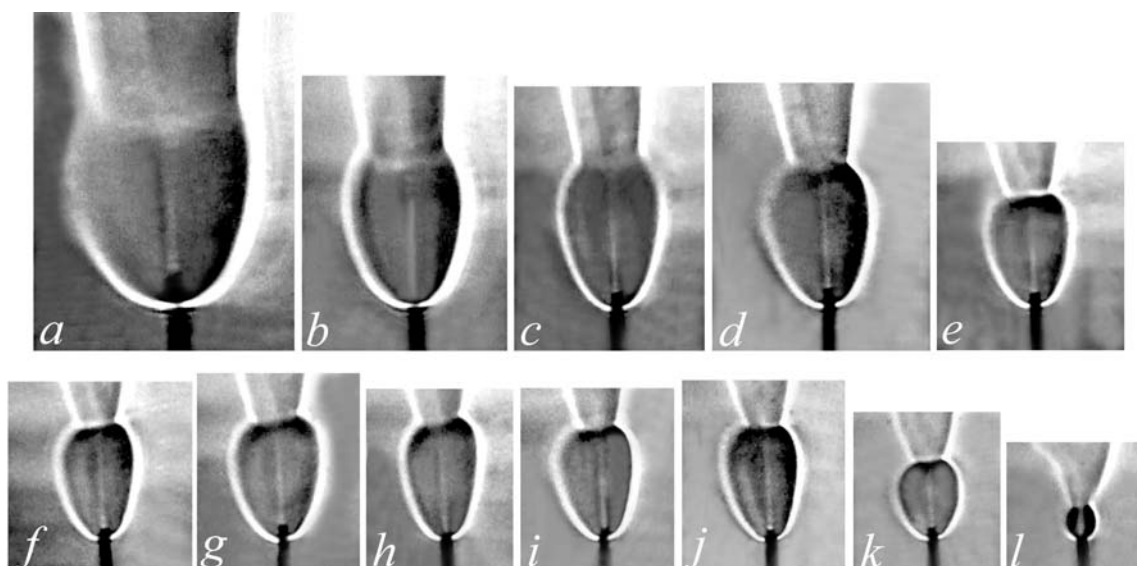


Рис. 15. Теневые картины области перетяжки пламени при диффузионном горении круглой микроструи смеси водорода (H_2) с гелием (He) в зависимости от массового соотношения смеси k : (a – 4,5 мг/с (чистый водород); b – 1,7, c – 1,14; d – 1,25; e – 0,9; f – 0,6; g – 0,9; h – 0,55; i – 1,08; j – 0,49; k – 0,98; l – 12,4 (смесь газов), и скорости струи $U_{\text{струи, м/с}}$ (255, 332, 337, 357, 362, 469, 398, 423, 449, 505, 541, 663 соответственно), диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм

области «перетяжки» пламени в данных условиях.

Диффузионное горение круглой микроструи смеси водорода с гелием

$$S_{\text{сопла}} = \pi d^2 / 4 = 3,14 \times 0,05 \times 0,05 / 4 = 0,00196 \text{ см}^2,$$

$$U_{\text{струи}} = Q / S_{\text{сопла}},$$

$$\rho_{\text{водород}} = 0,08987 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{гелий}} = 0,1785 \text{ кг/м}^3,$$

$$k_{(\text{гелий/водород})} = \text{гелий тяжелее в } 2 \text{ раза.}$$

Детальное рассмотрение области перетяжки пламени при диффузионном горении смеси водород/гелий в круглой микроструе при различной скорости истечения струи и различным их массовым соотношением k . Из рис. 15 видно, что область перетяжки пламени имеет сферическую форму. Внутри этой области можно наблюдать ламинарную микрострую и узкую область изменения

градиента плотности при горении смеси газов (более детально это показано на рис. 16). Можно наблюдать также уменьшение размера области перетяжки пламени как с ростом скорости истечения струи, так и при изменении массового соотношения смеси водород/гелий (k), что было показано выше и обнаружено ранее в работах [1–5] при диффузионном горении микроструи чистого водорода.

