

**В. В. Козлов<sup>1,3</sup>, Г. Р. Грек<sup>1</sup>, О. П. Коробейничев<sup>2</sup>  
Ю. А. Литвиненко<sup>1</sup>, А. Г. Шмаков<sup>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> *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН  
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

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

## **ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В КРУГЛОЙ И ПЛОСКОЙ МИКРОСТРУЕ В ПОПЕРЕЧНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ И ИХ СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ГОРЕНИЯ ПРОПАНА В ТЕХ ЖЕ УСЛОВИЯХ \***

Представлены экспериментальные исследования особенностей горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса. Результаты сравниваются с результатами, полученными при горении пропана, исследованного нами ранее при тех же экспериментальных условиях. Показано, что поднятое над срезом сопла пламя при диффузионном горении пропана в круглой микроструе, находящееся под воздействием поперечного акустического поля, подвержено раздвоению. Это явление связано с развитием синусоидального колебательного процесса, возникающего при воздействии поперечного акустического поля. Для случая горения плоской микроструи водорода поднять пламя не удалось, но эффект раздвоения проявился при скоростях, близких к 450 м/с. В этом случае акустические возмущения генерируются микроструей, а синусоидальная неустойчивость является типичной для плоских струй.

*Ключевые слова:* струя круглая микроструя, плоская микроструя, горение водорода, горение пропана, акустика.

### **Введение**

Основой современной энергетики является потребление главным образом углеводородного сырья: угля, нефти и природного газа (этан, бутан, пропан, этилен и т. д.). Объемы потребления экономикой нашей страны этих не возобновляемых источников энергии достигает 80 %, и, как полагает большинство специалистов, их запасов в недрах земли хватит не более чем на 50–100 лет. Доля же потребления альтернативных (возобновляемых) источников энергии, та-

ких как солнечная, ветровая и др., хотя и растет, однако составляет незначительную величину и совместно с гидро- и ядерной энергетикой занимают объем потребления в нашей стране не более 20 %.

В этой связи возникает большой интерес к развитию водородной энергетики, основой которой является сжигание абсолютно экологически чистого топлива – водорода, запасы которого в мировом океане практически бесконечны, если иметь в виду, что одним из продуктов горения водорода в среде кислорода, за вычетом получаемой

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-31166 мол\_а)

*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.

тепловой энергии, является обыкновенная вода. Однако развитию водородной энергетики мешает нерешенность целого ряда проблем, связанных со свойствами водорода, в первую очередь с его взрывоопасностью. Водородная энергетика пока не получила широкого применения. Методы получения водорода, способы его хранения и транспортировки, которые рассматриваются как перспективные для водородной энергетики, находятся пока на стадии опытных разработок и лабораторных исследований.

Особый интерес представляет процесс горения водорода при его струйном истечении из различного типа горелок, форсунок, сопел и т. д. Водород горит бледным, слабоокрашенным пламенем. Горелка, работающая на смеси водород-кислород, может дать пламя с температурой более 2 500 °С, при горении водорода на воздухе достигается температура около 2 000 °С. При работе с водородом необходимо постоянно учитывать его высокую пожаро- и взрывоопасность, причем взрывоопасность водорода повышена из-за высокой способности газа к диффузии даже через твердые материалы, что особенно важно для выбора материала сосудов при его хранении. Физико-химические свойства струйного горения водорода широко исследуются во всем мире как теоретически, так и экспериментально. Определенный интерес вызывает диффузионное горение водорода в воздушной среде как с точки зрения повышения устойчивости пламени, так и с точки зрения снижения вредных выбросов в атмосферу оксидов азота NO<sub>x</sub>. В связи с этим возникает важный вопрос возможности влиять на эти процессы с помощью различных методов управления, такого, например, как акустика. В работе [1] исследовалось воздействие акустики на снижение выброса оксидов азота и устойчивость приподнятого пламени в диффузионной турбулентной водородной струе. Показано, что эмиссия NO<sub>x</sub> была уменьшена и минимизирована на частоте акустического резонанса. Вихрь, который был генерирован воздействием акустики, способствовал росту подсоса воздуха и повышал степень смешения топливо-воздух. Этот эффект приводил к более низкой температуре пламени и, таким образом, понижал эмиссию NO<sub>x</sub>. В работе [2] исследовано динамическое поведение диффузионного турбулентного пламени водорода в ближнем поле при аку-

