

**В. В. Козлов**<sup>1,2</sup>, **Г. Р. Грек**<sup>1</sup>, **Ю. А. Литвиненко**<sup>1</sup>  
**А. Г. Шмаков**<sup>2,3</sup>, **В. В. Вихорев**<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>3</sup> *Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН  
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

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

## **ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ КРУГЛОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ДО- И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ СОПЛА**

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании диффузионного горения круглых микро-струй водорода на до- и сверхзвуковой скорости. В результате экспериментальных исследований получены следующие результаты. Впервые представлено четыре сценария диффузионного горения круглой микроструи водорода, включая «сверхзвуковое горение» при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. Установлено, что стабилизация дозвукового горения микроструи водорода связана с наличием «области перетяжки пламени», а «сверхзвукового горения» микроструи – с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микро-струи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения). Показано, что «сверхзвуковое диффузионное горение» круглой микроструи водорода с наличием сверхзвуковых ячеек по водороду реализуется в диапазоне диаметров выходного отверстия от 0,25 до 1 мм.

*Ключевые слова:* круглая микроструя водорода, диффузионное горение, «область перетяжки пламени», профиль скорости, «сверхзвуковое горение», гистерезис, теневой метод исследования, теневые картины горения.

### **Введение**

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [1–5] показали наличие различных сценариев протекания данного процесса в зависимости от нарастания скорости истечения микроструи в диапазоне диаметров

выходного отверстия от 0,25 до 1 мм. Обнаружены следующие сценарии диффузионного горения круглой микроструи водорода.

1. Горение чисто ламинарной микроструи с наличием ламинарного пламени большой дальности ( $U_0 \leq 150$  м/с).

2. Возникновение сферической «области перетяжки пламени» с наличием в ней ла-

---

\* Работа поддержана грантом РФФ № 16-19-10330 и грантом РФФИ № 16-07-00946.

минарной микроструи и ламинарного пламени с турбулизацией микроструи и пламени при преодолении ламинарной микроструи узкой области градиента плотности газа ( $U_0 > 150$  м/с).

3. Отрыв турбулентного пламени от области перетяжки пламени ( $U_0 > 200$  м/с).

4. Прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в «области перетяжки пламени». Причем в данной ситуации горение в области перетяжки пламени сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, однако при наличии такого явления, как «запирание сопла» [5; 6] ( $U_0 > 331$  м/с).

5. Прекращение горения микроструи ( $U_0 \approx 331$  м/с).

Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской микроструи водорода [2; 7]. Следует заметить, что запирание сопла произошло при достижении скорости истечения микроструи водорода, близкой к скорости звука в воздухе ( $U_0 \approx 331$  м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструи обеспечивалась в данной ситуации наличием области перетяжки пламени и существованием в ней горения.

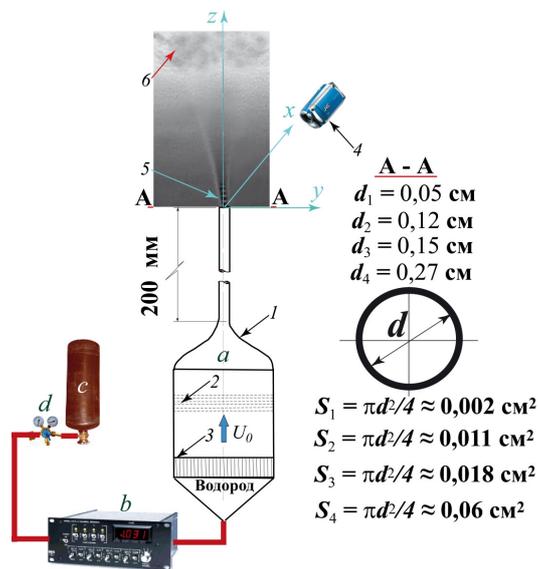


Рис. 1. Схема эксперимента: *a* – сопловой аппарат; *b* – блок управления электромагнитным клапаном расхода; *c* – баллон сжатого водорода (100 атм.); *d* – редуктор. Сопловой аппарат (*a*) состоит из форкамеры (1), набора детурбулизирующих сеток (2), хонейкомба (3) и микротрубки длиной 200 мм с выходным соплом. С помощью цифровой видеокамеры (4) фиксировались теньевые картины сверхзвуковых ячеек (5) и оторвавшегося пламени (6)

Тем не менее нам не удалось выйти на «сверхзвуковое диффузионное горение» микроструи водорода по причине запирания сопла областью перетяжки пламени, которая приводила к нагреву выхода микросопла и предотвращала отрыв пламени от его среза. Одной из характеристик сверхзвукового горения струйного течения является наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работе [6; 8] при поджигании круглой микроструи водорода вдали от среза сопла. В данной ситуации можно было наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в оторвавшемся от среза сопла пламени.

В работе [9] впервые представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения плоской микроструи водорода на сверхзвуковой скорости ее истечения как по воздуху, так и по водороду. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [10–12].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей диффузионного горения круглых микроструй водорода, истекающих из микросопел с различным диаметром выходного отверстия. Особое внимание будет уделено исследованию характеристик развития данных микроструй на сверхзвуковых (относительно воздуха  $U_0 = 331$  м/с и водорода  $U_0 = 1284$  м/с) скоростях их истечения и при наличии сверхзвуковых ячеек. Будет проведено сравнение результатов исследования с результатами, представленными в работах [10–12].

### Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1 представлена схема эксперимента. В установку соплового аппарата (*a*) через блок управления электромагнитным клапаном типа 179В фирмы *MKS Instruments* объемного расхода газа (*b*), обеспечивающий точность измерения расхода газа в пределах 0,7 %, подавался водород из баллона (*c*) под давлением 100 атм. через редуктор (*d*). Управление расходом газа осуществлялось блоком управления, а показания расхо-

да водорода регистрировались на электронном табло (см. *b*). В эксперименте водород поступал в установку соплового аппарата (*a*), состоящую из форкамеры (1) с набором детурбулизирующих сеток (2), хонейкомба (3), и далее через цилиндрический микроканал длиной 200 мм в круглое сопло с размерами диаметра его выходного отверстия, указанными на рис. 1.

Процедура проведения исследований состояла из непосредственной видеосъемки процесса диффузионного горения микроструи водорода и видеосъемки теневой картины данного процесса (теневой метод Тёплера на базе ИАБ-451) также с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.

Скорость истечения водорода ( $U_0$ , м/с) на выходе круглого сопла определялась по формуле  $U_0 = Q/S$ , где  $Q$ , см<sup>3</sup>/с – расход газа, измеряемый прецизионным расходомером (*b*), а  $S$ , см<sup>2</sup> – площадь выходного отверстия сопла. Следует заметить, что определение скорости истечения водорода из сопла таким способом на сверхзвуке не совсем корректно, поскольку не учитывается целый ряд параметров, в том числе сжимаемость газа. В данной ситуации был использован еще один метод определения скорости истечения микроструи по разности давления ( $\Delta P$ , кгс/м<sup>2</sup>) на входе ( $P_{\text{редуктор}}$ ) и выходе ( $P_{\text{атмосфера}}$ ) водорода из сопла ( $\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$ ). При этом  $U_0$ , м/с =  $\sqrt{2\Delta P/\rho}$ , где  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность водорода.