С целью понимания механизма образования области перетяжки пламени были изучены режимы горения смеси метана с гелием при его объемной концентрации в смеси от 0 до 50 %. Установлено, что добавка гелия не приводит к существенным изменениям режима горения смеси $\text{CH}_4 + \text{He}$ по сравнению с горением чистого CH_4 , т. е. не влияет на скорость срыва пламени и появление области перетяжки. Идея таких экспериментов заключалась в проверке предположения, что при добавке гелия, который быстро диффундирует из струи в окружающий воздух, часть метана будет также увлекаться гелием, в результате чего сформируется область вблизи среза сопла, где будет достаточная концентрация горючего для образования сферического присоединенного пламени, стабилизирующего в целом горение микроструи топлива. Однако в эксперименте ожидаемого эффекта добавки гелия не было обнаружено. Это может быть связано с тем, что гелий слабо увлекает метан в радиальном относительно струи топлива направлении, а поскольку гелий, в отличие

от водорода, не поддерживает горения, то эффект от его добавки в метан на условия образования перетяжки и срыва пламени отсутствует.

Диффузионное горение микроструи смеси водорода (H_2) с азотом (N_2)

Экспериментальные исследования горения смеси горючего газа водорода (H_2) с нейтральным (негорючим) газом азотом (N_2) проведены простым способом записи процесса горения диффузионного горения микроструи смеси водород/азот на цифровую видеокамеру. Исследована структура и характеристики развития пламени при горении чистого водорода и его смеси с азотом в условиях различного соотношения их расходов и скорости истечения микроструи. Приведено также сравнение развития пламени при горении чистого водорода и его смеси с азотом или с гелием в условиях различного соотношения их расходов и скорости истечения микроструи. При этом один критерий был соблюден, а именно одна и та же величина массового расхода водорода в смеси ($Q_{\text{водород}} = 50 \text{ см}^3/\text{с}$ ($4,5 \text{ мг}/\text{с}$)) при различной величине массового расхода азота ($Q_{\text{азот}} = 64 \div 67 \text{ см}^3/\text{с}$ ($17,5 \div 21 \text{ мг}/\text{с}$)) или гелия ($Q_{\text{гелий}} = 15 \div 50 \text{ см}^3/\text{с}$ ($2,7 \div 8,9 \text{ мг}/\text{с}$)) в смеси. Ниже представлены результаты данных исследований.

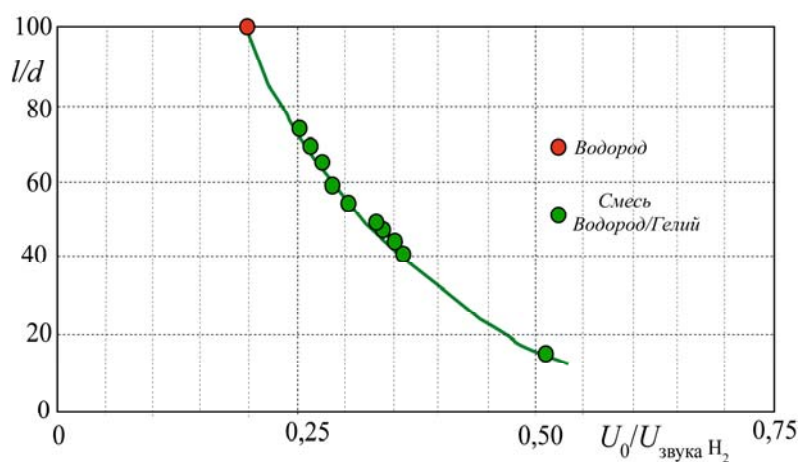
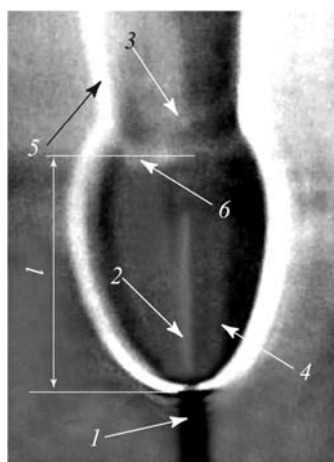