стическом воздействии на резонансной частоте струи воздуха. Частота резонанса была выбрана для возбуждения струи воздуха из-за его способности эффективно усиливать амплитуду акустики и уменьшать эмиссию NO<sub>x</sub>. При наложении акустических пульсаций на частоте резонанса во внешнем слое смешения коаксиальной воздушной струи формируется вихрь. Акустическое возбуждение приводило к колебаниям скорости коаксиальной воздушной струи, так же как и струи водорода. Вихрь, который периодически генерировался акустическим возбуждением, увеличивал интенсивность смешения водорода с воздухом, нормализуя при этом длину пламени (уменьшая ее на 15 %) и повышая устойчивость пламени. Это приводило к 25 %-му сокращению эмиссии NO<sub>x</sub> по сравнению со струей без акустического возбуждения в том же самом соотношении скорости между коаксиальной струей воздуха и скоростью водородной струи.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса и их сравнение с результатами изучения горения пропана, проведенного нами ранее [3] в тех же экспериментальных условиях. Заметим, что в настоящих экспериментах для визуализации пламени при горении в водородную струю добавлялся гептан.

### Круглая микроструя без горения в поперечном акустическом поле

Как показано в работе [4], ламинарная круглая микроструя подвержена уплощению и раздвоению в поперечном акустическом поле (рис. 1).

*Влияние поперечного акустического поля на горение пропана в круглой микроструе.* Условия проведения экспериментов представлены ниже.

ПРОПАН (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) – сопло:

$$d_{\text{сопло}} = 0,001; 0,0005 \text{ м};$$

$$\mu = 8,01 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}\cdot\text{с};$$

$$\rho = 2,019 \text{ кг/м}^3;$$

$$v = \mu / \rho = 0,00000397 \text{ м}^2/\text{с при } T = 18 \text{ }^\circ\text{C}, P = 1 \text{ атм.};$$

$$Re_{\text{пропан}} = u_{\text{пропан}} \times d_{\text{сопло}} / \nu \quad (u_{\text{пропан}} = 16,6; 12,5 \text{ м/с});$$

$$Re_{\text{пропан}} = 4 \text{ 181 и } 1 \text{ 574}$$

Обнаружено, что оторвавшееся от среза сопла пламя при диффузионном горении пропана в круглой микроструе, находящейся под воздействием поперечного акустического поля, подвержено раздвоению (рис. 2). Причина данного явления связана с синусоидальным колебательным процессом уплощенной воздействием поперечного акустического поля (см. рис. 1) круглой струи.

Влияние акустического поля на горение водорода в круглой микроструе. Условия проведения экспериментов представлены ниже.

ВОДОРОД ( $H_2$ ) – сопло:

$$d_{\text{сопло}} = 0,001 \text{ м};$$

$$u_{\text{водород}} = 109, 146, 182, 219, 291, 328, 375 \text{ м/с};$$

$$\rho = 0,08988 \text{ кг/м}^3;$$

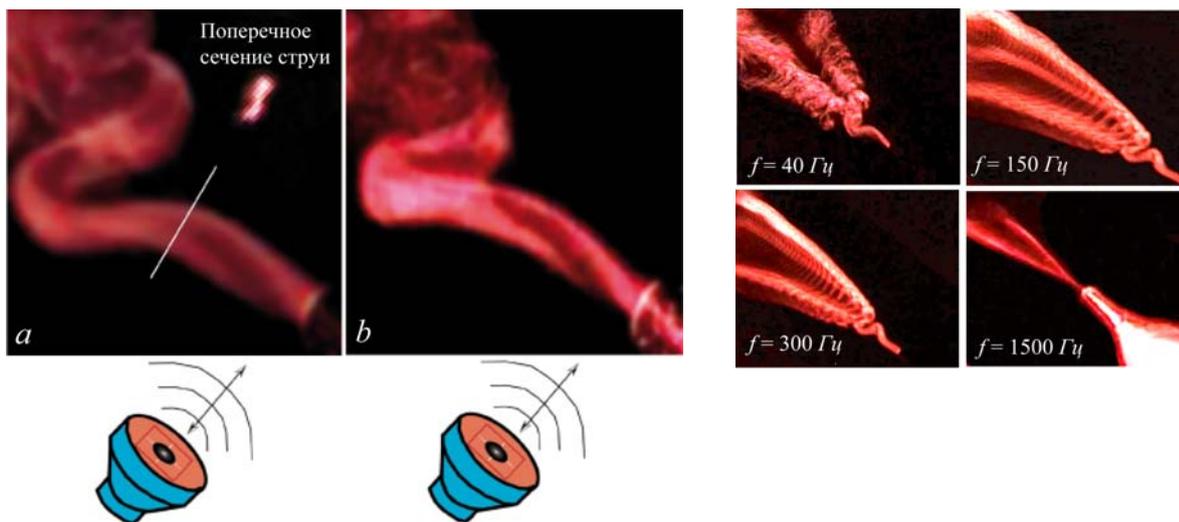


Рис. 1. Картины визуализации дымом процесса уплощения (слева) и раздвоения (справа) круглой микроструи без горения в поперечном акустическом поле [4]

