

**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 ПЛОСКОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЩЕЛЕВОГО МИКРОСОПЛА НА ДО- И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ\***

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости. В результате экспериментальных исследований получены следующие результаты. Впервые представлено четыре сценария диффузионного горения плоской 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 – с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения).

*Ключевые слова:* плоская микроструя водорода, диффузионное горение, «область перетяжки пламени», профиль скорости, сверхзвуковое горение, гистерезис.

### **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).

---

\* Работа поддержана грантом РНФ № 16-19-10330 и частично (использовалось координатное устройство) грантом РФФИ № 16-07-00946.

2. Возникновение сферической «области перетяжки пламени» с наличием в ней ламинарной 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 происходило 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.

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, наряду с рядом других, является наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работах [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. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [9–11].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей

диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла. Особое внимание будет уделено исследованию характеристик развития данной микроструи на сверхзвуковой (относительно воздуха  $U_0 = 331$  м/с и водорода  $U_0 = 1284$  м/с) скорости ее истечения и при наличии сверхзвуковых ячеек. Будет проведено сравнение результатов исследования с результатами, представленными в работах [9–11].

Заметим, что исследование характеристик диффузионного горения плоской микроструи при сверхзвуковой скорости будет проведено впервые, так как до сих пор исследовалось горение водорода, главным образом, лишь в круглых микроструях.

### Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1 представлена схема эксперимента. В установку соплового аппарата (а) 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 расхода водорода регистрировалось на электронном табло (см. b). В эксперименте водород поступал в установку соплового аппарата (а), состоящую из форкамеры (1) с набором детурбулизирующих сеток (2), хонейкомба (3), и далее через цилиндрический микроканал длиной 200 мм в щелевое микросопло с размерами 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 Теплера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.

Скорость истечения водорода ( $U_0$ , м/с) на выходе щелевого микросопла 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 отверстия выходной щели микросопла. Следует заметить,

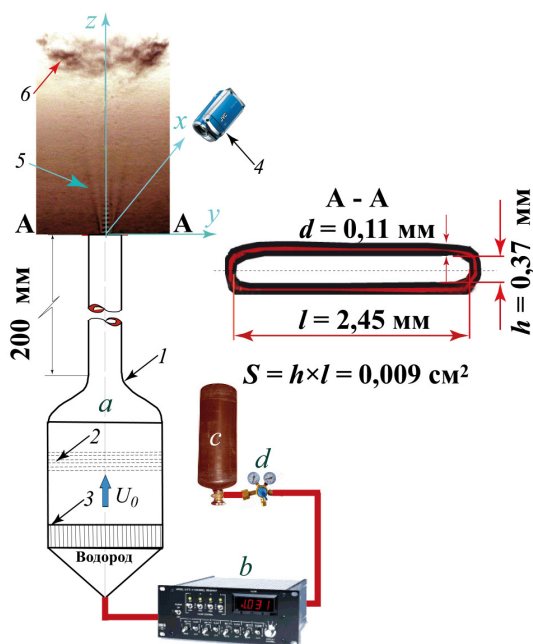


Рис. 1. Схема эксперимента: а – сопловой аппарат; б – блок управления электромагнитным клапаном расходомера; с – баллон сжатого водорода (100 атм.); d – редуктор. Сопловой аппарат (а) состоит из форкамеры (1), набора детурбулизирующих сеток (2), хонейкомба (3) и микротрубки длиной 200 мм с щелевым микросоплом. С помощью цифровой видеокамеры (4) фиксировались теневые картины сверхзвуковых ячеек (5) и оторвавшегося пламени (6)

что определение скорости истечения водорода из микросопла 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 микросопла ( $\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$ ). При этом  $U_0$ , м/с =  $\sqrt{2\Delta P/\rho}$ , где  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность водорода.

## Результаты экспериментов

### Фото пламени

На рис. 2 представлены фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла 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 уменьшение длины распространения турбулентного пламени ( $h \approx 150 \div 200$  мм). Дальнейший рост скорости истечения микроструи приводит к отрыву пламени от среза сопла и росту длины его распространения до  $h \approx 400$  мм при сверхзвуковом истечении микроструи по водороду ( $U_0 \approx 1284$  м/с)

Цель данного представления состоит в том, чтобы показать процесс распространения пламени в пространстве, акцентируя внимание на достаточно большую его длину (до полуметра), несмотря на малый размер выходной щели микросопла. Тем не менее основное внимание необходимо уделить рассмотрению области горения микроструи вблизи ее выхода из сопла. Более детально рассмотреть данную область позволяет 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.

*Теневые картины пламени при поджигании микроструи вблизи среза сопла в ситуации нарастания скорости (объемного расхода) водорода*

На рис. 3, 4 представлены теневые картины пламени при нарастании скорости  $U_0$  (объемного расхода  $Q$ ) истечения водорода в ситуации поджигания микроструи вблизи среза сопла. Можно наблюдать процесс эволюции области перетяжки пламени, ее исчезновения и отрыва пламени от среза сопла с постепенным ростом величины отрыва при сохранении горения турбулентной области пламени на большой скорости истечения микроструи  $U_0 \approx 778, 794$  м/с или  $Q \approx 700, 715$  см<sup>3</sup>/с.