Рис. 16. Кривая уменьшения размера области перетяжки пламени в ближнем поле при горении смеси водорода (H_2) с гелием (He) в круглой микроструе ($d = 500 \text{ мкм}$) в зависимости от скорости истечения микроструи и теневая картина горения смеси водорода с гелием в круглой микроструе (1 – микро сопло; 2 – ламинарная струя; 3 – турбулентная струя; 4 – эллипсоидная область перетяжки пламени; 5 – пламя турбулентной микроструи; 6 – фронт горения эллипсоидной области (область перетяжки пламени) с резким изменением плотности смеси газов; l – размер области перетяжки пламени)

Таблица 10

№ п/п	$U_{\text{струи, м/с}}$	$M_{\text{водород, мг/с}}$	$M_{\text{азот, мг/с}}$	$\rho_{\text{водород, кг/м}^3}$	$\rho_{\text{азот, кг/м}^3}$	K	k
a	255	4,5	0	0,08987	1,25	–	–
b	326	4,5	17,5			50/14	0,26
c	332	4,5	18,7			50/15	0,24
d	342	4,5	21			50/17	0,21
e	316	3,8	25			42/20	0,15
f	296	2,7	35			30/28	0,08

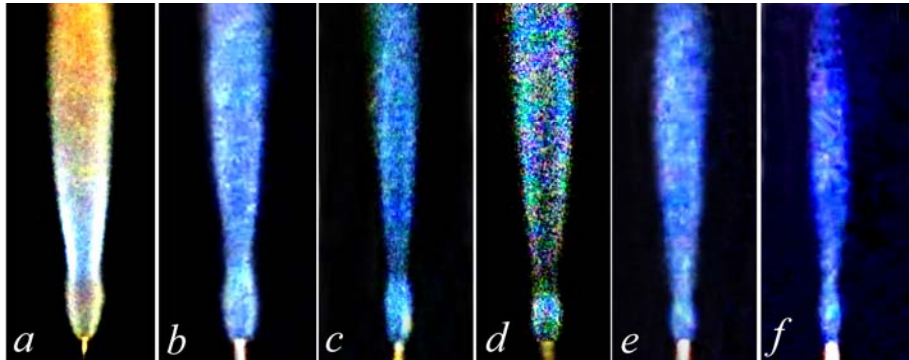


Рис. 17. Фотографии диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с азотом (N_2) в зависимости от их массового соотношения k (a (чистый водород) – 4,5 мг/с; b – 0,26; c – 0,24; d – 0,21; e – 0,15; f – 0,08) и скорости струи $U_{\text{струи, м/с}}$ (255, 326, 332, 342, 316, 296 соответственно), диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм, f – срыв пламени

Диффузионное горение круглой микроструи смеси водорода (H_2) с азотом (N_2)

Результаты исследований представлены в табл. 10 и на рис. 17. При данном диапазоне массового соотношения водород/азот k и диапазоне скорости истечения микроструи можно отчетливо наблюдать наличие области перетяжки пламени, как и в ситуациях, описанных выше и в работах [1–5]. Во всем диапазоне массового соотношения водород/азот k появление области перетяжки пламени [1] наблюдается уже при диффузионном горении микроструи чистого водорода. Далее, с ростом скорости истечения струи и соответственно с уменьшением доли водорода и ростом доли азота в смеси водород/азот, размер области перетяжки пламени уменьшается. Таким образом, механизм и характеристики развития микро-

струи смеси водород/азот при ее диффузионном горении остаются такими же, как и в ситуации диффузионного горения смеси газов водород/метан, водород/гелий, изложенных выше, и в аналогичном процессе горения чистого водорода.