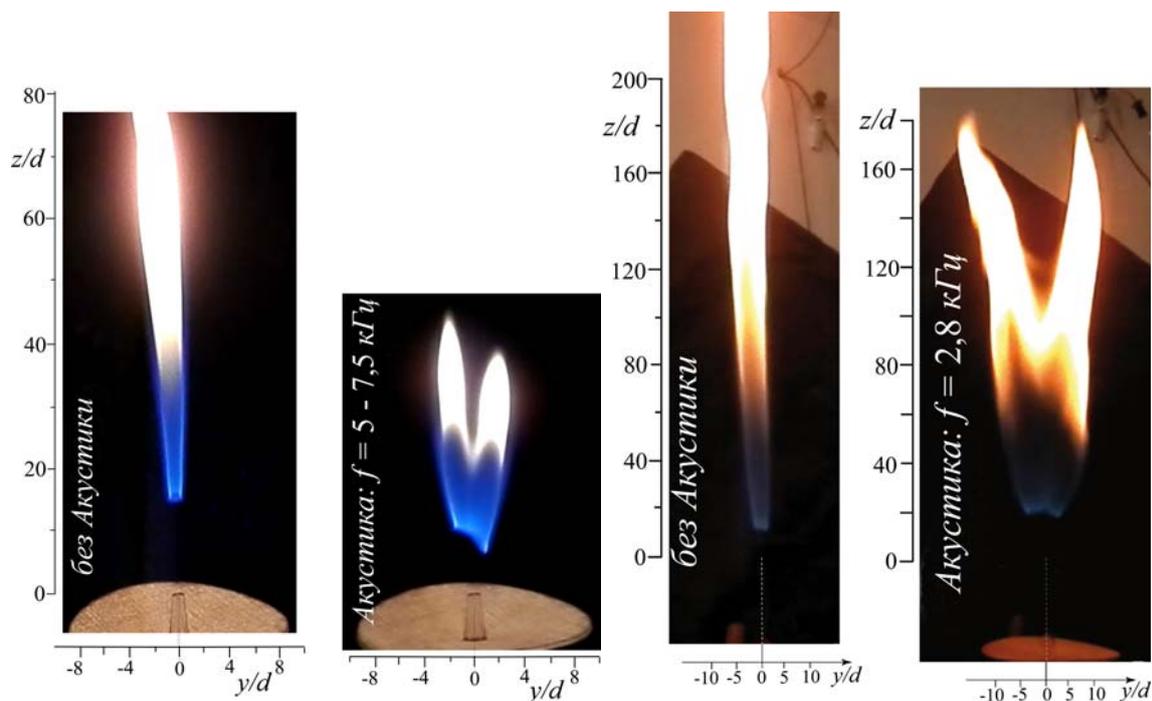


Рис. 2. Раздвоение пламени круглой микроструи в поперечном акустическом поле, выходной диаметр сопла 1 мм (слева) и 0,5 мм (справа) [3]

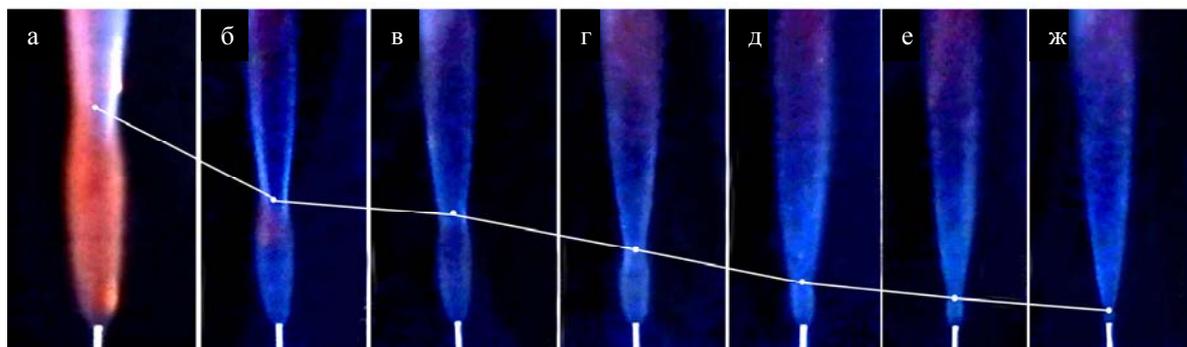


Рис. 3. Уменьшение «перетяжки» пламени в процессе горения круглой микроструи водорода в зависимости от скорости струи (м/с): а – 98; б – 172; в – 197; г – 246; д – 270; е – 295; ж – 344; диаметр выходного сопла  $d = 1$  мм, присоединенное пламя без акустического воздействия

