DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.09

УДК 532.525.2

**В.В. Козлов^{1, 2}, Г.Р. Грек¹, О.П. Коробейничев³,
Ю.А. Литвиненко¹, А.Г. Шмаков³**

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск, Россия

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ НА ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода при различной пространственной ориентации вектора скорости истечения круглой микроструи водорода относительно направления вектора ускорения силы тяжести Земли g . Особое внимание было уделено исследованию характеристик развития так называемой области «перетяжки» пламени и ее роли в процессе диффузионного горения микроструи водорода в настоящих условиях. Обнаружено, что при диффузионном горении водорода в круглой микроструе в условиях направленности вектора скорости истечения струи обратно и перпендикулярно вектору ускорения земной гравитации (g) основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи практически совпадают. Однако в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающем с направлением вектора ускорения земной гравитации (g), основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи резко отличаются от двух предыдущих случаев. Сокращается диапазон существования области «перетяжки» пламени, отрыв пламени происходит в отсутствие области «перетяжки» пламени, и момент прекращения горения микроструи наступает при значительно большей скорости ее истечения.

Ключевые слова: круглая микроструя водорода, диффузионное горение, вектор ускорения земной гравитации (g), область «перетяжки» пламени, теневой метод исследования, теневые картины горения.

**V.V. Kozlov^{1,2}, G.R. Grek¹, O.P. Korobeinichev³,
Yu.A. Litvinenko¹, A.G. Shmakov³**

¹ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

INFLUENCE OF THE ACCELERATION VECTOR DIRECTION OF EARTH GRAVITY ON DIFFUSION COMBUSTION OF THE HYDROGEN MICROJET

Results of experimental studies of features of the diffusion combustion of a round hydrogen microjet are presented at various spatial orientation of a efflux velocity vector of a round hydrogen microjet concerning a direction of an acceleration vector of a Earth gravity – $\mathbf{g}$. The special attention has been given to study of evolution characteristics, so-called, “bottleneck” flame region and its role in diffusion combustion process of a hydrogen microjet in the present conditions. It is revealed, that at diffusion combustion of a round hydrogen microjet in conditions of vector orientation back and perpendicularly to a $\mathbf{g}$ – vector the basic characteristics of a flame development depending on efflux velocity practically coincide. On the other hand, at coincidence of direction of microjet efflux velocity vector to a $\mathbf{g}$ – vector in situation of diffusion combustion of a round hydrogen microjet the basic evolution characteristics of a flame depending on efflux microjet velocity is sharply differ from two previous cases. The range of existence of the “bottleneck” flame region is reduced. Flame separation occurs at absence of the “bottleneck” flame region and termination of a round hydrogen microjet combustion comes at much more of the microjet efflux velocity.

Keywords: round hydrogen microjet, diffusion combustion, acceleration vector of a Earth gravity – $\mathbf{g}$, “bottleneck” flame region, shadow method, shadow patterns.

Введение

Исследованию струйных течений посвящено большое количество как теоретических [1–4], так и экспериментальных работ [5–9]. Важность таких исследований очевидна с точки зрения как понимания физической природы развития струй, так и их практического использования в различных технических приложениях. В работах [10–13] представлены результаты экспериментальных исследований по устойчивости дозвуковых макро- и микроструйных течений в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия. Показано, что изменение профиля скорости на срезе сопла оказывает существенное влияние на устойчивость, структуру и характеристики развития как круглой, так и плоской макро- и микроструй [10, 11]. Установлено, что поперечное акустическое поле приводит

к уплотнению и бифуркации круглой микроструи [12, 13]. Плоская микроструя также подвержена бифуркации в поперечном акустическом поле [12, 13].