Диффузионное горение круглой микроструи смеси водорода с азотом

$$S_{\text{сопла}} = \pi d^2 / 4 = 3,14 \times 0,05 \times 0,05 / 4 = 0,00196 \text{ см}^2,$$

$$U_{\text{струи}} = Q / S_{\text{сопла}},$$

$$\rho_{\text{водород}} = 0,08987 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{азот}} = 1,25 \text{ кг/м}^3,$$

$$k_{(\text{азот/водород})} = \text{азот тяжелее в } 14 \text{ раз.}$$

Таблица 11

№ п/п	$U_{\text{струи}}$, м/с	$M_{\text{водород}}$, мг/с	$M_{\text{гелий}}$, мг/с	$\rho_{\text{водород}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{гелий}}$, кг/м ³	K	k
	Водород – гелий			0,08987	0,1785	–	–
a	332	4,5	2,7			50/15	1,7
b	357	4,5	3,6			50/20	1,25
c	398	4,5	5,0			50/28	0,9
d	469	4,5	7,5			50/42	0,6
e	505	4,4	8,9			49/50	0,49

Таблица 12

№ п/п	$U_{\text{струи}}$, м/с	$M_{\text{водород}}$, мг/с	$M_{\text{азот}}$, мг/с	$\rho_{\text{водород}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{азот}}$, кг/м ³	K	k
	Водород – азот			0,08987	1,25	–	–
a	326	4,5	17,5			50/14	0,26
b	332	4,5	18,7			50/15	0,24
c	342	4,5	21			50/17	0,21