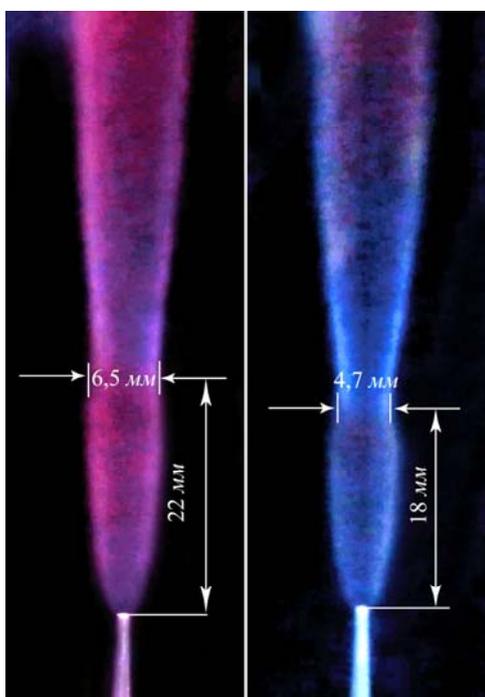


Рис. 4. Осцилляция геометрических параметров (продольной протяженности и ширины области сужения) перетяжки пламени при горении круглой микроструи водорода в поперечном акустическом поле в диапазоне частот от 14 до 19 кГц при скорости истечения струи от 154 до 193 м/с

$$\mu = 9,8868 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}\cdot\text{с};$$

$$\nu = \mu / \rho = 0,00011 \text{ м}^2/\text{с} \text{ при } t = 18 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$P = 1 \text{ атм.};$$

$$Re_{\text{водород}} = u_{\text{водород}} \cdot d_{\text{сопло}} / \nu;$$

$$Re_{\text{водород}} = 109 \cdot 0,001 / 0,00011 = 990, 1 327, 1 654, 1 990, 2 645, 2 981, 3 409.$$

В процессе горения ламинарной круглой микроструи водорода не удалось оторвать

пламя от среза выходного сопла, несмотря на широкий диапазон (от 109 до 375 м/с) скоростей истечения струи. Тем не менее было обнаружено некое явление деформации пламени (мы условно назвали его «перетяжкой») на участке выхода струи из сопла. Характеристики «перетяжки» сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсивности звука. Например, «перетяжка» уменьшалась с повышением скорости истечения струи (рис. 3), одновременно при этом резко возрастала интенсивность звука, генерируемого горячей струей водорода. Вопрос о том, что же влияет на характеристики развития «перетяжки» – акустика или скорость струи, требует дальнейших исследований, как и основной вопрос: что это за явление (перетяжка) и каковы причины его возникновения?

С другой стороны, обнаружено явление раздвоения пламени в диапазоне частот поперечного акустического поля от 7 до 15 кГц при скорости истечения струи  $U_{\text{струи}} = 109$  и 146 м/с. Данное явление коррелирует с результатами поведения пламени при горении круглой микроструи пропана в поперечном акустическом поле [3]. Частота поперечного акустического поля также оказывала влияние на поведение перетяжки: в широком диапазоне частот наблюдались осцилляции ее геометрических параметров – продольной протяженности и ширины области сужения (рис. 4). Если рассмотреть поведение пламени при горении водорода в круглой микроструе далее вниз по потоку, то можно отчетливо наблюдать его раздвоение в определенном диапазоне скоростей

истечения струи, интенсивности и частоты поперечного акустического поля (рис. 5). Данное явление коррелирует с поведением пламени в поперечном акустическом поле при горении круглой струи пропана, что было исследовано ранее (см. [3]).

### Плоская микроструя без горения в поперечном акустическом поле

Как показано в работе [4], ламинарная плоская микроструя подвержена раздвоению в поперечном акустическом поле (рис. 6).

*Влияние поперечного акустического поля на горение пропана в плоской микроструе.* Условия проведения экспериментов представлены ниже.