В работах [14–18] представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения пропана и водорода в дозвуковых микроструйных течениях. В работе [16] исследовано воздействие поперечного акустического поля на поведение круглой и плоской микроструи водорода в процессе диффузионного горения. Обнаружено явление раздвоения пламени как круглой, так и плоской микроструи водорода. Данное явление совпадало с поведением пламени при диффузионном горении круглой и плоской микроструи пропана в поперечном акустическом поле [17]. В работе [19] исследовалось воздействие акустики на снижение выброса оксидов азота и устойчивость приподнятого пламени в диффузионной турбулентной водородной струе. Показано, что эмиссия NO_x была уменьшена и минимизирована на частоте акустического резонанса. В работе [20] исследовано поведение диффузионного турбулентного пламени водорода в ближнем поле при акустическом воздействии и без него. Показано, что акустическое воздействие приводило к 25%-му сокращению эмиссии NO_x по сравнению со струей без акустического возбуждения. Явление раздвоения в поперечном акустическом поле присоединенного пламени при горении круглой и плоской микроструи метана наблюдали авторы работы [21]. Авторы недавно опубликованной работы [22] также обнаружили раздвоение пламени круглой микроструи под воздействием акустики именно у оторвавшегося от среза сопла пламени. Следует также отметить следующее обстоятельство. Из работ [21, 22] остается непонятным сам механизм раздвоения пламени круглой струи под воздействием акустики.

Однако было обнаружено некое новое явление в поведении пламени при диффузионном горении микроструи водорода (мы условно назвали его «перетяжкой» на участке выхода струи из сопла). Характеристики «перетяжки» сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсивности звука. Например, геометрические параметры «перетяжки» изменялись с повышением скорости истечения микроструи, одновременно при этом резко возрастала интенсивность звука, генерируемого горячей струей водорода. В работах [23–25] особое внимание было уделено исследованию характеристик развития «перетяжки» пламени и его роли в процессе диффузионного горения круглой

и плоской микроструи водорода. Показано, что область «перетяжки» пламени представляет собой замкнутую сферическую область горения смеси водорода с воздухом в ближнем поле горячей струи (вблизи выходного сопла). Область «перетяжки» пламени окружена мощным градиентом плотности. Обнаружено, что ламинарная струя водорода в этой области преодолевает градиент плотности газа, становится турбулентной, и далее вниз по потоку можно наблюдать как процесс турбулентного смешения водорода с окружающим воздухом, так и наличие турбулентного пламени. В экспериментальной работе [26] область «перетяжки» пламени названа областью перехода (как и в наших исследованиях). Она представляет собой область чисто ламинарного течения и пламени, заканчивающуюся сужением в точке перехода, за которой течение в струе и пламени становится турбулентным. Если в исследованиях [23–25] резкий скачок от ламинарного к турбулентному течению и пламени объясняется преодолением ими узкого ударного слоя градиента плотности газа, то авторы работы [26] данного факта не объясняют.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода при различной пространственной ориентации выходного отверстия круглого микросопла, другими словами, различной ориентации вектора скорости истечения круглой микроструи водорода относительно направления вектора ускорения силы тяжести Земли $\mathbf{g}$. Особое внимание уделено исследованию характеристик развития так называемой области «перетяжки» пламени и ее роли в процессе диффузионного горения микроструи водорода в настоящих условиях.

1. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи обратном направлению вектора ускорения свободного падения ($\mathbf{g}$)

На теневых картинах (рис. 1) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от скорости истечения струи. Отчетливо видно, что в области «перетяжки» пламени струя водорода и пламя, ее окружающее, чисто ламинарные, затем можно наблюдать узкую область градиента плотности, проходя которую как струя, так и пламя становятся турбулентными. При скорости струи $U_{\text{струи}} = 800$ м/с и более пламя в турбулентной области струи скачкообразно отделяется от области «перетяжки», оставляя часть тур-

булентной области струи, в промежутке между турбулентным пламенем и областью «перетяжки» пламени, без горения. При этом в области «перетяжки» процесс ламинарного смешения струи с окружающим воздухом, а также горение смеси продолжают (рис. 1, *i, k*). При скорости истечения микроструи $U = 887$ м/с и выше (рис. 1, *l-n*) можно наблюдать процесс горения в области «перетяжки» пламени и отсутствие горения турбулентной области микроструи водорода. Горение в области «перетяжки» пламени прекращается при скорости более $U_{\text{струи}} = 1020$ м/с (рис. 1, *o*) при этом можно наблюдать процесс развития микроструи водорода при отсутствии горения.