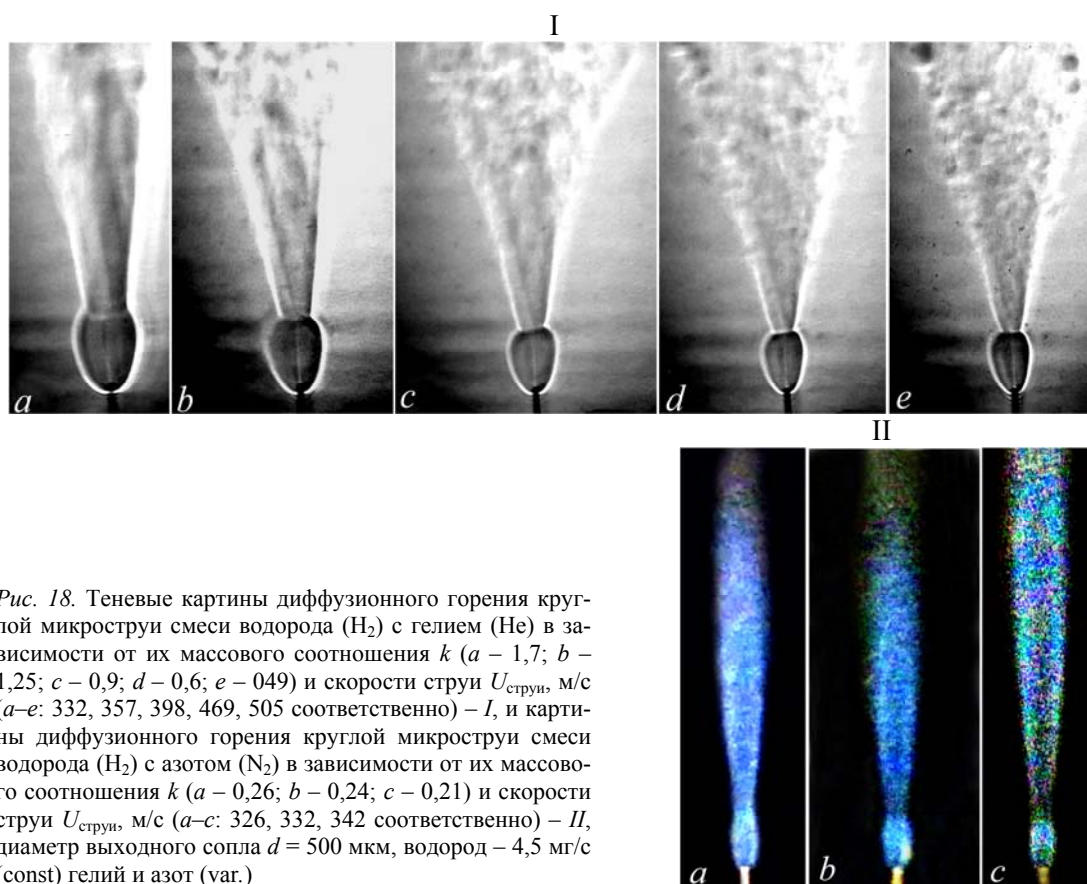


Рис. 18. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с гелием (He) в зависимости от их массового соотношения k (a – 1,7; b – 1,25; c – 0,9; d – 0,6; e – 0,49) и скорости струи $U_{\text{струи}}$, м/с (a–e: 332, 357, 398, 469, 505 соответственно) – I, и картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода (H_2) с азотом (N_2) в зависимости от их массового соотношения k (a – 0,26; b – 0,24; c – 0,21) и скорости струи $U_{\text{струи}}$, м/с (a–c: 326, 332, 342 соответственно) – II, диаметр выходного сопла $d = 500$ мкм, водород – 4,5 мг/с (const) гелий и азот (var.)

В табл. 11, 12 и на рис. 18 представлены результаты исследования диффузионного горения смеси водорода с гелием или азо-

том в микроструе в ситуациях горения чистого водорода и его смеси, но при одной и той же величине массового расхода водоро-

да в смеси (4,5 мг/с) и с ростом массового расхода примеси (гелий от 2,7 до 8,9 мг/с, азот от 17,5 до 21 мг/с). Видно, что область перетяжки пламени сохраняется с ростом

скорости истечения струи и увеличением доли гелия или азота в смеси газов. Заметно также уменьшение размера области перетяжки пламени в данных условиях.

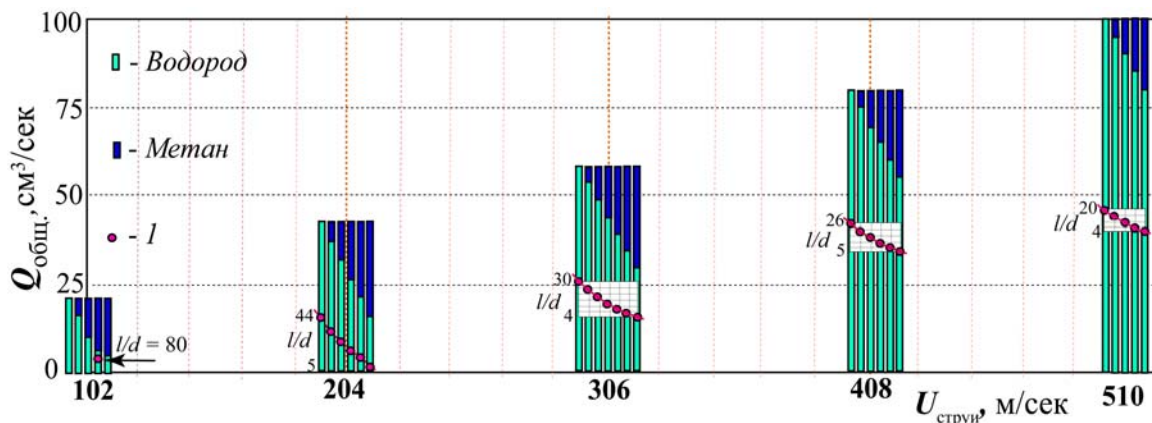


Рис. 19. Диаграмма зависимости общего ($Q_{\text{общ.}}$) и долевого (Q) объемного расхода чистого водорода и его смеси с метаном при диффузионном горении круглой микроструи в условиях различной скорости ее истечения (l – динамика уменьшения размера области перетяжки пламени (l/d) в зависимости от объемного соотношения смеси газов и скорости истечения микроструи)