### Результаты экспериментов

*Диффузионное горение круглой струи водорода, истекающей из сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 1,2$  мм*

На рис. 2 представлены фотографии пламени при диффузионном горении струи водорода, истекающей из круглого сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 1,2$  мм в ситуации нарастания скорости ее истечения. При малой скорости ( $U_0 \leq 40$  м/с) истечения микроструи длина распространения ламинарного пламени достигает примерно 400 мм. С ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать появление области перетяжки пламени и небольшое уменьшение длины распространения турбулентного пламени ( $h \approx 350$  мм). Дальнейший рост скоро-

сти истечения микроструи приводит к отрыву пламени от среза сопла и росту длины его распространения, превышающей  $h \approx 400$  мм при сверхзвуковом истечении микроструи по водороду ( $U_0 \geq 1284$  м/с).

Цель данного представления состоит в том, чтобы показать процесс распространения пламени в пространстве, акцентируя внимание на достаточно большой его длине (почти до полуметра), несмотря на малый диаметр отверстия выходного сопла. Тем не менее, основное внимание необходимо уделить рассмотрению области горения струи вблизи ее выхода из сопла. Более детально рассмотреть данную область можно с помощью теневого метода исследования, позволяющего наблюдать ключевые структурные особенности диффузионного горения микроструи водорода по причине их зависимости от изменения градиента плотности газа как при его горении, так и без горения.

На рис. 3 представлены теневые картины пламени при нарастании скорости  $U_0$  ( $Q$  объемного расхода) истечения водорода. Можно наблюдать процесс возникновения области перетяжки пламени с ламинарной струей и ламинарным пламенем сферической формы в ней, уменьшение пространственного размера области перетяжки пламени с ростом скорости истечения струи водорода. Далее, с ростом скорости струи, турбулентное пламя отрывается от области перетяжки пламени, и, наконец, можно наблюдать исчезновение данной области с ростом величины отрыва пламени ( $h \approx 1,5$  см) от среза сопла при  $U_0 = 654$  м/с.

На рис. 4 представлены теневые картины пламени при уменьшении скорости  $U_0$  ( $Q$  объемного расхода) истечения водорода (картины *a–e*) и нарастании скорости истечения водорода (картины *f–m*).

Можно наблюдать процесс отрыва пламени от среза сопла при поджигании струи водорода вдали от него. С уменьшением скорости истечения струи величина отрыва пламени остается, примерно, одинаковой ( $h \approx 3$  мм) в диапазоне скорости струи ( $U_0 = 648 \div 368$  м/с). При  $U_0 = 325$  м/с можно наблюдать присоединение пламени к срезу сопла и возникновение области перетяжки пламени. С другой стороны, в ситуации поджигания микроструи водорода вблизи среза сопла при скорости ее истечения ( $U_0 = 325$  м/с) и в случае увеличения скорости истечения струи можно наблюдать динами-

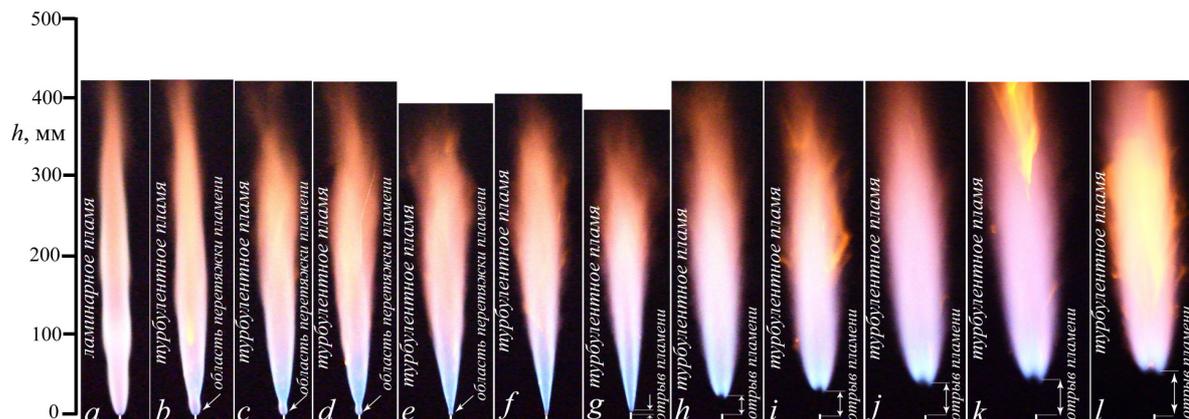


Рис. 2. Фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из круглого ( $d = 1,2$  мм) сопла в ситуации нарастания скорости ее истечения:  $a-h$  – от 40 до 1340 м/с

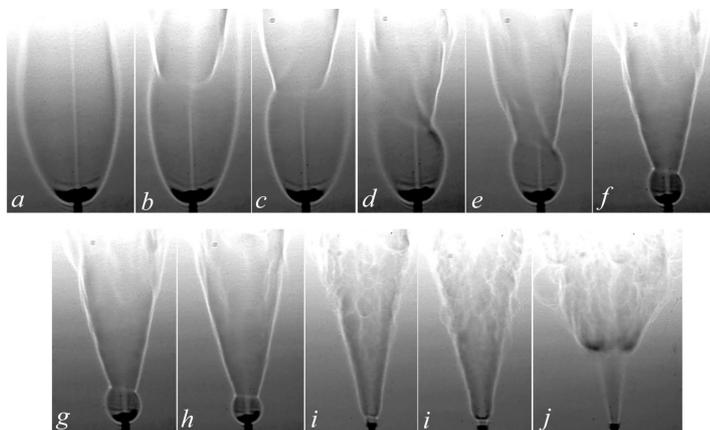


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого сопла ( $d = 1,2$  мм) с ростом скорости (объемного расхода) ее истечения ( $U_0$ , м/с ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с)):  $a - 91$  (100);  $b - 148$  (163);  $c - 182$  (200);  $d - 200$  (220);  $e - 227$  (250);  $f - 245$  (270);  $g - 259$  (285),  $h - 327$  (360);  $i - 654$  (720);  $j - 982$  (1080) (отрыв пламени 1,5 см)

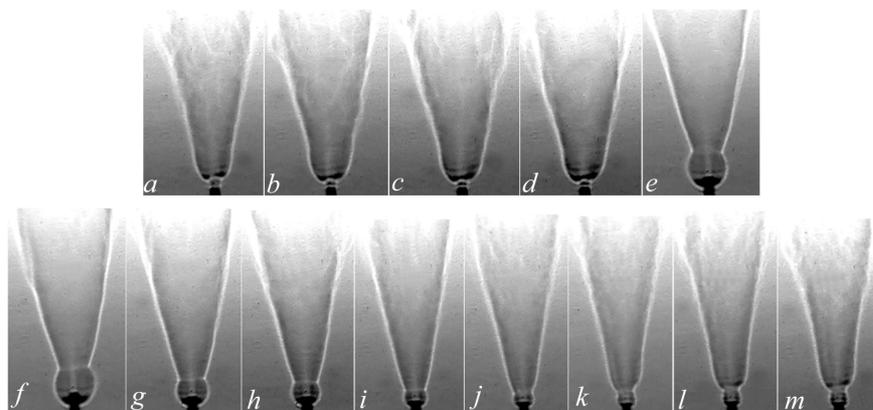


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла ( $d = 1,2$  мм,  $S = 0,011$  см<sup>2</sup>) с падением скорости ее истечения ( $U_0$ , м/с ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с)):  $a - 648$  (713);  $b - 474$  (521);  $c - 421$  (463);  $d - 368$  (405);  $e - 325$  (357) (отрыв пламени  $\approx 3$  мм) и с ростом скорости ее истечения:  $f - 325$  (357);  $g - 337$  (371);  $h - 412$  (453);  $i - 526$  (579);  $j - 559$  (615);  $k - 631$  (694);  $l - 737$  (811);  $m - 742$  (816) (отрыв пламени от области перетяжки пламени  $\approx 3$  мм)