*Теневые картины пламени при поджигании микроструи водорода вдали от среза сопла в ситуации уменьшения скорости (объемного расхода) водорода*

На рис. 5, 6 представлены теневые картины пламени при снижении скорости  $U_0$  (объемного расхода  $Q$ ) истечения водорода



Рис. 2. Фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из плоского ( $l = 2,45$  мм,  $h = 0,37$  мм) микросопла в ситуации нарастания скорости ее истечения:  $a-h$  – значение  $U_0$  от 40 до 1340 м/с, вид с узкой ( $h$ ) стороны микросопла

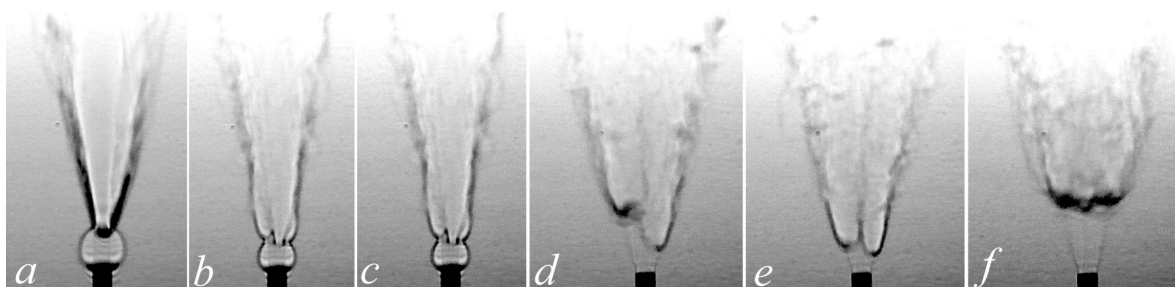


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского ( $l = 2,45$  мм,  $h = 0,37$  мм) микросопла при нарастании скорости истечения микроструи ( $U_0$ , м/с ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с)):  $a - 333$  (300);  $b - 500$  (450);  $c - 555$  (500);  $d - 611$  (550);  $e - 722$  (650);  $f - 778$  (700), вид с широкой ( $l$ ) стороны микросопла

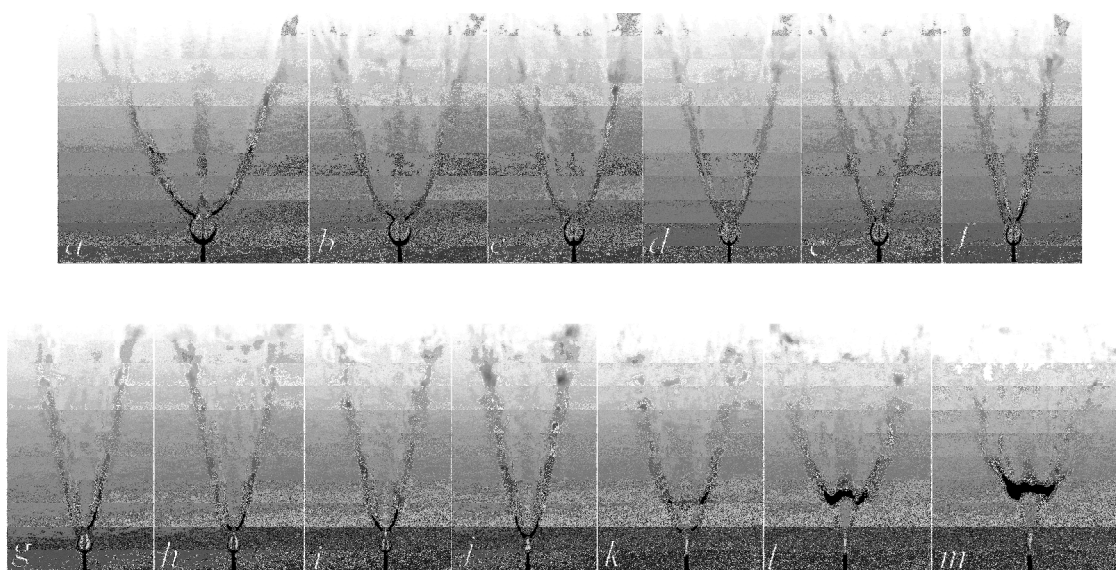


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского ( $l = 2,45$  мм,  $h = 0,37$  мм) микросопла при нарастании скорости истечения микроструи ( $U_0$ , м/с ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с)):  $a - 333$  (300);  $b - 389$  (350);  $c - 433$  (390);  $d - 455$  (409);  $e - 500$  (450);  $f - 522$  (470);  $g - 555$  (500);  $h - 589$  (530);  $i - 655$  (590);  $j - 711$  (640);  $k - 717$  (645);  $l - 755$  (680);  $m - 794$  (715), вид с узкой ( $h$ ) стороны микросопла

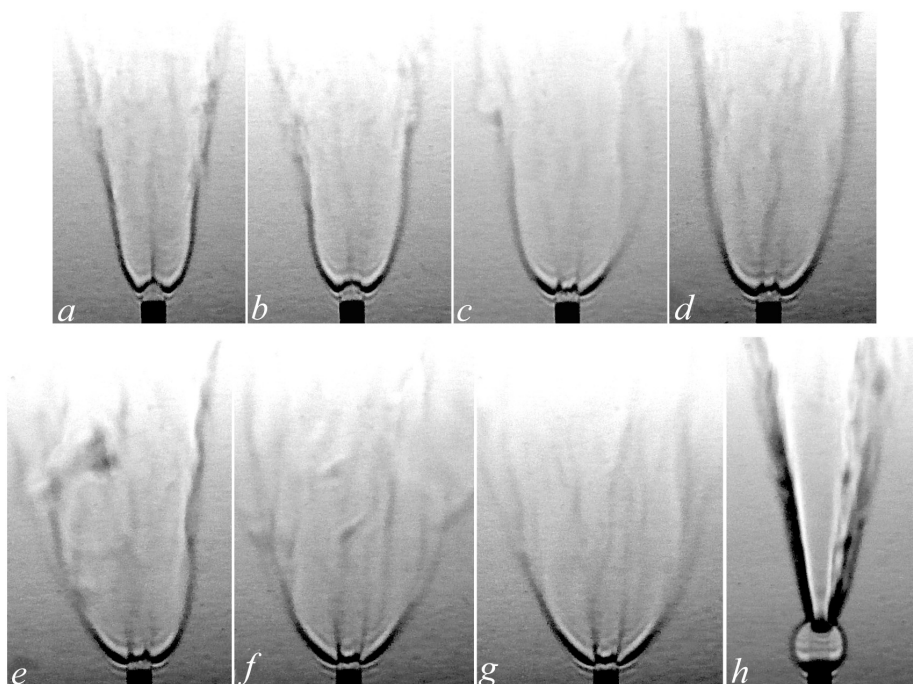


Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского ( $l = 2,45$  мм,  $h = 0,37$  мм) микросопла при снижении скорости истечения микроструи ( $U_0$ , м/с ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с)):  $a - 555$  (500);  $b - 500$  (450);  $c - 389$  (350);  $d - 378$  (340);  $e - 367$  (330);  $f - 355$  (319);  $g - 344$  (310);  $h - 333$  (300), вид с широкой ( $l$ ) стороны микросопла