ПРОПАН ( $C_3H_8$ ) – сопло:

$l_{\text{сопло}} = 0,002$  м,  $h_{\text{сопло}} = 0,0003$  м;

$u_{\text{пропан}} = 21$  и  $32$  м/с;

$\rho = 2,019$  кг/м<sup>3</sup>;

$\mu = 8,01 \cdot 10^{-6}$  кг/м·с;

$\nu = \mu / \rho = 0,00000397$  м<sup>2</sup>/с при  $T = 18$  °С,  $P = 1$  атм.;

$Re_{\text{пропан}} = u_{\text{пропан}} \cdot h_{\text{сопло}} / \nu$ ,  $Re_h = 1587$  и  $2418$

Обнаружено [2], что присоединенное пламя и оторвавшееся от среза сопла пламя при диффузионном горении пропана в плоской микроструе, находящейся под воздействием поперечного акустического поля, подвержены раздвоению (рис. 7).

*Влияние акустического поля на горение водорода в плоской микроструе.* Условия проведения экспериментов представлены ниже.

ВОДОРОД ( $H_2$ ) – сопло:

$l = 0,002$  м,  $h = 0,0003$  м;

$u_{\text{водород}} = 93, 260, 288, 322, 387, 450$ , м/с;

$\rho = 0,08988$  кг/м<sup>3</sup>;

$\mu = 9,8868 \cdot 10^{-6}$  кг/м·с;

$\nu = \mu / \rho = 0,00011$  м<sup>2</sup>/с при  $T = 18$  °С,  $P = 1$  атм.;

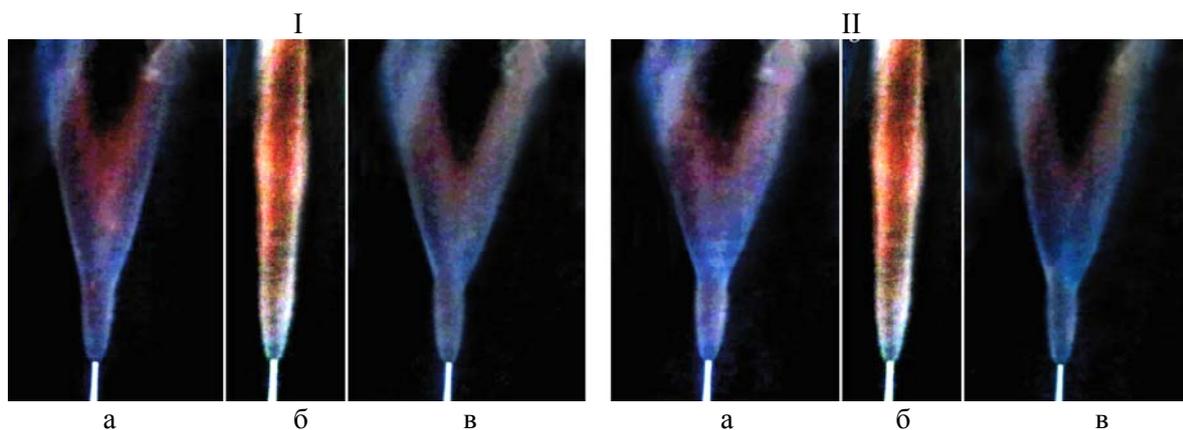


Рис. 5. Картины раздвоения присоединенного пламени в поперечном акустическом поле в процессе горения круглой микроструи водорода: I, II –  $U_{\text{струи}} = 109$  м/с ( $Re_d = 990$ ),  $146$  м/с ( $Re_d = 1327$ ) соответственно; а, в – акустика ( $f = 7\text{--}15$  кГц,  $A = 110$  дБ), б – без акустики

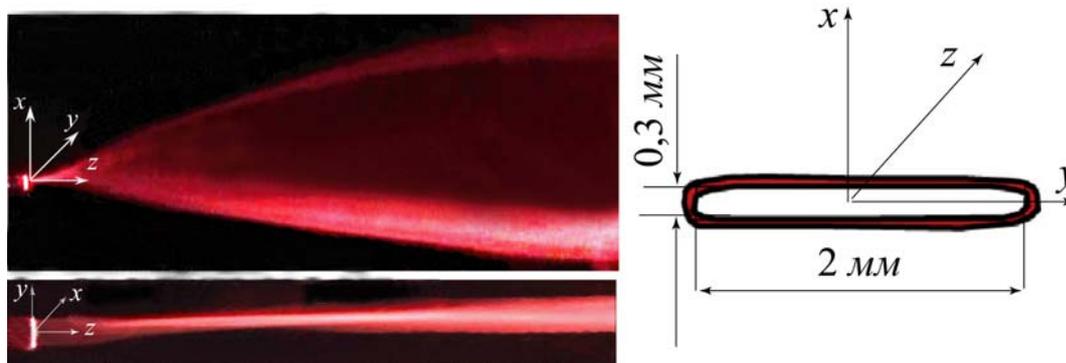


Рис. 6. Картина визуализации дымом процесса раздвоения плоской микроструи в плоскости  $xz$  без горения в поперечном акустическом поле и схема выходного отверстия сопла