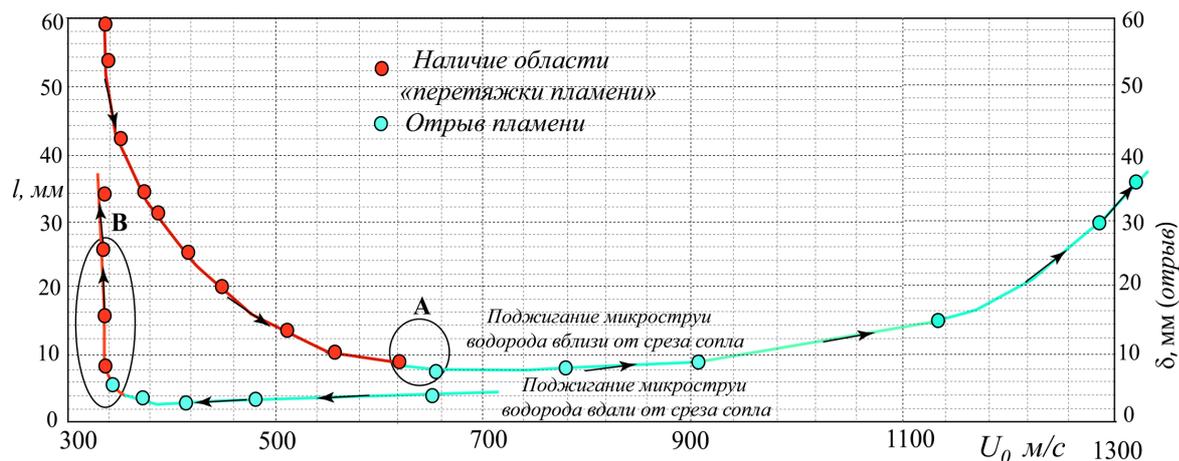


Рис. 5. График (гистерезис) зависимости процесса развития пламени микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения и способа поджигания (вблизи / вдали от среза сопла), диапазон скорости исчезновения области перетяжки пламени и начала отрыва пламени (А) и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления области перетяжки пламени (В). Стрелками указано направление изменения скорости микроструи (повышение / уменьшение)

ку трансформации формы и размера «области перетяжки пламени» с сохранением ее существования до больших скоростей ( $U_0 = 737$  м/с) истечения струи водорода, даже при наличии отрыва от нее области турбулентного пламени.

*Гистерезис процесса развития и исчезновения области перетяжки пламени в зависимости от способа поджигания круглой струи водорода (вдали / вблизи от среза сопла) и при снижении или нарастании скорости ее истечения*

На рис. 5 представлен график процесса развития и исчезновения области перетяжки пламени в зависимости от снижения или нарастания скорости истечения круглой струи водорода. График ясно демонстрирует наличие гистерезиса в данном процессе. При поджигании струи вблизи среза сопла область перетяжки пламени, нагревая выход сопла, дает возможность существования данной области до момента ее исчезновения и возникновения отрыва пламени на достаточно большой скорости истечения микроструи ( $U_0 \approx 680$  м/с). Однако при снижении скорости истечения струи процесс инверсии отрыва пламени на его присоединении с появлением области перетяжки пламени происходит при  $U_0 \approx 325$  м/с, что коррелирует с

ситуацией, наблюдаемой при поджигании микроструи водорода вдали от среза сопла.

Таким образом, в данном случае можно наблюдать гистерезисный цикл.

*Полуцикл А.* Наличие области перетяжки пламени, ее исчезновение и отрыв пламени при поджигании струи вблизи среза сопла и нарастании скорости ее истечения (позиция А).

*Полуцикл В.* Процесс инверсии от оторвавшегося пламени к его присоединению и возникновению области перетяжки пламени при уменьшении скорости истечения струи в ситуации ее поджигания вдали от среза сопла (позиция В).

Данный факт коррелирует с результатами аналогичных исследования диффузионного горения плоской микроструи водорода [9].

*Сверхзвуковое диффузионное горение круглой струи водорода*

Остановимся на одном важном наблюдении, связанном с фактом прекращения горения водородной микроструи либо его продолжением при сверхзвуковой скорости истечения микроструи. На рис. 6 представлены теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из микросопла с диаметром выходного отверстия  $d = 0,5$  мм [1]. Как показали исследования (рис. 6), срыв пламени и прекращение

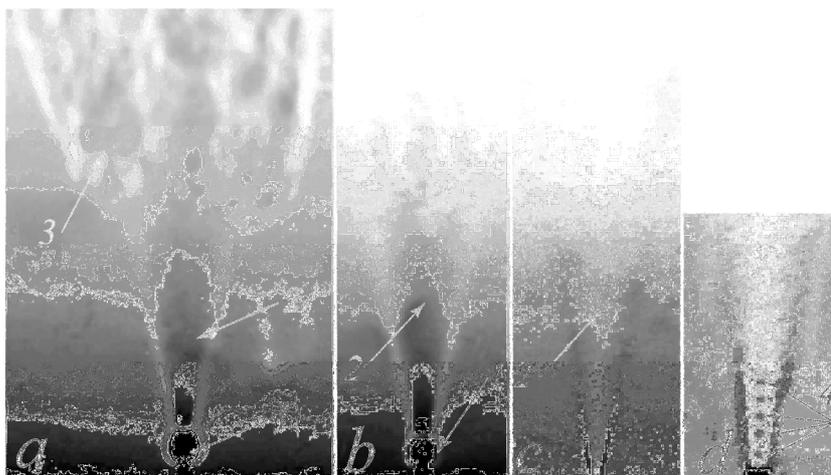


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла с диаметром выходного отверстия  $d = 0,5$  мм на различной скорости ( $U_0$ , м/с):  $a - 663$ ,  $b - 765$ ,  $c$  – сверхзвуковая скорость ( $M > 1$ ,  $U_0 \geq 1284$  м/с),  $d$  – увеличенная область вблизи выхода микросопла с наличием сверхзвуковых ячеек. Обозначения: 1 – область перетяжки пламени; 2 – турбулентная микроструя; 3 – пламя; 4 – сверхзвуковые ячейки

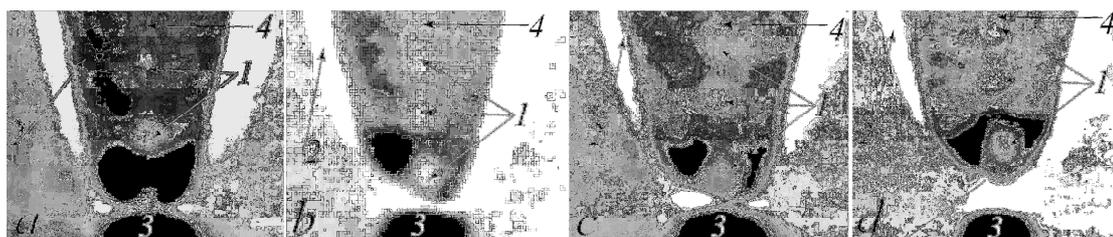


Рис. 7. Теневые картины сверхзвукового горения микроструи водорода с оторвавшимся от среза сопла пламенем и наличием сверхзвуковых ячеек на микроструе: 1 – сверхзвуковые ячейки; 2 – пламя; 3 – микросопло Лавала; 4 – микроструя. Ситуация различного объемного расхода ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с) водорода:  $a - 140$ ;  $b - 141$ ;  $c - 144$ ;  $d - 151$  (взято из работы [13])

горения микроструи происходило при достижении сверхзвуковой скорости ее истечения. Однако, несмотря на отсутствие горения, скорость истечения микроструи была сверхзвуковой, на что указывает наличие сверхзвуковых ячеек. Таким образом, диффузионного горения круглой микроструи водорода ( $d = 0,5$  мм,  $S = 0,2$  мм<sup>2</sup>) на сверхзвуковой скорости по водороду ( $U_0 \geq 1284$  м/с) не наблюдалось. С другой стороны, диффузионное горение плоской микроструи водорода ( $S \approx 0,9$  мм<sup>2</sup>) на сверхзвуковой скорости по водороду ( $U_0 \geq 1284$  м/с) можно было наблюдать, но при наличии оторвавшегося от среза сопла пламени [9].