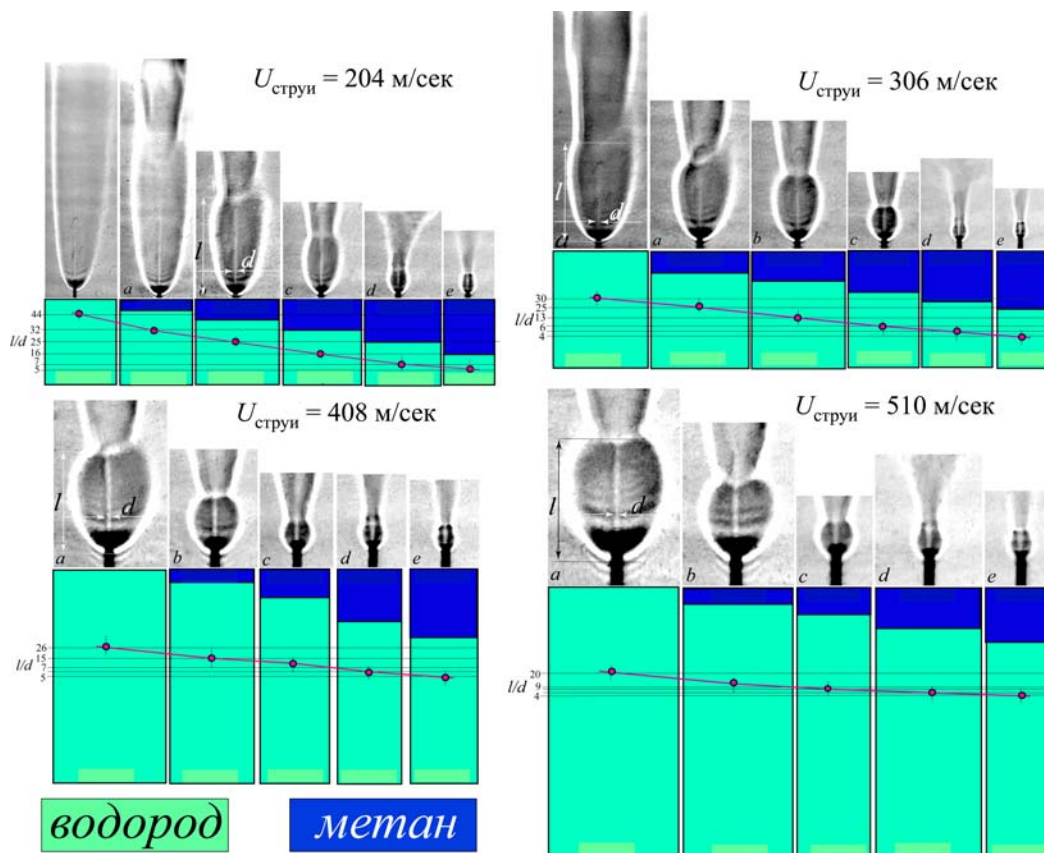


Рис. 20. Диаграмма зависимости общего ($Q_{\text{общ.}}$) и долевого (Q) объемного расхода чистого водорода и его смеси с метаном при диффузионном горении круглой микроструи в условиях различной скорости ее истечения совместно с теневыми картинками, отражающими процесс изменения размера и формы области перетяжки пламени. Динамика уменьшения размера области перетяжки пламени (l/d) в зависимости от объемного соотношения смеси газов и скорости истечения микроструи показана, как и на рис. 19

Диффузионное горение микроструи смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) – весовое и объемное соотношение газов

На рис. 19 представлена диаграмма зависимости общего ($Q_{общ.}$) и долевого (Q) объемного расхода чистого водорода и его смеси с метаном при диффузионном горении круглой микроструи в условиях различной скорости ее истечения. Здесь же, символами (I), показана динамика процесса уменьшения размера области перетяжки пламени (l/d) в зависимости от объемного соотношения смеси газов и скорости истечения микроструи. Видно, что с ростом скорости истечения струи наблюдается увеличение доли водорода и уменьшение доли метана в смеси и уменьшение размера области перетяжки пламени. Для более ясного понимания зависимости изменения размера области перетяжки пламени от скорости истечения струи и объемного соотношения смеси водорода (H_2) с метаном (CH_4) K при диффузионном горении круглой микроструи рис. 19 представлен на рис. 20 с набором теневых картин, отражающих процесс изменения размера и формы области перетяжки пламени в зависимости от вышеупомянутых параметров.