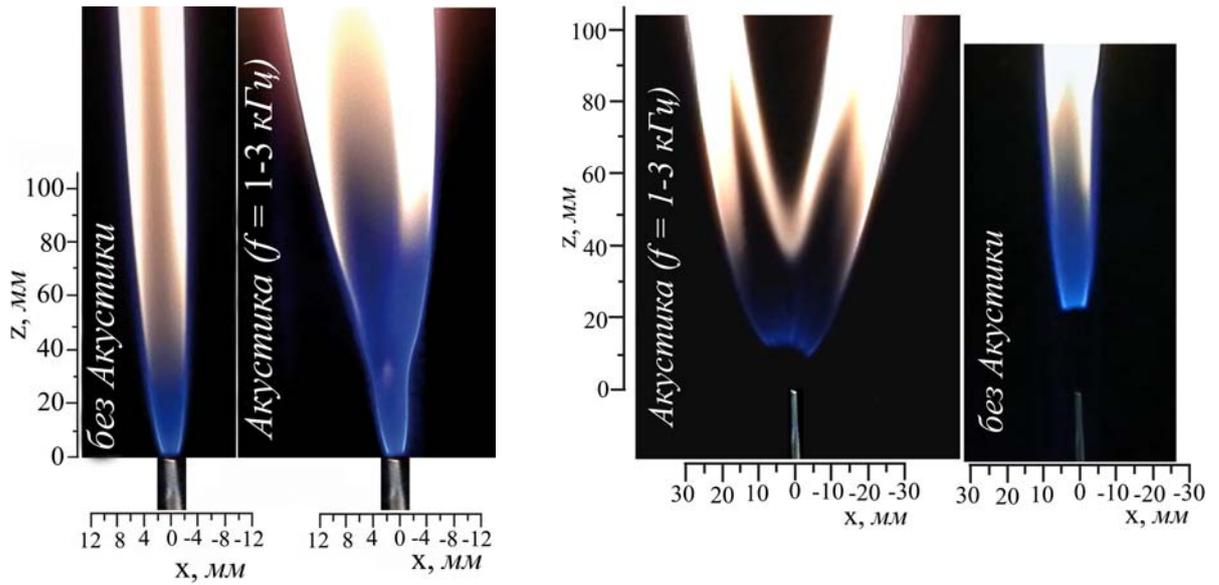


Рис. 7. Раздвоение присоединенного (слева) и оторвавшегося (справа) пламени плоской микроструи в поперечном акустическом поле [3]