Следует также отметить, что при горении круглой микроструи водорода, истекающей из тонкостенного микросопла Лавала (диаметр выходного отверстия и горла сопла  $d =$

$= 2$ ;  $0,45$  мм соответственно) наблюдался небольшой отрыв пламени от среза сопла ( $h \approx 1-3$  мм) при наличии сверхзвуковых ячеек сверхзвукового горения микроструи относительно воздуха ( $U_0 \geq 330$  м/с). На рис. 7, взятом из работы [13], можно ясно видеть данную ситуацию.

Таким образом, можно констатировать, что одна из ряда причин, обеспечивающих сверхзвуковое горение микроструи водорода, связана с размером, в частности с размером площади выходного отверстия (щели) микросопла. Продемонстрировано, что при диаметре (площади)  $d = 0,5$  мм, ( $S = 0,2$  мм<sup>2</sup>) выходного отверстия сопла наблюдается срыв пламени и отсутствие горения микроструи. С другой стороны, наблюдалось стабильное сверхзвуковое горение как плоской ( $S = 0,2$  мм<sup>2</sup>) [9], так и круглой ( $S \approx 3$  мм<sup>2</sup>)

[13] струи водорода с оторвавшимся от среза сопла пламенем, но с размером площади выходного отверстия (щели), более чем в четыре раза превышающем аналогичный параметр у круглой микроструи с диаметром выходного отверстия  $d = 0,5$  мм ( $S = 0,2$  мм<sup>2</sup>). По-видимому, есть определенные границы, связанные с размерами микросопел, при которых реализуется сверхзвуковое горение микроструй. Рассмотрим более детально данное предположение.

*Сверхзвуковое диффузионное горение круглой струи водорода, истекающей из сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 1,2$  мм*

На рис. 8 показаны профили средней ( $U$ ) и пульсационной ( $u'$ ) составляющих скорости при истечении круглой микроструи из микросопла [14]. По причине большого удлинения микросопла  $l/d \approx 170$ , где  $l$  (200 мм) – длина

микросопла,  $d$  (1,2 мм) – диаметр выходного отверстия микросопла, профиль скорости на срезе сопла имеет параболическую форму [14]. В процессе исследований измерялась среднерасходная скорость  $U_0 = Q/S$ , которая примерно в 1,2–1,3 раза меньше максимальной скорости на оси микросопла (см. рис. 8).

На рис. 9 представлены теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла при сверхзвуковой скорости по водороду ( $U_0 \approx 1284$  м/с). Можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек.  $U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho}$ , где  $\Delta P = 4; 4,5$  атм. = 40000; 45000 кгс/м<sup>2</sup> – перепад давления на входе и выходе из микросопла, а  $\rho_{\text{водород}} = 0,09$  кг/м<sup>3</sup> плотность водорода,  $U_0 = \sqrt{80000; 90000/0,09} = 942; 1000$  м/с. Учитывая, что  $U_0 = 942; 1000$  м/с – среднерасходная скорость микроструи, а профиль скорости параболический, максимальная скорость достигает скорости звука по водороду  $U_0 \approx 1225; 1300$  м/с.

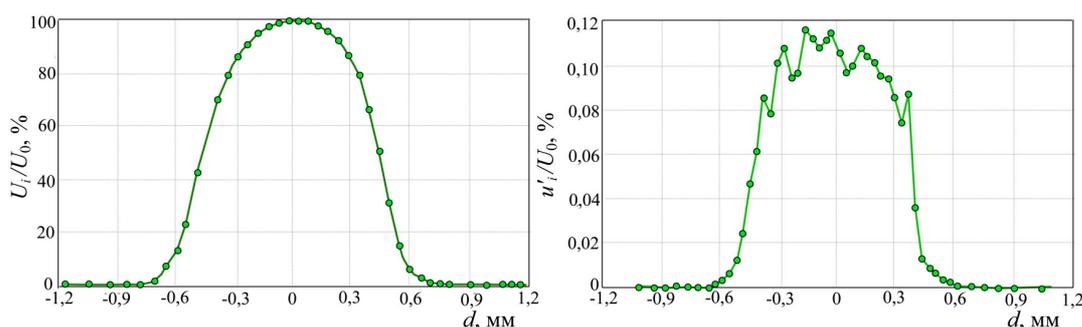


Рис. 8. Профили средней ( $U_i$ ) и пульсационной ( $u'_i$ ) составляющих скорости на срезе круглого микросопла ( $d \approx 1,2$  мм)

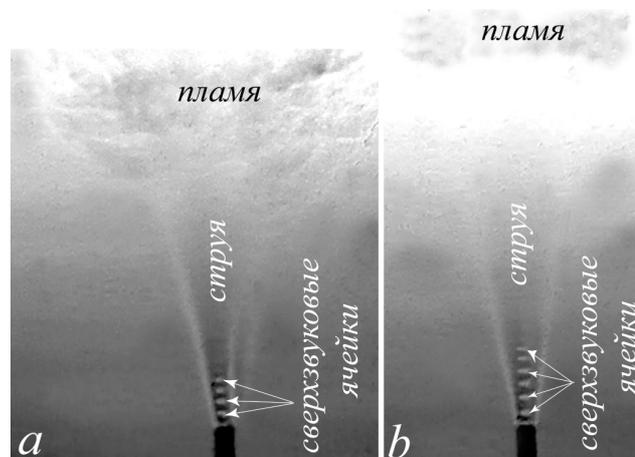


Рис. 9. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла ( $d = 1,2$  мм,  $S = 1,1$  мм<sup>2</sup>) на сверхзвуковой скорости (по водороду):  $U_0 \approx 1225$  м/с (а) и  $U_0 \approx 1300$  м/с (б), величина отрыва пламени  $h \approx 30$ (а), 35(б) мм соответственно

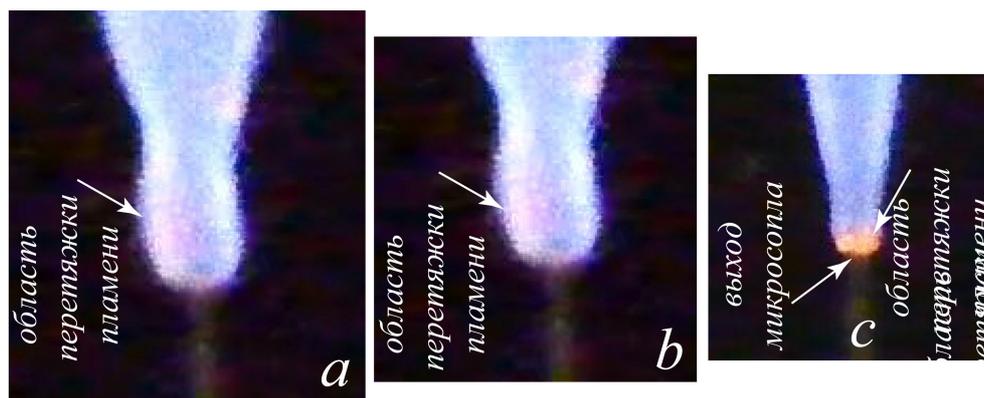


Рис. 10. Фотографии, демонстрирующие нагрев выхода микросопла от области перетяжки пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла ( $d = 1,2$  мм), изменение размера и формы области перетяжки пламени с ростом скорости истечения микроструи