Рис. 1. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи $U_{\text{струи}}$ (м/с): *a* – 357; *b* – 408; *c* – 459; *d* – 510; *e* – 561; *f* – 612; *g* – 663; *h* – 714; *i* – 765; *j* – 816; *k* – 867; *l* – 887; *m* – 918; *n* – 969; *o* – 1020; наличие области «перетяжки» пламени (*a–n*), отрыв пламени при горении в области «перетяжки» пламени (*i–k*); прекращение горения турбулентной струи при сохранении горения в области «перетяжки» пламени (*l–n*); прекращение горения струи (*o*)

2. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающем с направлением вектора ускорения свободного падения g

На теневых картинах (рис. 2) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от скорости истечения струи. Следует отметить, что в отличие от предыдущего случая в данной ситуации, когда направление вектора скорости исте-

чения струи совпадает с направлением вектора ускорения свободного падения $\mathbf{g}$, можно наблюдать ряд особенностей в развитии пламени при горении струи водорода (см. рис. 2). Во-первых, теневые картины затенены конвективными потоками, создаваемыми горячими продуктами горения и слегка искажающими картины горения, особенно при малых скоростях истечения струи (рис. 2, *a–c*). Во-вторых, область «перетяжки» пламени сохраняется на менее высокой скорости истечения струи $U_{\text{струи}} \approx 900$ м/с, чем в предыдущей ситуации ($U_{\text{струи}} \approx 1000$ м/с). Отрыв пламени от среза сопла при отсутствии области «перетяжки» пламени лежит в диапазоне скоростей $\approx 900\text{--}1000$ м/с, и при скорости ≈ 1100 м/с горение микроструи прекращается. В то время как в предыдущей ситуации отрыв пламени от среза сопла заканчивается при скорости $U_{\text{струи}} \approx 870$ м/с, горение в области «перетяжки» пламени при отсутствии горения турбулентной струи лежит в диапазоне скоростей $\approx 870\text{--}1000$ м/с, и при скорости $U_{\text{струи}} \approx 1000$ м/с горение микроструи прекращается. Можно высказать предположение, что все эти отличия связаны с влиянием противоположной направленности векторов скорости истечения струи и ускорения силы тяжести Земли $\mathbf{g}$.

Рис. 2. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи $U_{\text{струи}}$ (м/с): *a* – 357; *b* – 408; *c* – 459; *d* – 510; *e* – 561; *f* – 612; *g* – 663; *h* – 714; *i* – 765; *j* – 816; *k* – 867; *l* – 918; *m* – 1020; *n* – 1071; *o* – 1097; *p* – 1107; *q* – 1122; образование «перетяжки» пламени (*a–k*); отрыв пламени без его «перетяжки» (*l–o*); микроструя без горения (*p–q*)

Пространственный размер области «перетяжки» пламени уменьшается с ростом скорости микроструи, как и в предыдущем случае. Однако отчетливо видно, что в области «перетяжки» пламени струя водорода и пламя, ее окружающее, чисто ламинарные, затем можно наблюдать узкую область градиента плотности, проходя которую как струя, так и пламя становятся турбулентными. При скорости струи $U_{\text{струи}} = 918$ м/с и более пламя горения турбулентной области струи отрывается от среза сопла и исчезает область «перетяжки» пламени. При скорости истечения микроструи $U_{\text{струи}} = 1107$ м/с и выше горение микроструи водорода прекращается.

3. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи перпендикулярном направлению вектора ускорения свободного падения g

Для более детального понимания как данного феномена, так и вообще процесса развития диффузионного горения микроструи водорода в данных условиях при различной скорости истечения газа были представлены его теневые картины (рис. 3). При малых скоростях истечения микроструи (рис. 3, $a-c$) нижняя половина границы области «перетяжки» пламени четко выделяется, в то время как ее верхняя граница (см. рис. 3, $a-c$) размыта. По-видимому, из-за воздействия конвективного потока, верхняя граница существенно сдвигается вверх от оси струи (см. рис. 3, a), пока постепенно, с ростом скорости истечения микроструи, не замкнет верхнюю половину границы области «перетяжки» пламени (рис. 3, d).

Можно выделить следующие особенности процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода, наблюдаемые в ситуации, представленной на рис. 3:

а) наличие области «перетяжки» пламени (рис. 3, $a-n$, $U_{\text{струи}} = 408...969$ м/с);

б) отрыв турбулентного пламени от среза сопла при наличии области «перетяжки» пламени и отсутствии горения турбулентной струи в районе между областью «перетяжки» пламени и оторвавшимся турбулентным пламенем (см. рис. 3, $i-k$, $U_{\text{струи}} = 816...867$ м/с);

в) отсутствие горения турбулентной струи при наличии горения в области «перетяжки» пламени (см. рис. 3, $l-n$, $U_{\text{струи}} = 908...969$ м/с);

г) прекращение горения микроструи водорода (рис. 3, *o*, $U_{\text{струи}} = 1020$ м/с).

Области «перетяжки» пламени представляют собой замкнутые сферические области диффузионного горения ламинарной струи водорода в окружающем воздухе в ближнем поле микроструи. На рис. 3, *a–d* можно наблюдать процесс постепенного замыкания верхней границы области «перетяжки» пламени с ростом скорости истечения струи. Разрыв узкой области градиента плотности газа (см. рис. 3, *a–d*), вызванный конвекцией потока, полностью восстанавливается при скорости струи $U_{\text{струи}} = 612$ м/с (см. рис. 3, *e*) и далее вниз по потоку. Преодолевая градиент плотности, ламинарная микроструя становится турбулентной, и, далее вниз по потоку, пламя горящей микроструи водорода приобретает турбулентный характер горения.

Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи $U_{\text{струи}}$ (м/с): *a* – 408; *b* – 459; *c* – 510; *d* – 561; *e* – 612; *f* – 663; *g* – 714; *h* – 765; *i* – 816; *j* – 842; *k* – 867; *l* – 908; *m* – 918; *n* – 969; *o* – 1020; наличие области «перетяжки» пламени (*a–n*), турбулентная струя без горения и при отсутствии области «перетяжки» пламени (*o*)

4. Анализ результатов исследований

Обнаружены принципиальные отличия процесса горения микроструи водорода на его завершающем этапе для всех трех экспериментальных постановок. Отрыв пламени от среза сопла в ситуации, когда направленность вектора скорости истечения струи совпадает с направленностью вектора земной гравитации, происходит при исчезновении области «перетяжки» пламени, в то время как в двух других ситуациях область «перетяжки» пламени сохраняется как в случае отрыва пламени от среза сопла, так и в случае полного прекращения горения в турбулентной области горения микроструи водорода.

Следует отметить, что полное прекращение горения микроструи водорода как в области «перетяжки» пламени, так и в области турбулентной струи происходит при значительно большей скорости истечения струи в ситуации направленности вектора скорости истечения струи, совпадающего с вектором ускорения свободного падения ($U_{\text{струи}} = 1107$ м/с), чем в двух других ситуациях ($U_{\text{струи}} = 1020$ м/с). Следует также отметить еще одну особенность в развитии круглой микроструи водорода и пламени при ее диффузионном горении. Протяженность ламинарной области развития круглой микроструи водорода при ее горении (в области «перетяжки» пламени) увеличилась примерно в четыре раза по сравнению с протяженностью данной области в случае отсутствия горения струи. При этом область ламинарного смещения микроструи водорода с окружающим воздухом (область «перетяжки» пламени) и ее горение четко отделено узкой областью градиента плотности газа от области горения турбулентной микроструи.