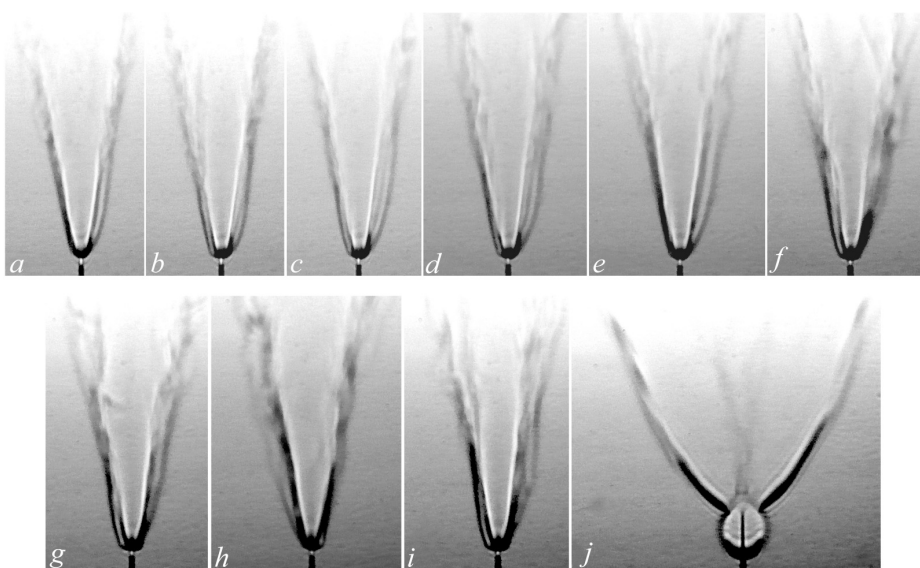


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского ( $l = 2,45$  мм,  $h = 0,37$  мм) микросопла при снижении скорости истечения микроструи ( $U_0$ , м/с ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с)):  $a - 444$  (400);  $b - 422$  (380);  $c - 400$  (360);  $d - 389$  (350);  $e - 378$  (340);  $f - 367$  (330);  $g - 355$  (319);  $h - 348$  (313);  $i - 340$  (306);  $j - 333$  (300), вид с узкой ( $h$ ) стороны микросопла

в ситуации поджигания микроструи вдали от среза сопла. Можно наблюдать отрыв пламени от среза сопла, постепенное уменьшение

величины отрыва и, наконец, присоединение пламени с образованием области перетяжки пламени при  $U_0 \approx 333$  м/с или  $Q \approx 300$  см<sup>3</sup>/с.

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

На рис. 7 представлен график процесса развития и исчезновения области перетяжки пламени в зависимости от снижения или нарастания скорости истечения плоской микроструи водорода. График ясно демонстрирует наличие гистерезиса в данном процессе. При поджигании микроструи вблизи среза сопла область перетяжки пламени, нагревая выход сопла, дает возможность существования данной области до момента ее исчезновения и возникновения отрыва пламени при достаточно большой скорости истечения микроструи ( $U_0 \approx 590$  м/с). Однако при снижении скорости истечения микроструи процесс инверсии отрыва пламени на его присоединение с появлением области перетяжки пламени происходит при  $U_0 \approx 333$  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 микроструи 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 микроструи в ситуации ее поджигания вдали от среза сопла (позиция В).

*Сверхзвуковое горение плоской микроструи водорода при наличии сверхзвуковых ячеек относительно скорости звука в воздухе (331 м/с) и водороде (1284 м/с)*

На рис. 8 показаны профили средней ( $U$ ) и пульсационной ( $u'$ ) составляющих скорости при истечении плоской микроструи из щелевого микросопла [12]. По причине значительного удлинения микросопла  $l/h \approx 500$ , где  $l$  (200 мм) – длина микросопла,  $h$  (0,4 мм) – ширина выходной щели микросопла, профиль скорости на срезе сопла имеет параболическую форму [12]. В процессе исследований измерялась среднерасходная скорость  $U_0 = Q/S$ , которая примерно в 1,2 раза меньше максимальной скорости на оси микросопла.

На рис. 9 показаны теньевые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на дозвуковой  $U_0 \leq 333$  м/с (а) и сверхзвуковой (б)  $U_0 \approx 400$  м/с скорости. Видна классическая картина дозвукового горения микроструи водорода, в частности плоской микроструи (а), детально исследованная в работах [1–5]. С другой стороны, можно наблюдать теньевую картину сверх-

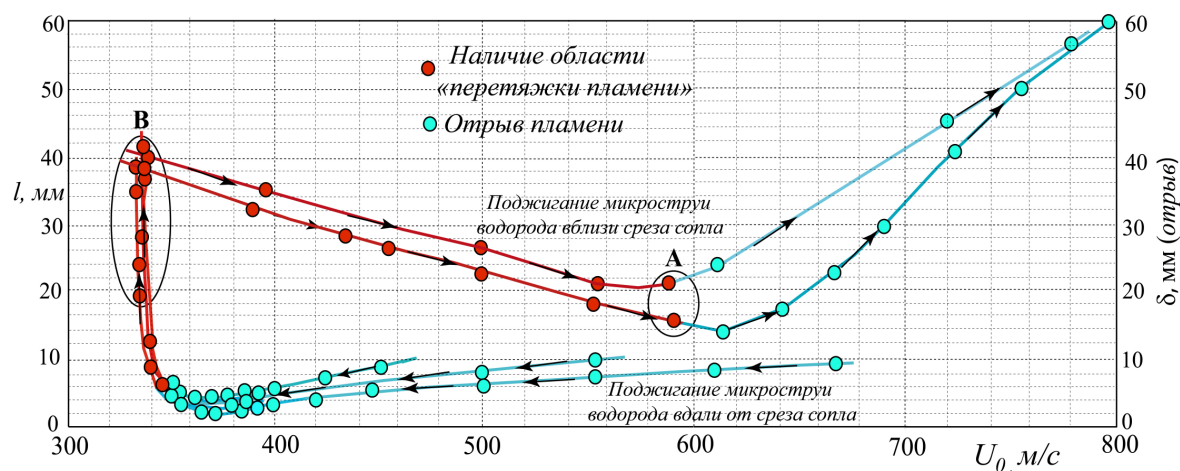


Рис. 7. График (гистерезис) зависимости процесса развития пламени микроструи водорода от скорости ее истечения и способа поджигания (вблизи / вдали от среза сопла), диапазон скорости исчезновения области перетяжки пламени и начало отрыва пламени (А) и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления области перетяжки пламени (В). Стрелками указано направление изменения скорости микроструи (увеличение / уменьшение)