Рис. 11. Фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из круглого ( $d = 1,5$  мм) сопла в ситуации нарастания скорости ее истечения от 40 до 1340 м/с

На рис. 10 показаны теневые картины нагрева выхода сопла ( $d = 1,2$  мм) от области перетяжки пламени с ростом скорости истечения струи водорода. Область перетяжки пламени, охватывая выход сопла, нагревает его до температуры примерно  $t = 800 \div 1000$  °С, что видно по красному цвету (см. работу [14]) внутри данной области и на выходе сопла. Данный факт в ситуации нагрева выхода толстостенного микросопла [5] привел к его заклиниванию при наличии области перетяжки пламени до трансзвуковых скоростей истечения микроструи, не давая возможности горения микроструи на сверхзвуковой скорости. Однако в ситуации нагрева выхода тонкостенного микросопла [13], как

и в нашем случае, область перетяжки пламени исчезала, происходил отрыв пламени от среза сопла и скорость истечения микроструи имела возможность выходить на сверхзвуковую.

*Диффузионное горение круглой струи водорода, истекающей из сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 1,5$  мм*

На рис. 11 представлены фотографии пламени при диффузионном горении струи водорода, истекающей из круглого сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 1,5$  мм

в ситуации нарастания скорости ее истечения. При малой скорости ( $U_0 \leq 40$  м/с) истечения микроструи длина распространения ламинарного пламени достигает примерно 500 мм. С ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать появление области перетяжки пламени. Дальнейший рост скорости истечения микроструи приводит к отрыву пламени от среза сопла и росту длины его распространения, превышающей  $h \approx 700$  мм при сверхзвуковом истечении микроструи по водороду ( $U_0 \geq 1284$  м/с).

Цель данного представления состоит в том, чтобы показать процесс распространения пламени в пространстве, акцентируя внимание на достаточно большую его длину (более 700 мм), несмотря на малый диаметр отверстия выходного сопла  $d = 1,5$  мм. Тем не менее, основное внимание необходимо уделить рассмотрению области горения струи вблизи ее выхода из сопла. Более детально рассмотреть данную область можно с помощью теневого метода исследования, позволяющего наблюдать ключевые струк-

турные особенности диффузионного горения микроструи водорода по причине их зависимости от изменений градиента плотности газа как при его горении, так и без горения.

На рис. 12 представлены теньевые картины пламени при горении круглой струи водорода и нарастании скорости ее истечения  $U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho}$ . Можно наблюдать наличие области перетяжки пламени с ламинарной струей и ламинарным пламенем сферической формы. Далее, с ростом скорости струи, можно наблюдать отрыв пламени от среза сопла:  $h \approx 1,5$  мм при  $U_0 \approx 654$  м/с,  $h \approx 17-20$  мм при  $U_0 \approx 1170$  м/с и  $h \approx 20-23$  мм при  $U_0 \approx 1270$  м/с.

На рис. 13 представлены теньевые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого сопла при сверхзвуковой скорости по водороду. Можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек. Максимальная скорость достигает скорости звука по водороду  $U_0 \approx 1230(a)$  и  $1300(b)$  м/с.

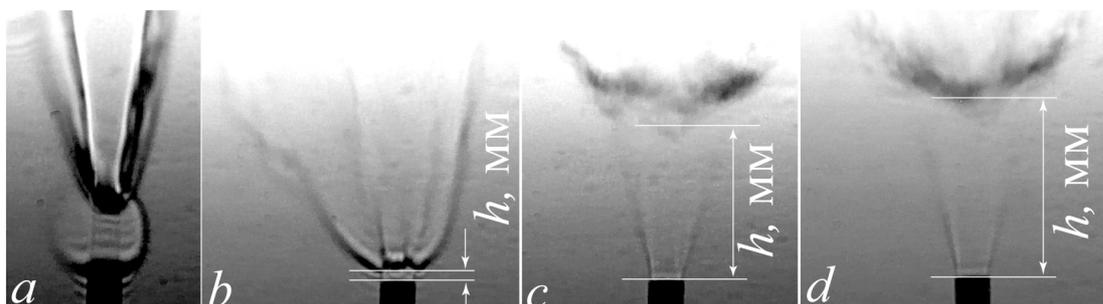


Рис. 12. Теньевые картины пламени при диффузионном горении круглой микроструи водорода при различной скорости ее истечения:  $a - U_0 = 278$  м/с (область перетяжки пламени),  $b - U_0 \approx 389$  м/с (начало отрыва пламени,  $h \approx 1,5$  мм),  $c - U_0 \approx 1170$  м/с ( $h \approx 17-20$  мм),  $d - U_0 \approx 1270$  м/с ( $h \approx 20-23$  мм)

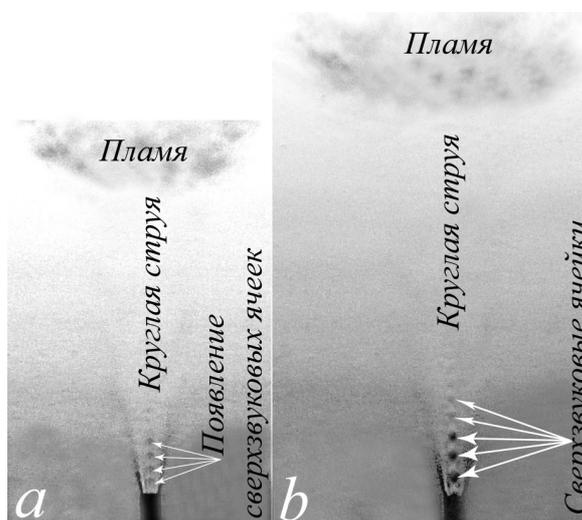


Рис. 13. Теньевые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого сопла  $d = 1,5$  мм, при различной скорости ее истечения:  $a - U_0 \approx 1230$  м/с,  $b - U_0 > 1284$  м/с. Можно наблюдать возникновение сверхзвуковых ячеек, стабилизирующих процесс горения на сверхзвуковой скорости истечения микроструи. Отрыв пламени от среза сопла:  $a - h \approx 30$  мм,  $b - h \approx 42$  мм

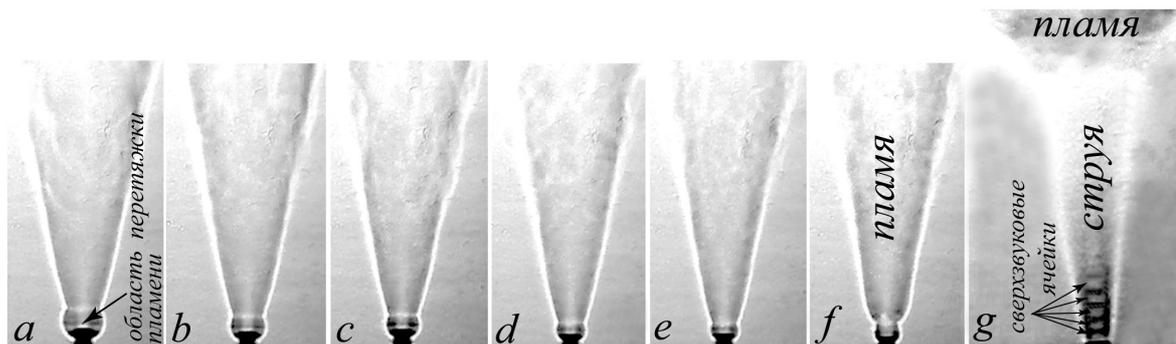


Рис. 14. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла ( $d = 1,5$  мм,  $S = 1,8$  мм<sup>2</sup>) с увеличением скорости ее истечения ( $U_0$ , м/с):  $a - 280$ ;  $b - 330$ ;  $c - 360$ ;  $d - 425$ ;  $e - 460$ ;  $f - 545$ ;  $g - 1340$ , поджигание струи водорода вблизи среза сопла