На рис. 4 показаны теневые картины области «перетяжки» пламени и графики зависимостей размера области «перетяжки» пламени при диффузионном горении микроструи водорода в зависимости от направления и скорости ее истечения. Хорошо видно, что если в ситуации диффузионного горения круглой микроструи водорода, направление вектора скорости истечения которой противоположно или перпендикулярно направлению вектора ускорения свободного падения $\mathbf{g}$, кривые зависимости $l/d = f(U)$ практически совпадают, то в ситуации направления вектора скорости истечения струи, совпадающего с направлением вектора ускорения свободного падения $\mathbf{g}$, кривая зависимости $l/d = f(U)$ резко отличается от предыдущего случая. Во-

первых, кривая лежит значительно выше, что указывает на больший размер области «перетяжки» пламени. Во-вторых, при малых скоростях истечения струи этот размер почти в два раза превышает размер области «перетяжки» пламени для двух других ситуаций, что, по-видимому, может быть связано с воздействием однозначной направленности вектора ускорения свободного падения $\mathbf{g}$ и вектора скорости истечения струи, что может приводить к растяжению области «перетяжки» пламени.

Рис. 4. Теневые картины области «перетяжки» пламени (слева): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 6 – пламя горения турбулентной струи водорода. Графики зависимостей размера области «перетяжки» пламени при диффузионном горении микроструи водорода (диаметр сопла $d = 0,5$ мм) от направления и скорости ее истечения (справа)

Зависимости процессов диффузионного горения круглой микроструи водорода от скорости истечения струи U и чисел Рейнольдса Re и Фруда Fr для ситуаций, рассмотренных в подразд. 1 и 3, практически совпадают. Это касается диапазонов продолжительности существования области «перетяжки» пламени ($Re \approx 1700 \dots 4600$), области отрыва

с наличием области «перетяжки» пламени ($Re \approx 3650 \dots 4100$), области наличия «перетяжки» пламени при отсутствии горения турбулентной части струи ($Re \approx 4220 \dots 4600$) и, наконец, позиции полного прекращения горения микроструи ($Re \approx 4860$).

Однако наблюдались значительные изменения в зависимости процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода от скорости истечения струи U , чисел Рейнольдса Re и Фруда Fr для ситуации, рассмотренной в подразд. 2. Во-первых, диапазон продолжительности существования области «перетяжки» пламени ($Re \approx 1700 \dots 4100$) заметно уменьшился. Во-вторых, полностью исчезла область отрыва с наличием области «перетяжки» пламени и область наличия «перетяжки» пламени при отсутствии горения турбулентной части струи, зато появилась новая область со значительным диапазоном существования – *область отрыва пламени от среза сопла при отсутствии области «перетяжки» пламени* ($Re \approx 4350 \dots 5200$). Наконец, условия полного прекращения горения микроструи ($Re \approx 5270$) резко отличаются от соответствующего параметра ($Re \approx 4860$) для случаев, рассмотренных в подразд. 1 и 3.

Таким образом, есть предположение, что все особенности и различия в процессе диффузионного горения круглой микроструи водорода в ситуации, когда вектор скорости ее истечения совпадает с вектором ускорения свободного падения $\mathbf{g}$, связаны именно с воздействием данного фактора. Действие этого фактора двояко, с одной стороны, можно наблюдать воздействие конвекции на структуру пламени (подразд. 2); с другой стороны, видны значительные изменения в характере самого процесса горения (подразд. 2) по сравнению с ситуациями, представленными в подразд. 1 и 3.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 16-19-10330.

Библиографический список

1. Abid M. Simulation numeriques directes de la dynamique de transition tridimensionnelle des jets axisymetriques. Ph. D. thesis. – Ecole Normale Supérieure de Paris, 1993.