Таким образом, размер области перетяжки пламени при диффузионном горении микроструи смеси водород/метан зависит как от скорости истечения струи, так и от соотношения долей водорода и метана в смеси. С ростом доли метана в смеси водород/метан размер области перетяжки пламени уменьшается значительно быстрее, срыв и прекращение горения микроструи наблюдаются при меньшей скорости струи, чем это происходит при горении микроструи чистого водорода [1–5].

Выводы

На основании проведенных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном, а также с гелием или азотом в круглой микроструе можно сделать следующие основные выводы.

1. Механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с одним из газов – метаном, гелием или азотом, связаны с образованием области перетяжки пламени, как

и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода.

2. Область перетяжки пламени имеет сферическую форму, где идет процесс смешения ламинарной струи смеси с окружающим воздухом и их горение. При преодолении узкой области мощного градиента плотности на границе сферической области ламинарная микроструя и пламя мгновенно турбулизуются.

3. Процесс диффузионного горения смеси водород/метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени, срыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода.

4. Все перечисленные стадии горения смеси водород/метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи (200–500 м/с), чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода (600–800 м/с).

5. Обнаружено повышение устойчивости горения микроструи смеси водород/метан по сравнению с неустойчивым горением микроструи чистого метана, что говорит о возможности за счет добавок водорода расширить диапазон условий (скоростей потока газов) устойчивого турбулентного горения метана и других углеводородов.

6. При диффузионном горении смеси водорода с метаном или гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи струи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

Список литературы

1. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.

2. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестн.

Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.

3. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // *Авиадвигатели XXI века: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф.* М., 2015.

4. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика.* 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.

5. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // *ДАН.* 2016. Т. 470, № 2. С. 1–6.

6. Agrawal A. K., Albers B. W., Alammur Kh. N. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas – jet diffusion flames // *Combustion Science and Technology.* 2005. Vol. 177. No. 2. P. 305–322.

Материал поступил в редколлегию 15.05.2016

**A. G. Shmakov, G. R. Grek, V. V. Kozlov
Yu. A. Litvinenko, O. P. Korobeinichev**

¹ *Institute of Chemical Kinetics and Combustion of SB RAS
3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

¹ *Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*shmakov@kinetics.nsc.ru, grek@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru
litur@itam.nsc.ru, korobein@kinetics.nsc.ru*

DIFFUSION COMBUSTION OF THE ROUND MICROJET MIXTURE OF HYDROGEN WITH METANE, HELIUM AND NITROGEN

The purpose of the given work will consist in an experimental studies of the diffusion combustion features of the hydrogen round microjet mixtures with the metane, helium and nitrogen. It is found, that the mechanism and characteristics of a microjet and a flame evolution at diffusion combustion of the hydrogen mixture with the metane, helium or nitrogen are connected with the «bottleneck» flame area formation, as well as in a situation of a pure hydrogen microjet diffusion combustion. It is revealed, that process of diffusion combustion of a hydrogen / metane mixture in a round microjet is accompanied by stage-by-stage stages of a turbulent flame detachment at preservation of combustion in the «bottleneck» flame area, and, at last extinction of microjet combustion that correlates with combustion process of a similar microjet of pure hydrogen. It is found, that all above-listed stages of a hydrogen / metane mixture combustion are realized in a range considerably smaller speeds of a microjet (200÷500 m/sec), than in a similar situation of a pure hydrogen microjet combustion (600÷800 m/sec). It is shown, that at diffusion combustion of a mixture of hydrogen with metane or helium or nitrogen in a round microjet for stabilization of combustion with growth of a microjet speed it is necessary to increase a portion of hydrogen (or to reduce a portion of an impurity) in a mixture of gases.

Keywords: a round microjet, diffusion combustion of the gases mixtures, «bottleneck» flame area, schlieren method, shadow patterns.