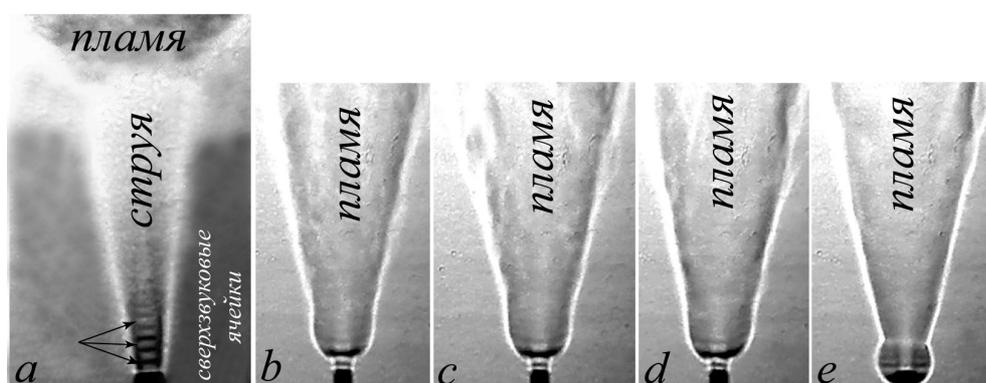


Рис. 15. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла ( $d = 1,5$  мм,  $S = 1,8$  мм<sup>2</sup>) с уменьшением скорости ее истечения ( $U_0$ , м/с):  $a - 1340$ ;  $b - 360$ ;  $c - 325$ ;  $d - 280$ ;  $e - 230$ , поджигание струи водорода вдали от среза сопла



Рис. 16. Фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из круглого ( $d = 2,7$  мм) сопла в ситуации нарастания скорости ее истечения:  $a-g$  – от 40 до 1340 м/с

На рис. 14 представлены теневые картины пламени при горении круглой струи водорода и нарастании скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой  $U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 1340$  м/с. Можно наблюдать процесс возникновения области перетяжки пламени с ламинарной струей и ламинарным пламенем сферической формы в ней и уменьшение пространственного размера области перетяжки пламени с ростом скорости истечения струи водорода. Далее, с ростом скорости струи, турбулентное пламя отрывается от области перетяжки пламени, и, наконец, можно наблюдать исчезновение данной области, отрыв пламени от среза сопла и рост величины отрыва пламени до  $h \approx 4$  см с появлением сверхзвуковых ячеек при  $U_0 = 1340$  м/с.

На рис. 15 представлены теневые картины пламени при горении круглой струи водорода и уменьшении скорости ее истечения ( $U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 1340$  м/с) вплоть до появления области перетяжки пламени.

Таким образом, как и в случае, описанном выше (см. рис 5), в данной ситуации также можно наблюдать гистерезисный цикл.

*Полуцикл А.* Наличие области перетяжки пламени, ее исчезновение и отрыв пламени при поджигании струи вблизи среза сопла и нарастании скорости ее истечения (позиция **A** –  $U_0 \approx 550$  м/с).

*Полуцикл В.* Процесс инверсии от оторвавшегося пламени к его присоединению и возникновению области перетяжки пламени при уменьшении скорости истечения струи в ситуации ее поджигания вдали от среза сопла (позиция **B** –  $U_0 \approx 300$  м/с).

*Диффузионное горение круглой струи водорода, истекающей из сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 2,7$  мм*

На рис. 16 представлены фотографии пламени при диффузионном горении струи водорода, истекающей из круглого сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 2,7$  мм в ситуации нарастания скорости ее истечения. При малой скорости ( $U_0 \leq 40$  м/с) истечения микроструи длина распространения ламинарного пламени достигает примерно 400 мм. С ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать появление облас-

ти перетяжки пламени. Дальнейший рост скорости истечения микроструи приводит к отрыву пламени от среза сопла и росту длины его распространения, превышающей  $h \approx 700$  мм при сверхзвуковом истечении микроструи по водороду ( $U_0 \geq 1284$  м/с).

Цель данного представления, как и в предыдущих случаях, состоит в том, чтобы показать процесс распространения пламени в пространстве, акцентируя внимание на достаточно большой его длине (порядка 700 мм), несмотря на малый диаметр отверстия выходного сопла  $d = 2,7$  мм. Тем не менее, основное внимание необходимо уделить рассмотрению области горения струи вблизи ее выхода из сопла. Более детально рассмотреть данную область дает возможность теневой метод исследования, позволяющий наблюдать ключевые структурные особенности диффузионного горения микроструи водорода по причине их зависимости от изменений градиента плотности газа как при его горении, так и без горения.

На рис. 17 представлены теневые картины пламени при горении круглой струи водорода и нарастании скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой  $U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} = 1340$  м/с.

Можно наблюдать наличие области перетяжки пламени с ламинарной струей и ламинарным пламенем сферической формы. Далее, с ростом скорости струи, можно наблюдать уменьшение размера области перетяжки пламени и отрыв пламени от среза сопла:  $h \approx 3$  мм при  $U_0 \approx 350$  м/с,  $h \approx 20$  мм при  $U_0 \approx 1170$  м/с и  $h \approx 40$  мм при  $U_0 \approx 1340$  м/с.

Таким образом, как показано выше, при диаметре (площади)  $d = 0,5$  мм ( $S = 0,2$  мм<sup>2</sup>) выходного отверстия круглого сопла наблюдается срыв пламени и отсутствие горения микроструи водорода. С другой стороны, наблюдалось стабильное сверхзвуковое горение как плоской ( $S = 0,9$  мм<sup>2</sup>) [9], так и круглой ( $S \approx 3$  мм<sup>2</sup>) [13] струи водорода с оторвавшимся от среза сопла пламенем, но с размером площади выходного отверстия (щели), более чем в четыре раза превышающем аналогичный параметр у круглой микроструи с диаметром выходного отверстия  $d = 0,5$  мм ( $S = 0,2$  мм<sup>2</sup>). Результаты настоящих экспериментальных исследований диффузионного горения круглой струи водорода, истекающей из круглых сопел с диаметром выходного отверстия сопла  $d = 1,2; 1,5; 2,7$  мм и площадью поперечного

сечения выхода сопла  $S = 1,1; 1,8; 5,7 \text{ мм}^2$ , соответственно, демонстрируют процесс сверхзвукового диффузионного горения с наличием сверхзвуковых ячеек, стабилизирующих горение, на скорости истечения струи, превышающей скорость звука по водороду ( $U_0 \geq 1284 \text{ м/с}$ ). Данный результат исследований коррелирует с результатами исследования диффузионного сверхзвукового горения плоской микроструи водорода, представленными впервые в работе [9]. Из этого можно сделать вывод, что сверхзвуковое диффузионное горение круглых микроструй водорода на скорости их истечения, превышающей сверхзвуковую скорость водорода, возможно при диаметре выходного отверстия микросопла, находящегося в пределах 1 мм и выше.