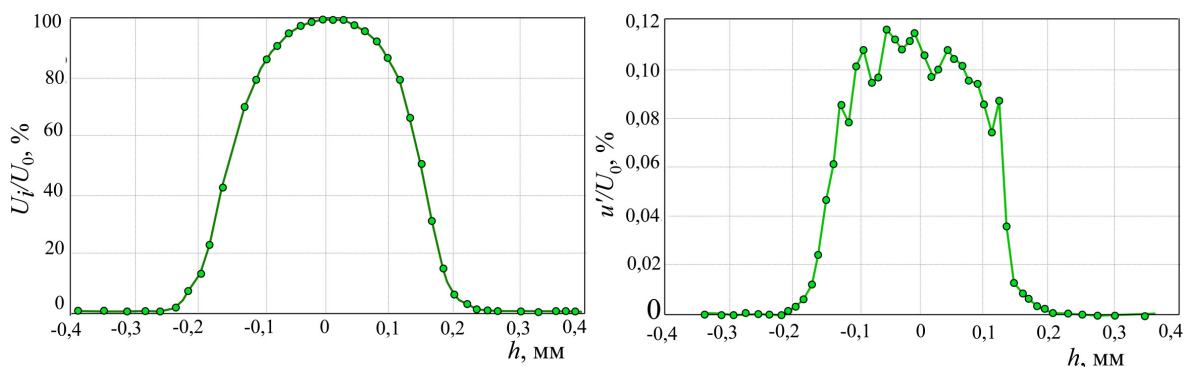


Рис. 8. Профили средней ( $U$ ) и пульсационной ( $u'$ ) составляющих скорости на срезе плоского микросопла

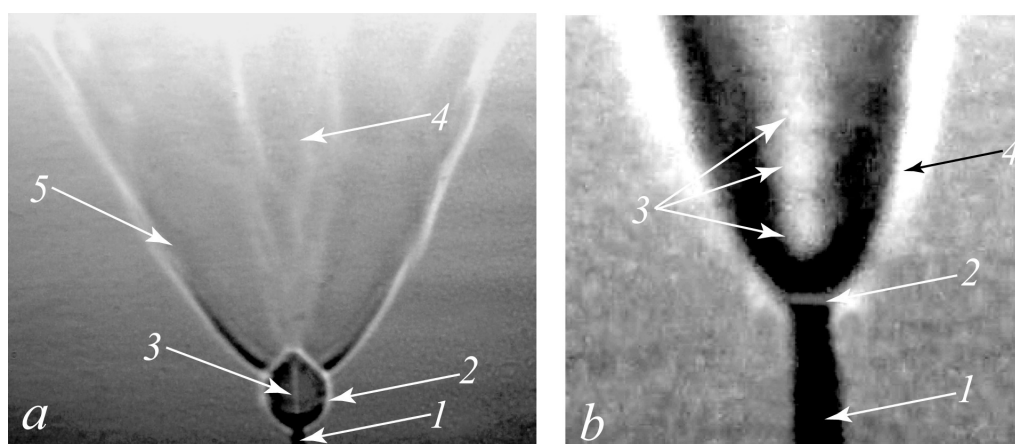


Рис. 9. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на дозвуковой ( $a$ ) и сверхзвуковой ( $b$ ) скорости относительно скорости звука в воздухе  $U_{\text{воздух}} = 331$  м/с ( $a$ : 1 – микросопло; 2 – область перетяжки пламени; 3 – ламинарная микроструя; 4 – турбулентная микроструя; 5 – турбулентное пламя;  $b$ : 1 – микросопло; 2 – отрыв пламени; 3 – сверхзвуковые ячейки; 4 – турбулентная микроструя). Можно наблюдать возникновение сверхзвуковых ячеек внутри оторвавшегося от сопла пламени, вид на узкую сторону микросопла ( $U_0 \approx 400$  м/с)

звукового горения плоской микроструи водорода с отрывом пламени от среза сопла и наличием сверхзвуковых ячеек в нем ( $b$ ). Причем в данной ситуации можно наблюдать сверхзвуковые ячейки, характерные для сверхзвукового горения (относительно скорости звука в воздухе) круглой микроструи водорода, исследованного в работе [13].

*Сверхзвуковое истечение воздуха и водорода из плоского микросопла при наличии и отсутствии горения*

На рис. 10 показано сравнение теневой картины, взятой из работы [14], сверхзвукового истечения плоской микроструи воздуха с аналогичными теневыми картинками исте-

чения плоской микроструи водорода как в отсутствие его горения, так и при горении. Во всех трех случаях можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек.

*Сверхзвуковое горение плоской микроструи водорода при наличии сверхзвуковых ячеек относительно скорости звука в водороде (1284 м/с)*

На рис. 11 представлены теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла при скорости истечения  $U_0 \approx 1484$  м/с, вид на узкую (I) и широкую (II) стороны микросопла:  $a$  – без горения,  $b$  – с горением. Можно наблюдать наличие сверхзвуковых

ячеек.  $U_0 = Q/S$ ,  $Q = 1345 \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $S = 0,00906 \text{ см}^2$ ,  $U_0 = 1484 \text{ м/с}$ .  $U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho}$ ,  $\Delta P = 4,5 \text{ атм.} = 45000 \text{ кгс/м}^2$ ,  $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$ ,  $U_0 = \sqrt{90000/0,09} = 1000 \text{ м/с}$ . Учитывая, что  $U_0 = 1000 \text{ м/с}$  – среднерасходная скорость микроструи, а профиль скорости параболический, максимальная скорость достигает скорости звука по водороду  $U_0 \approx 1284 \text{ м/с}$ .