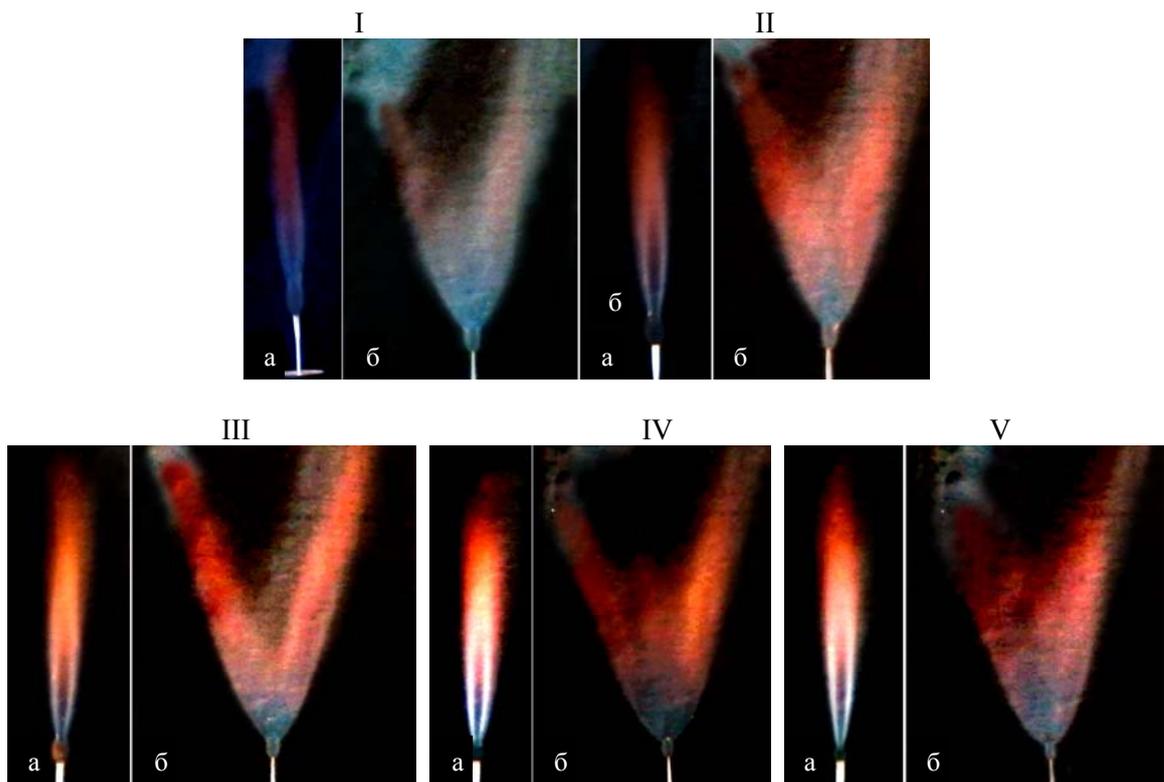


Рис. 8. Картины раздвоения присоединенного пламени в процессе горения плоской микроструи водорода под воздействием акустического поля, генерируемого шумом самой струи: I-V –  $U_{\text{струи}} = 260$  ( $Re_h = 710$ ), 288 ( $Re_h = 786$ ), 322 ( $Re_h = 879$ ), 387 ( $Re_h = 1\,056$ ), 450 ( $Re_h = 1\,228$ ) м/с соответственно; плоское сопло:  $l = 2$  мм,  $h = 0,3$  мм; а, б – картины в плоскости  $l$  и  $h$  соответственно; уровень шума струи от 60 до 90 дБ при  $f \approx 5\text{--}8$  кГц

$$Re_h = u_{\text{водород}} \cdot h_{\text{сопло}} / \nu;$$

$$Re_h = 253, 710, 786, 879, 1\,056, 1\,228.$$

Следует отметить, что в отличие от поведения пламени при горении круглой микро-

струи водорода, где, как и в случае горения водорода в плоской микроструе, не удалось оторвать пламя от среза сопла, а раздвоение пламени было достигнуто только под воз-

действием акустического поля, генерируемого шумом самой струи. Как известно [3; 4], раздвоение как струи, так и пламени связано с синусоидальной неустойчивостью именно плоской струи. В случае круглой микроструи поперечное акустическое поле уплощает струю, приводя ее к синусоидальной неустойчивости и вследствие этого как сама струя, так и пламя, распространяющиеся по ней, подвержены раздвоению (см. рис. 1, 2). По этой причине мощное акустическое поле, генерируемое шумом при горении круглой микроструи водорода, не может привести ее в состояние уплощенности и синусоидальной неустойчивости из-за отсутствия трансверсальной направленности звука. При горении же водорода в плоской микроструе, которая априори подвержена синусоидальной неустойчивости, мощное акустическое поле, генерируемое шумом, может привести к раздвоению как самой струи, так и пламени, что мы и наблюдаем (рис. 8). Однако при низкой интенсивности звука на малых скоростях истечения плоской микроструи, где мы не наблюдали раздвоения струи и пламени (рис. 9), можно предположить, что поперечное акустическое поле, вероятно, приведет к ожидаемому результату, а именно к раздвоению пламени при горении плоской микроструи водорода. Исследование данного случая будет проведено в ближайшее время.

Следует высказать определенное соображение по поводу присоединенного и оторвавшегося пламени при горении как круглой, так и плоской микроструи водорода. Как известно [5], с ростом скорости истечения струи горящего газа присоединенное к срезу сопла пламя отрывается от него при определенной скорости истечения. Это хорошо наблюдалось в нашей предыдущей работе при исследовании влияния поперечного акустического поля на развитие оторвавшегося пламени в случае горения пропана как в круглой, так и в плоской микроструе [3]. К сожалению, нам не удалось оторвать пламя при горении круглой и плоской микроструй водорода, чтобы сравнить наблюдаемые в данном случае явления с результатами исследований оторвавшегося пламени из работы [3]. Явление раздвоения в поперечном акустическом поле присоединенного пламени при горении круглой и плоской струй метана наблюдали авторы работы [6].