Таким образом, представленные результаты экспериментов указывают на то, что существует четыре основных сценария

диффузионного горения круглой микроструи водорода, как и для плоской [9], в зависимости от скорости ее истечения. Это следующие сценарии (рис. 18). Ламинарное горение при наличии ламинарной микроструи и ламинарного пламени (рис. 18, *a*,  $U_0 \leq 150 \text{ м/с}$ ). Возникновение и развитие области перетяжки пламени с ламинарной микроструей и пламенем сферической формы, наличием узкой области градиента плотности газа, преодолевая которую микроструя и пламя становятся турбулентными (рис. 18, *b*,  $U_0 \geq 150 \text{ м/с}$ ). Исчезновение области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла и сверхзвуковое горение микроструи относительно скорости звука в воздухе (рис. 18, *c*,  $U_0 \geq 330 \text{ м/с}$ ). Нарастание величины отрыва пламени от среза сопла и сверхзвуковое горение микроструи относительно скорости звука в водороде (рис. 18, *d*,  $U_0 \geq 1280 \text{ м/с}$ ).

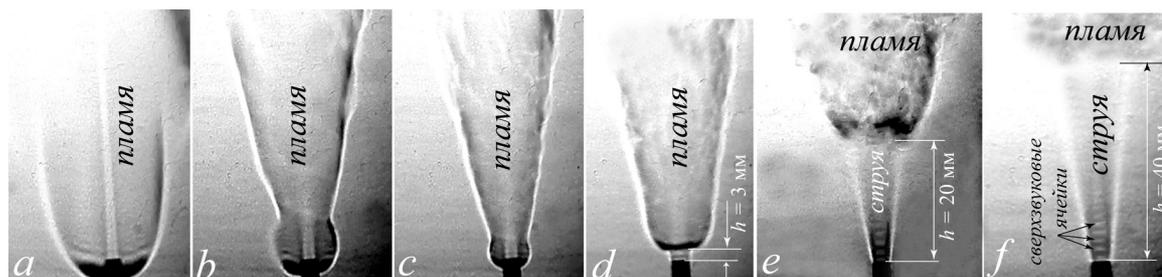


Рис. 17. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла ( $d = 2,7 \text{ мм}$ ,  $S \approx 6 \text{ мм}^2$ ) при различной скорости истечения ( $U_0$ , м/с): *a* – 52; *b* – 126; *c* – 189; *d* – 350 (отрыв пламени  $\approx 3 \text{ мм}$ ); *e* – 1240 (отрыв пламени  $\approx 20 \text{ мм}$ ); *f* – 1340 (отрыв пламени  $40 \text{ мм}$ )

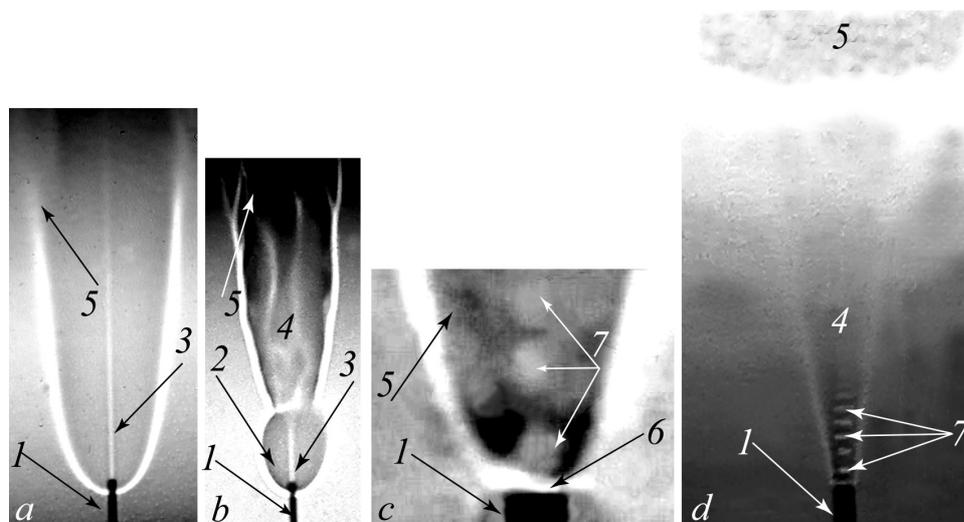
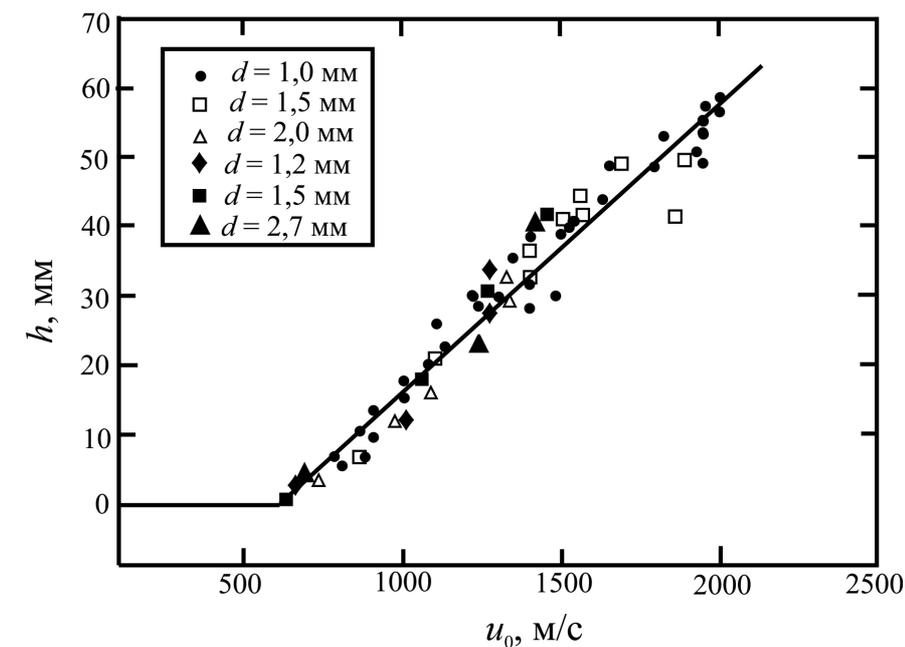
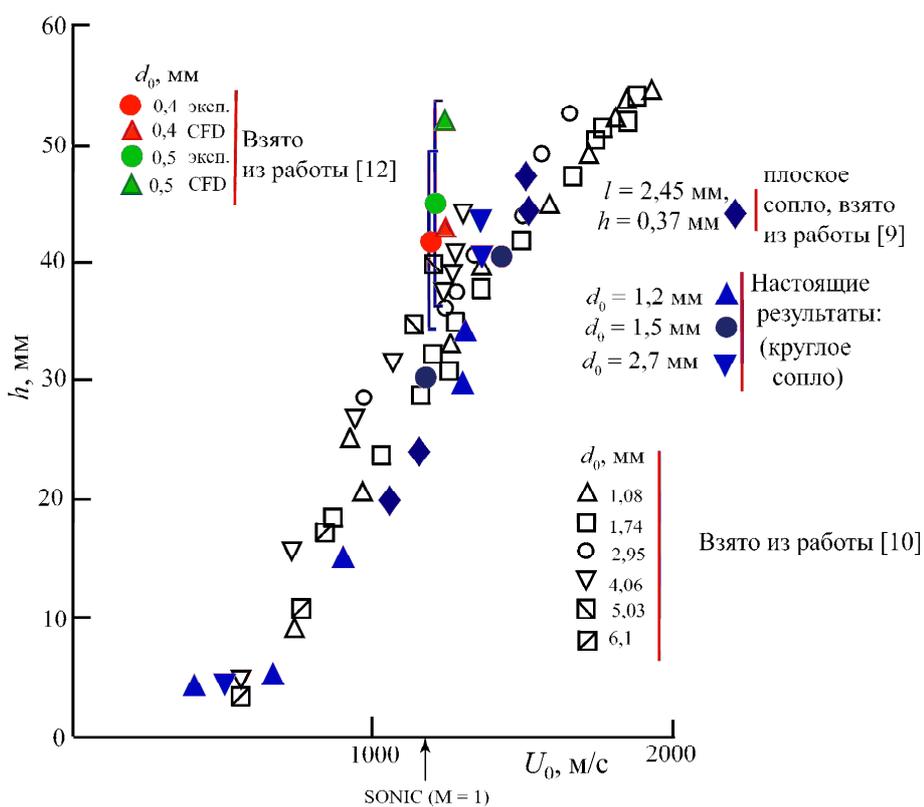