На рис. 12 показаны теневые картины сверхзвукового  $U_0 \approx 1484 \text{ м/с}$  (a) и дозвукового  $U_0 \approx 1258 \text{ м/с}$ ,  $U_0 \approx 1159 \text{ м/с}$  (b, c соответственно) диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла. Сверхзвуковые ячейки можно наблюдать на сверхзвуковой скорости микроструи (a) и их отсутствие при

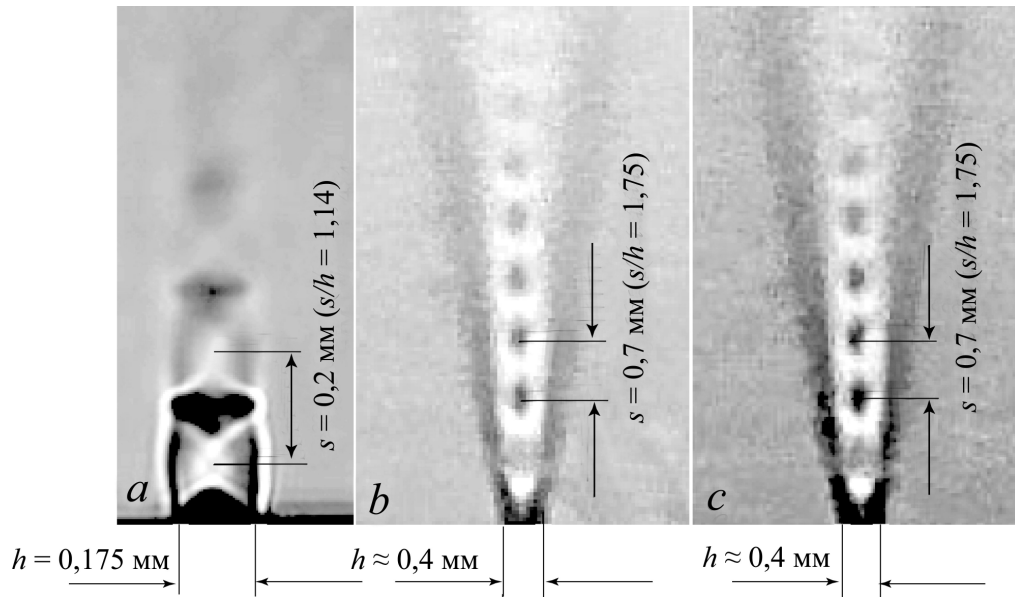


Рис. 10. Теневые картины микроструи воздуха (a) и водорода (b) без горения и при диффузионном горении (c), истекающих на сверхзвуковой скорости ( $M > 1$ ) из плоского микросопла при наличии сверхзвуковых ячеек. Размеры плоского микросопла:  $h = 0,175 \text{ мм}$ ,  $l = 3,9 \text{ мм}$  (a) взято из работы [14],  $h \approx 0,4 \text{ мм}$ ,  $l \approx 2,7 \text{ мм}$  (b, c) в данных экспериментах

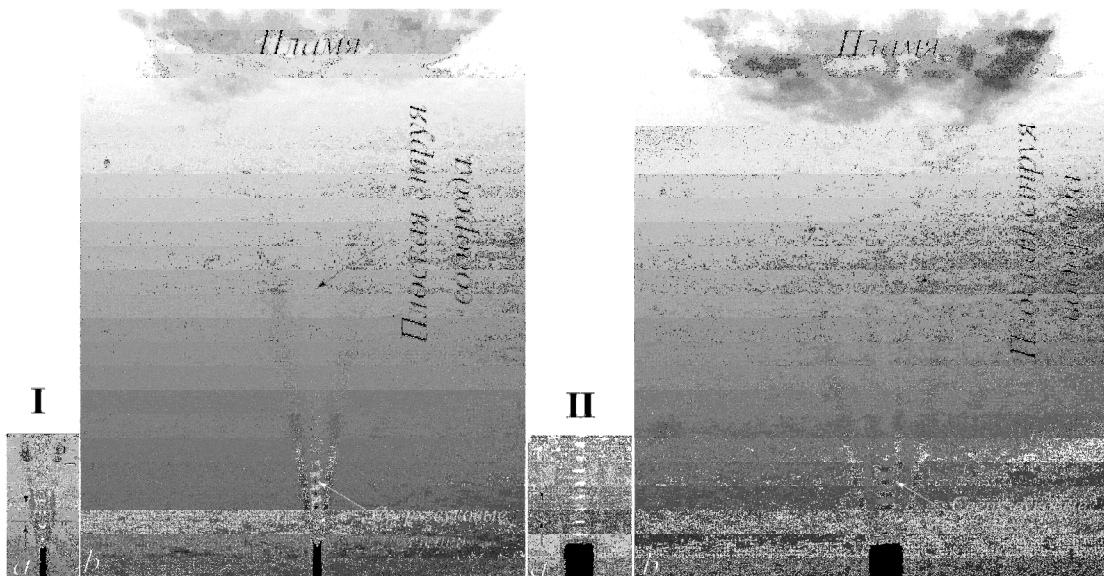


Рис. 11. Теневая картина диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла при скорости истечения  $U_0 \approx 1484 \text{ м/с}$ , вид на узкую (I) и широкую (II) стороны микросопла: a – без горения, b – с горением