2. Brancher P., Chomaz J.M., Huerre P. Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets // *Phys. Fluids*. – 1994. – № 6. – P. 1768.

3. Secondary instability of a temporally growing mixing layer / R.W. Metcalfe, S.A. Orszay, M.E. Brachet, S. Menon, J.J. Riley // *J. Fluid Mech.* – 1987. – № 184. – P. 207.

4. Crow S.C., Champagne F.H. Orderly structure in jet turbulence // *J. Fluid Mech.* – 1971. – Vol. 48. – P. 547–591.

5. Bernal L.P., Roshko A. Streamwise vortex structure in plane mixing layers // *J. Fluid Mech.* – 1986. – № 170. – P. 499.

6. Lasheras J.C., Cho J.S., Maxworthy T. On the origin and evolution of streamwise vortical structures in plane free shear layer // *J. Fluid Mech.* – 1986. – № 172. – P. 231.

7. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // *J. Fluid Mech.* – 1992. – Vol. 245. – P. 643–668.

8. The spreading of self-excited hot jets by side jets / P.A. Monkewitz, B. Lehmann, B. Barsikow, D.W. Bechert // *Phys. Fluids*. – 1989. – A 1. – P. 446.

9. Monkewitz P.A., Pfizenmaier E. Mixing by side jets in strongly forced and self-excited round jets // *Phys. Fluids*. – 1991. – A 3. – P. 1356.

10. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи / Г.В. Козлов, Г.Р. Грек, А.М. Сорокин, Ю.А. Литвиненко // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 59–73.

11. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи / Г.В. Козлов, Г.Р. Грек, А.М. Сорокин, Ю.А. Литвиненко // *Вестник НГУ. Сер.: Физика*. – 2008. – Т. 3, вып. 3. – С. 14–33.

12. Subsonic round and plane macrojets and microjets in a transverse acoustic field / Yu.A. Litvinenko, G.R. Grek, V.V. Kozlov, G.V. Kozlov // *Doklady Physics*. – 2011. – Vol. 56, № 1. – P. 26–31.

13. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость звуковых струйных течений: учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск, 2012. – 208 с.

14. Stability of subsonic microjet flows and combustion / V.V. Kozlov, G.R. Grek, M.M. Katasonov, O.P. Korobeinichev, Yu.A. Litvinenko,

A.G. Shmakov // *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization (JFCMV)*. – 2013. – Vol. 3, iss. 1. – P. 108–111.

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

16. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях / В.В. Козлов, Г.Р. Грек, О.П. Коробейничев, Ю.А. Литвиненко, А.Г. Шмаков // *Вестник НГУ. Сер.: Физика*. – 2014. – Т. 9, вып. 1. – С. 79–86.

17. Структура пламени при горении пропана в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса / В.В. Козлов, Г.Р. Грек, М.М. Катасонов, О.П. Коробейничев, Ю.А. Литвиненко, А.Г. Шмаков // *Докл. АН (ДАН)*. – 2014. – Т. 459, № 5. – С. 562–566.

18. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities. – Dordrecht: Springerbook, 2015. – 127 с. DOI 10.1007/978-3-319-26958-0

19. Oh J., Heo P., Yoon Y. 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.

20. Flame-vortex interaction and mixing behaviors of turbulent non-premixed jet flames under acoustic forcing / M. Kim, Y. Choi, J. Oh, Y. Yoon // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156. – P. 2252–2263.

21. Suzuki M., Ikura S., Masuda W. Comparison between acoustically-excited diffusion flames of tube and slit burners // *Proc. of the 11th Asian Symposium on Visualization*. – Niigata, 2011. – P. 1–6.

22. Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Володин В.В. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана // *Письма в Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 38, № 10. – С. 57–63.

23. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе / А.Г. Шмаков, Г.Р. Грек, В.В. Козлов, О.П. Коробейничев, Ю.А. Литвиненко // *Вестник НГУ. Сер.: Физика*. – 2015. – Т. 10, вып. 2. – С. 27–41.

24. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) / Г.Р. Грек, М.М. Катаонов, Г.В. Козлов, М.В. Литвиненко // Вестник НГУ. Сер.: Физика. – 2015. – Т. 10, вып. 2. – С. 42–51.

25. Структура присоединенного диффузионного пламени микро-струи водорода, истекающей из щелевого сопла / Ю.А. Литвиненко, Г.Р. Грек, В.В. Козлов, О.П. Коробейничев, А.Г. Шмаков // Вестник НГУ. Сер.: Физика. – 2015. – Т. 10, вып. 2. – С. 52–66.

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

References

1. Abid M. Simulation numeriques directes de la dynamique de transition tridimensionnelle des jets axisymetriques. Ph. D. thesis. Ecole Normale Superieure de Paris, 1993.

2. Brancher P., Chomaz J.M., Huerre P. Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets. *Phys. Fluids*, 1994, no. 6, p. 1768.

3. Metcalfe R.W., Orszay S.A., Brachet M.E., Menon S., Riley J.J. Secondary instability of a temporally growing mixing layer. *J. Fluid Mech.*, 1987, no. 184, p. 207.

4. Crow S.C., Champagne F.H. Orderly structure in jet turbulence. *J. Fluid Mech.*, 1971, vol. 48, pp. 547–591.

5. Bernal L.P., Roshko A. Streamwise vortex structure in plane mixing layers. *J. Fluid Mech.*, 1986, no. 170, p. 499.

6. Lasheras J.C., Cho J.S., Maxworthy T. On the origin and evolution of streamwise vortical structures in plane free shear layer. *J. Fluid Mech.*, 1986, no. 172, p. 231.

7. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets. *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 245, pp. 643–668.

8. Monkewitz P.A., Lehmann B., Barsikow B., Bechert D.W. The spreading of self-excited hot jets by side jets. *Phys. Fluids*, 1989, A 1, p. 446.

9. Monkewitz P.A., Pfizenmaier E. Mixing by side jets in strongly forced and self-excited round jets. *Phys. Fluids*, 1991, A 3, p. 1356.

10. Kozlov G.V., Grek G.R., Sorokin A.M., Litvinenko Yu.A. Vliyaniye nachalnykh usloviy na sreze sopla na strukturu krugloy strui [Influence of initial condition at the nozzle exit on the structure of round jet]. *Teplotfizika i aeromekhanika*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 59-73.

11. Kozlov G.V., Grek G.R., Sorokin A.M., Litvinenko Yu.A. Vliyaniye nachalnykh usloviy na sreze sopla na strukturu techeniya i ustoychivost ploskoy strui [Influence of initial condition at nozzle section on flow structure and instability of plane jet]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2008, vol. 3, iss. 3, pp. 14-33.

12. Litvinenko Yu.A., Grek G.R., Kozlov V.V., Kozlov G.V. Subsonic round and plane macrojets and microjets in a transverse acoustic field. *Doklady Physics*, 2011, vol. 56, no. 1, pp. 26-31.

13. Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A. Ustoychivost dozvukovykh struynykh techeniy [Stability of subsonic jet flows]. Novosibirskiy gosudarstvennyy universitet, 2012. 208 p.

14. Kozlov V.V., Grek G.R., Katasonov M.M., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Stability of subsonic microjet flows and combustion. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization (JFCMV)*, 2013, vol. 3, iss. 1, pp. 108-111.

15. Grek G.R., Katasonov M.M., Kozlov V.V., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Osobennosti goreniya propana v krugloy i ploskoy mini- i mikrostrue v poperechnom akusticheskom pole pri mal'kikh chislakh Reynoldsa [Features of propane combustion in round and plane mini- and microjet in transverse acoustic field at low Reynolds numbers]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2013, vol. 8, iss. 3, pp. 98-119.

16. Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Osobennosti goreniya vodoroda v krugloy i ploskoy mikrostrue v poperechnom akusticheskom pole i ikh sravnenie s rezul'tatami goreniya propana v tekhnicheskikh usloviyakh [Features of hydrogen combustion in round and plane microjet in transverse acoustic field and their comparison with propane combustion under the same conditions]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2014, vol. 9, iss. 1, pp. 79-86.

17. Kozlov V.V., Grek G.R., Katasonov M.M., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Struktura plameni pri gorenii propana v krugloy i ploskoy mikrostrue v poperechnom akusticheskom pole pri mal'kikh chislakh Reynoldsa [Flame structure at propane combustion in round

and plane microjet in transverse acoustic field at low Reynolds numbers]. *Doklady akademii nauk*, 2014, vol. 459, no. 5, pp. 562-566.

18. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A. Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities. Dordrecht: Springer-book, 2015. 127 p. DOI 10.1007/978-3-319-26958-0

19. Oh J., Heo P., Yoon Y. 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, pp. 7851-7861.

20. Kim M., Choi Y., Oh J., Yoon Y. Flame-vortex interaction and mixing behaviors of turbulent non-premixed jet flames under acoustic forcing. *Combustion and Flame*, 2009, vol. 156, pp. 2252-2263.

21. Suzuki M., Ikura S., Masuda W. Comparison between acoustically-excited diffusion flames of tube and slit burners. *Proc. of the 11th Asian Symposium on Visualization*. Niigata, 2011, pp. 1-6.

22. Krivokorytov M.S., Golub V.V., Volodin V.V. Vliyanie akusticheskikh kolebaniy na diffuzionnoe gorenje metana [Influence of initial conditions on a methane diffusion combustion]. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2012, vol. 38, no. 10, pp. 57-63.

23. Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Korobeynichev O.P., Litvinenko Yu.A. Razlichnye rezhimy diffuzionnogo goreniya krugloy strui vodoroda v vozdukh [Different behavior of diffusion combustion of hydrogen round jet in air]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 27-41.

24. Grek G.R., Katasonov M.M., Kozlov G.V., Litvinenko M.V. Diffuzionnoe gorenje vodoroda (krugloe skoshennoe soplo) [Diffusion hydrogen microjet combustion (round beveled nozzle)]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 42-51.

25. Litvinenko Yu.A., Grek G.R., Kozlov V.V., Korobeynichev O.P., Shmakov A.G. Struktura prisoedinennogo diffuzionnogo plameni mikrostrui vodoroda, istekayushchey iz shchelevogo sopla [Structure of the attached flame during diffusion hydrogen microjet combustion]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 52-66.

26. Agrawal A.K., Albers B.W., Alamm K.N. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas-jet diffusion flames. *Combustion Science and Technology*, 2005, vol. 177, no. 2, pp. 305-322.

Об авторах

Козлов Виктор Владимирович (Новосибирск, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, e-mail: kozlov@itam.nsc.ru), профессор Новосибирского государственного университета (630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2).

Грек Генрих Рувимович (Новосибирск, Россия) – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, e-mail: grek@itam.nsc.ru).

Коробейничев Олег Павлович (Новосибирск, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru).

Литвиненко Юрий Алексеевич (Новосибирск, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, e-mail: litur@itam.nsc.ru).

Шмаков Андрей Геннадиевич (Новосибирск, Россия) – кандидат химических наук, заведующий лабораторией, замдиректора Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, e-mail: shmakov@kinetics.nsc.ru).

About the authors

Viktor V. Kozlov (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Khris-tianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (4/1, Institutskya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: kozlov@itam.nsc.ru), Professor, Novosibirsk State University (2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation).

Genrikh R. Grek (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (4/1, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: grek@itam.nsc.ru).

Oleg P. Korobeinichev (Novosibirsk, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru).

Yuriy A. Litvinenko (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (4/1, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: litur@itam.nsc.ru).

Andrey G. Shmakov (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph. D. in Chemical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: shmakov@kinetics.nsc.ru).

Получено 16.05.2016