Рис. 18. Теневые картины четырех сценариев диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения (*a* –  $U_0 \leq 150 \text{ м/с}$ ; *b* –  $U_0 \geq 150 \text{ м/с}$ ; *c* –  $U_0 \geq 330 \text{ м/с}$ ; *d* –  $U_0 \geq 1280 \text{ м/с}$ ): 1 – микросопло, 2 – область перетяжки пламени, 3 – ламинарная микроструя, 4 – турбулентная микроструя, 5 – пламя, 6 – отрыв пламени, 7 – сверхзвуковые ячейки



а



б

Рис. 19. График зависимости величины отрыва пламени от скорости истечения круглых микроструй водорода при их диффузионном горении: а – по данным работы [11] (•, □, Δ) и настоящего исследования (♦, ■, ▲); б – по данным работ [9; 10; 12] и настоящего исследования

Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй во-

дорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представ-

лены в работах [10–12]. На рис. 19, *a* приведен график зависимости отрыва диффузионного пламени круглой микроструи водорода от скорости ее истечения по данным работы [11]. Видно, что зависимость линейная. Максимальная скорость, которую достигали авторы при  $d = 1$  мм, более чем в 1,5 раза превышает скорость звука в водороде, и с увеличением диаметра выходного отверстия сопла эта скорость уменьшалась, но, тем не менее, превышала скорость звука в водороде.

Следует заметить, что авторы работы [11] не приводят картин теневой визуализации течений, хотя они такие исследования проводили. Наблюдали ли они наличие сверхзвуковых ячеек в процессе горения струй на сверхзвуковой скорости, нигде не отмечено. Результаты экспериментальных исследований зависимости величины отрыва пламени от скорости при диффузионном горении круглых микроструи, полученные в данной работе, также нанесены на график (см. рис. 19, *a*). Видно хорошее совпадение наших экспериментальных данных с представленной зависимостью из работы [11]. Однако в отличие от данных работы [11] наши результаты исследования, указывающие на сверхзвуковое горение плоской микроструи, подкреплены одной из важных характеристик такого процесса, а именно наличием сверхзвуковых ячеек.

В презентации [12] представлены результаты экспериментов и численного моделирования (CFD) процесса горения недорасширенных водородных струй при сверхзвуковой скорости их истечения. Показано, что моделирование формы приподнятого пламени и высоты его отрыва коррелирует с результатами физического эксперимента. Обнаружено, что воспламенение круглой водородной микроструи ( $d = 0,3$  мм) не происходит, а при ( $d = 0,5$  мм) микроструя воспламенялась. Детально результаты исследований представлены в работе [10], где на график (рис. 19, *b*) нанесены данные эксперимента и численных расчетов. Здесь же были представлены данные, полученные в работе [9], и данные настоящих экспериментов.

## Выводы

В результате экспериментальных исследований диффузионного горения круглых микроструи водорода впервые представлено

четыре сценария диффузионного горения круглых микроструи водорода, включая сверхзвуковое горение при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. Установлено, что стабилизация дозвукового горения круглой микроструи водорода связана с наличием области перетяжки пламени, а стабилизация сверхзвукового горения микроструи – с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения круглых микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения). Установлено, что сверхзвуковое диффузионное горение круглых микроструи водорода (как по воздуху, так и по водороду) реализуется лишь в ситуации размера диаметра выходного микросопла в диапазоне 1 мм.

## Список литературы

1. 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. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.
2. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединённого диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 52–66.
3. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.
4. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air // Doklady Physics. 2016. Vol. 61. Issue 9. P. 457–462.
5. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 28–45.
6. Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental

study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets // *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier, 2018.

7. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (Part II) // *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier, 2016. Vol. 41. Issue 44. P. 20240–20249.

8. Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // *Сибирский физический журнал*. 2017. Т. 12, № 3. С. 62–73.

9. Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г., Вихорев В. В. Диффузионное горение плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости // *Сибирский физический журнал*. 2018. Т. 13, № 2. С. 23–36.

10. Kalghatgi G. T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air // *Combust. Sci. Technol.*, 1984. Vol. 41. Issue 1-2. P. 14–29.

11. Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечении газобразных топлив // *ФГВ*. 1977. Т. 14, № 5. С. 53–63.

12. Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V. Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations // *8<sup>th</sup> International Seminar on Fire and Explosion*. Hefei, China, 2016.

13. Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 2. Приподнятое пламя, сверхзвуковое течение // *Сибирский физический журнал*. 2017. Т. 12, № 2. С. 46–59.

14. Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A. Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet // *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier, 2017. Vol. 42. Issue 24. P. 15913–15924.

*Материал поступил в редколлегию 15.03.2018*

V. V. Kozlov<sup>1,2</sup>, G. R. Grek<sup>1</sup>, Yu. A. Litvinenko<sup>1,2</sup>  
A. G. Shmakov<sup>2,3</sup>, V. V. Vikhorev<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS  
3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

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

## **DIFFUSION COMBUSTION OF HYDROGEN ROUND MICROJET AT SUB- AND SUPERSONIC VELOCITY EFFLUX FROM NOZZLE**

The purpose of this work is experimental study of the round hydrogen jets diffusion combustion efflux from nozzles with different diameters of nozzle exit at sub- and supersonic velocity. As a result of the experimental studies the following results are received. Four scenarios of diffusion combustion of the hydrogen round microjets, including «supersonic burning» in the presence of supersonic cells as by air, and on hydrogen are for the first time submitted. It is found that stabilization of

the hydrogen round microjet subsonic burning is connected with existence of «bottleneck flame region», and «supersonic burning» of a microjet with existence of supersonic cells. Hysteresis of the hydrogen round microjets diffusion combustion is connected with the microjet ignition method of (near or far from a nozzle exit) and directions of the velocity change of its efflux (growth or reduction) is found. It is shown that «supersonic diffusion combustion» of the hydrogen round microjets as by air, and to hydrogen, is implemented only in a situation of the micronozzle diameter size outlet lying in the range of 1 mm.

*Keywords:* hydrogen round microjet, diffusion combustion, «bottleneck flame region», mean velocity profile, «supersonic combustion», hysteresis, schlieren method, shadow patterns.

*For citation:*

Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G., Vikhorev V. V. Diffusion Combustion of Hydrogen Round Microjet at Sub- and Supersonic Velocity Efflux from Nozzle. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 2, p. 37–52. (In Russ.)

DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-2-37-52