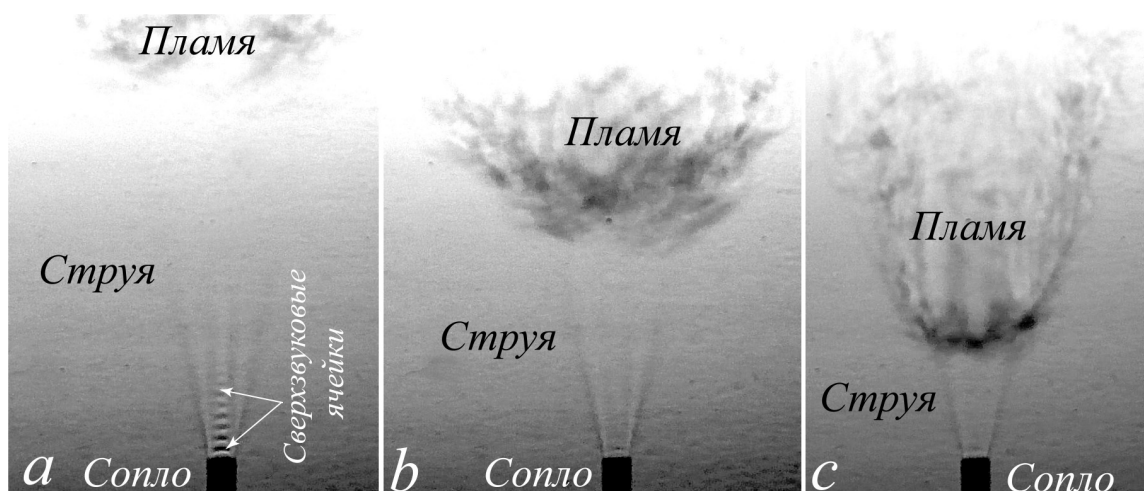


Рис. 12. Теневые картины сверхзвукового  $U_0 \approx 1484$  м/с (а) и дозвукового  $U_0 \approx 1258$  м/с,  $U_0 \approx 1159$  м/с (b, c) диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла. Сверхзвуковые ячейки можно наблюдать на сверхзвуковой скорости микроструи (а) и их отсутствие при выходе на дозвуковую скорость истечения и горения микроструи (b, c). Вид на широкую ( $l$ ) сторону микросопла

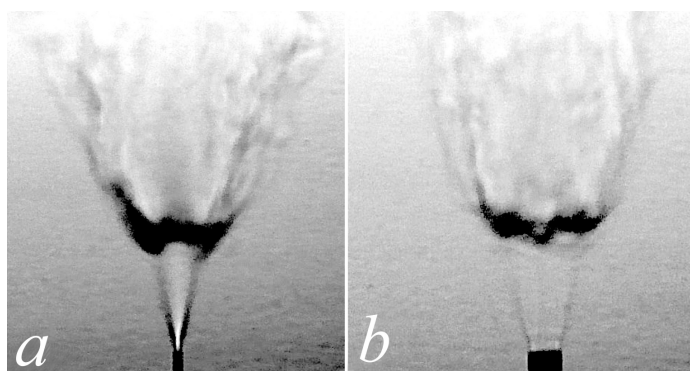


Рис. 13. Теневые картины микроструи и пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода. Можно увидеть изменения формы и конфигурации микроструи и пламени в зависимости от стороны наблюдения (а – ширина щели ( $h$ ); b – длина щели ( $l$ )) и при отрыве пламени ( $U_0 \approx 1159$  м/с)

выходе на дозвуковую скорость истечения и горения микроструи (b, c).

На рис. 13 представлены теневые картины микроструи и пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода. Можно наблюдать изменения формы и конфигурации как микроструи, так и пламени в зависимости от стороны наблюдения: а – ширина щели ( $h$ ), b – длина щели ( $l$ ). В данной ситуации показано горение микроструи при отрыве пламени на скорости ее истечения  $U_0 \approx 1159$  м/с.

На рис. 14 показаны теневые картины плоской микроструи водорода вблизи среза сопла в увеличенном масштабе в отсутствие

горения, но при максимальной скорости истечения ( $U_0 \approx 1484$  м/с). Можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек.

На рис. 15 представлены теневые картины отрыва пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода при различной скорости ее истечения. Можно наблюдать, как меняется величина отрыва пламени от среза сопла в данной ситуации: а –  $h \approx 45$ – $54$  мм при  $U_0 \approx 1484$  м/с; b –  $h \approx 20$ – $23$  мм при  $U_0 \approx 1258$  м/с.

На рис. 16 показано сравнение теневых картин сверхзвукового течения плоской микроструи воздуха (а – взято из работы [14], b, c – настоящие исследования) и водо-

рода в отсутствие горения (*d*). Во всех случаях можно ясно видеть сверхзвуковые ячейки различного масштаба и периодичности в зависимости от параметров выходной щели микросопла. Рис. 16, *e* демонстрирует процесс сверхзвукового диффузионного горения плоской микроструи водорода при наличии сверхзвуковых ячеек.

Таким образом, представленные результаты экспериментов указывают на то, что существует четыре основных сценария диффузионного горения плоской (как и для круглой [1; 3–7]) микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения. Это следующие сценарии (рис. 17). Ламинарное горение при наличии ламинарной микро-

струи и ламинарного пламени (рис. 17, *a*,  $U_0 \leq 150$  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. 17, *b*,  $U_0 \geq 150$  м/с). Исчезновение области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла и сверхзвуковое горение микроструи относительно скорости звука в воздухе (рис. 17, *c*,  $U_0 \geq 330$  м/с). Нарастание величины отрыва пламени от среза сопла и сверхзвуковое горение микроструи относительно скорости звука в водороде (рис. 17, *d*,  $U_0 \geq 1280$  м/с).