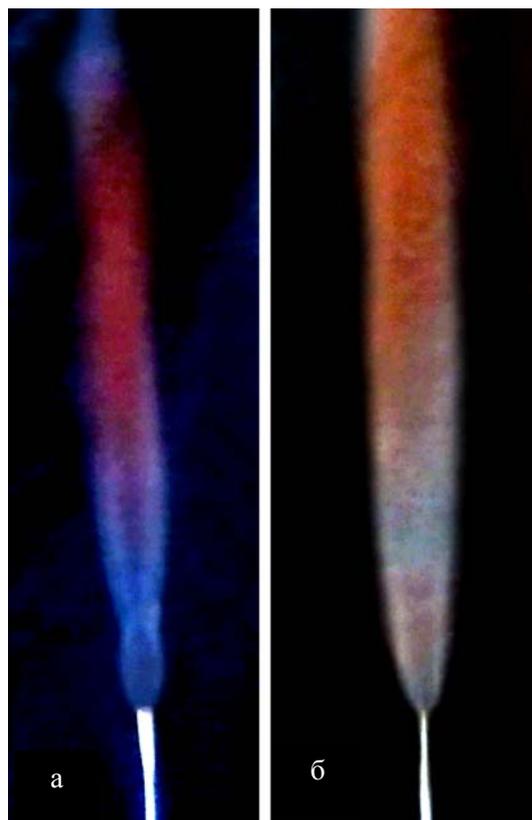


Рис. 9. Картины развития присоединенного пламени в процессе горения плоской микроструи водорода при  $U_{\text{струи}} = 93$  м/с ( $Re_h = 253$ ), плоское сопло:  $l = 2$  мм,  $h = 0,3$  мм; а, б – картины в плоскости  $l$  и  $h$  соответственно; уровень шума струи порядка 60 дБ при  $f \approx 5\text{--}8$  кГц

В работах [1; 2] было исследовано влияние акустики на процесс горения струи водорода с оторвавшимся от среза сопла пламенем. Однако отрыв пламени от среза сопла был осуществлен при горении струи водорода в коаксиальной струе воздуха, что, вероятно, и способствовало ее отрыву. По-видимому, эффект отрыва пламени напрямую связан с соотношением скорости истечения струи водорода и скорости истечения коаксиальной струи воздуха. Хотя в нашем случае горение струи водорода происходило при истечении ее в неподвижное воздушное пространство, тем не менее данное предположение необходимо более детально исследовать.

#### Список литературы

1. Jeongseog Oh, Pilwon Heo, Youngbin Yoon. Acoustic Excitation Effect on  $No_x$  Reduction and Flame Stability in a lifted Non-

Premixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. Vol. 34. P. 7851–7861.

2. Munki Kim, Youngil Choi, Jeongseog Oh, Youngbin Yoon. Flame-vortex Interaction and Mixing Behaviors of Turbulent Non-Premixed Jet Flames under Acoustic Forcing // Combustion and Flame. 2009. Vol. 156. P. 2252–2263.

3. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения пропана в круглой и плоской мини- и микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 98–119.

4. Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие. Новосибирск, 2012. 208 с.

5. Вулис Л. А., Еришин Ш. А., Ярин Л. П. Основы теории газового факела. Л.: Энергия, 1968. 203 с.

6. Suzuki M., Ikura S., Masuda W. Comparison between Acoustically-Excited Diffusion Flames of Tube and Slit Burners // Proc. of the 11<sup>th</sup> Asian Symposium on Visualization. Niigata, Japan, 2011. P. 1–6.

*Материал поступил в редколлегию 19.02.2014*

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

**THE FEATURES OF HYDROGEN COMBUSTION IN ROUND AND PLANE MICROJET  
IN THE TRANSVERSE ACOUSTIC FIELD, AND COMPARISON  
WITH THE RESULTS PROPANE COMBUSTION**

Experimental studies of the hydrogen combustion in the round and plane microjet in cross acoustic field at low Reynolds numbers are presented. The results are compared with the results obtained during the combustion of propane, studied earlier in the same experimental conditions. It is shown that the lifted flame of propane at diffusion combustion in a round microjet, under the influence of a transverse acoustic field, subject to bifurcation. This phenomenon is associated with the development of a sinusoidal oscillation process occurring under the influence of a transverse acoustic field. For the case of hydrogen combustion of plane microjet to lift the flame also failed, but the bifurcation effect is manifested at velocity close to 450 m/s. In this case acoustic disturbances generated by the jet, and a sinusoidal instability is typical for the plane jets.

*Keywords:* round microjet, plane microjet, hydrogen combustion, propane combustion, acoustic.