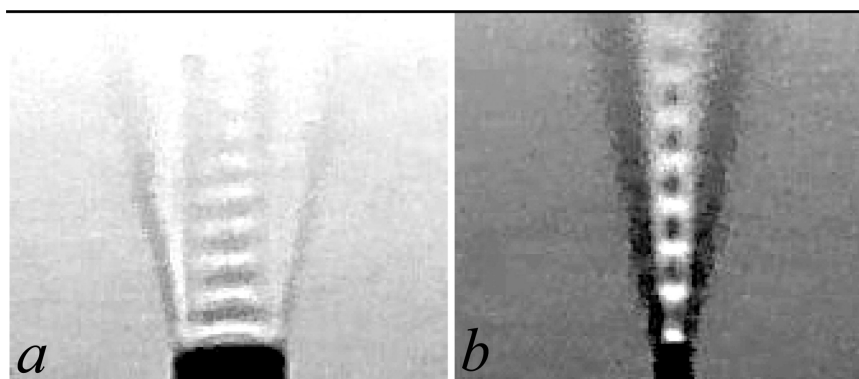


Рис. 14. Теневые картины плоской микроструи водорода в отсутствие горения, но при максимальной скорости истечения ( $U_0 \approx 1484$  м/с): наличие сверхзвуковых ячеек по водороду ( $U_{\text{водород}} = 1284$  м/с), вид со стороны *l* (*a*) и *h* (*b*)

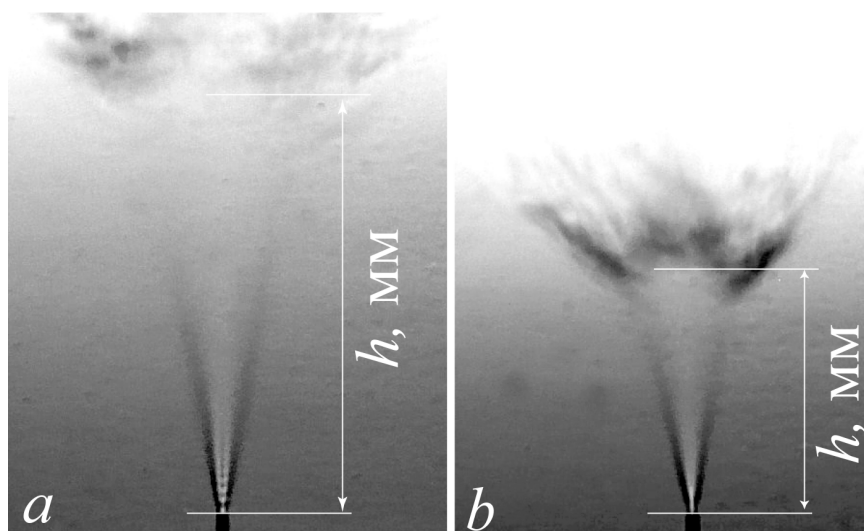


Рис. 15. Теневые картины пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода при различной скорости ее истечения: *a* –  $U_0 \approx 1484$  м/с ( $h \approx 45\text{--}54$  мм); *b* –  $U_0 \approx 1258$  м/с ( $h \approx 20\text{--}23$  мм)

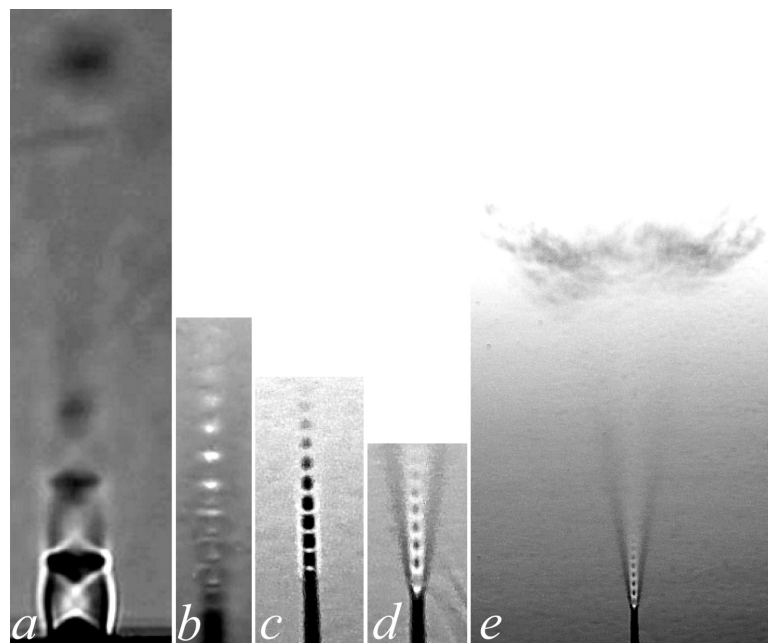


Рис. 16. Сравнение теневых картин сверхзвукового течения плоской микроструи воздуха (а–с) и водорода без горения (d) и с горением (e) при наличии сверхзвуковых ячеек: ширина микросопла  $h = 0,175$  мм (a) и  $h \approx 0,4$  мм (b–e). Вид на узкую (a) и широкую (b) сторону и со стороны микросопла (c–e)

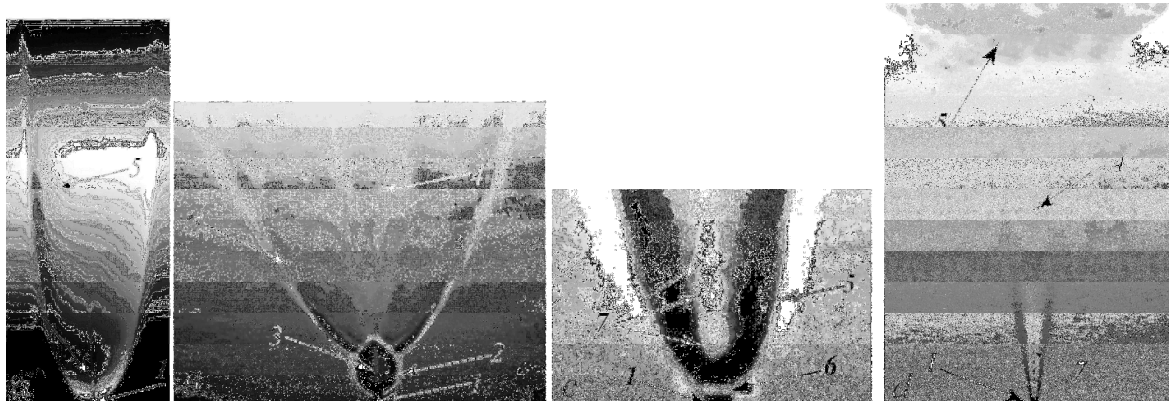


Рис. 17. Теневые картины четырех сценариев диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения (a,  $U_0 \leq 150$  м/с; b,  $U_0 \geq 150$  м/с; c,  $U_0 \geq 330$  м/с; d,  $U_0 \geq 1280$  м/с): 1 – микросопло, 2 – «область перетяжки пламени», 3 – ламинарная микроструя, 4 – турбулентная микроструя, 5 – пламя, 6 – отрыв пламени, 7 – сверхзвуковые ячейки.

Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально рассмотрены в работах [9–11]. На рис. 18, а представлен график зависимости отрыва диффузионного пламени круглой микроструи водорода от скорости ее истечения по данным работы [10]. Видно, что зависимость линейная. Максимальная скорость,

которую достигли 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 [10] не приводят картин теневой визуализации течений, хотя они такие исследования проводили. Наблюдали ли они наличие сверхзвуковых ячеек

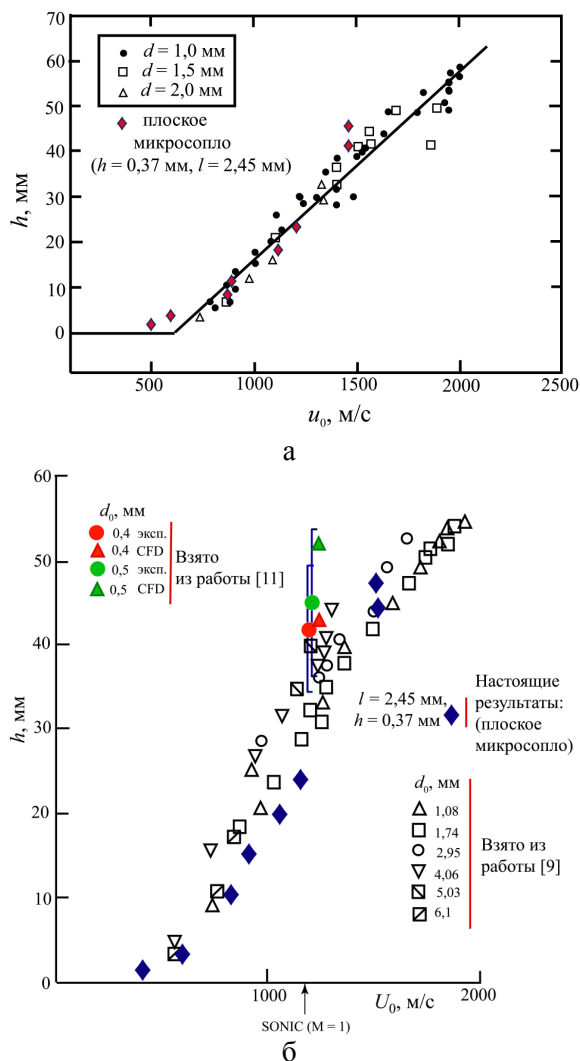


Рис. 18. График зависимости величины отрыва пламени от скорости истечения плоской микроструи водорода при ее диффузионном горении: *a* – по данным работы [10]; *б* – по данным работ [9; 11] и настоящего исследования

в процессе горения струй на сверхзвуковой скорости, нигде не отмечено. Результаты экспериментальных исследований зависимости величины отрыва пламени от скорости при диффузионном горении плоской микроструи, полученные в данной работе, также нанесены на график (см. рис. 18, *a*). Видно хорошее совпадение наших экспериментальных данных с представленной зависимостью из работы [10]. Однако в отличие от данных работы [10] наши результаты исследования, указывающие на сверхзвуковое горение плоской микроструи, подкреплены одной из важных характеристик такого процесса – наличием сверхзвуковых ячеек.

В презентации [11] 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 при  $d = 0,3$  мм не происходит, а при  $d = 0,5$  мм микроструя воспламенялась. Детально результаты исследований представлены в работе [9], где на график (см. рис. 18, *б*) нанесены данные эксперимента и численных расчетов. Здесь же отображены результаты наших экспериментов.

Таким образом, данные экспериментальных исследований диффузионного горения плоской микроструи водорода хорошо коррелируют с результатами экспериментальных и численных исследований диффузионного горения круглых струй водорода, изученных авторами работ [9–11].

## Выводы

В результате экспериментальных исследований диффузионного горения плоской микроструи водорода получены следующие результаты. Впервые представлено четыре сценария диффузионного горения плоской 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 плоской микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения).

## 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 присоединенного 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, iss. 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, iss. 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. Kalghatgi G. T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air // *Combust. Sci. Technol.* 1984. Vol. 41, iss. 1-2. P. 14–29.
10. Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газобразных топлив // *Химическая физика*. Водород, параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. С. 53–63.
11. 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.
12. 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, iss. 24. P. 15913–15924.
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. Aniskina V. M., Maslov A. A., Mironov S. G., Tsyryulnikov I. S., Timofeev I. V. An Experimental Study of the Structure of Supersonic Flat Underexpanded Microjets // *Technical Physics Letters*. 2015. Vol. 41. No. 5. P. 508–510.

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 PLANE HYDROGEN MICROJET EFFLUX FROM SLOTTED MICRONOZZLE AT SUB- AND SUPERSONIC VELOCITY**

The purpose of this work is experimental study of the plane hydrogen microjet diffusion combustion efflux from slotted micronozzle at sub - and supersonic velocity. As a result of these studies the following results are received. For the first time, four scenarios of the plane hydrogen microjet diffusion combustion, including supersonic combustion in the presence of supersonic cells as by air, and on hydrogen are found. It is shown that stabilization of subsonic combustion of the hydrogen microjet is connected with existence of «bottleneck flame region». On the other hand, stabilization of supersonic combustion of the hydrogen microjet is connected with existence of the supersonic cells. The hysteresis of the plane hydrogen microjet diffusion combustion depending on microjet ignition (near or far from a nozzle exit) and direction of its velocity efflux change (growth or reduction) is found.

*Keywords:* hydrogen plane microjet, diffusion combustion, «bottleneck flame region», mean velocity profile, sub – and supersonic combustion, hysteresis.

*For citation:*

Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G., Vikhorev V. V. Diffusion Combustion of Plane Hydrogen Microjet Efflux from Slotted Micronozzle at Sub- and Supersonic Velocity. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 2, p. 23–36. (In Russ.)

DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-2-23-36