

УДК 544.452.42

Ю. А. Литвиненко<sup>1</sup>, А. Б. Балбуцкий<sup>2</sup>, В. В. Вихорев<sup>2</sup>  
Г. В. Козлов<sup>1</sup>, М. В. Литвиненко<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

litur@itam.nsc.ru

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ  
В КРУГЛОЙ МИКРОСТРУЕ ПРОПАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО  
АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ГОРЕНИЕМ И БЕЗ ГОРЕНИЯ\***

Выполнены экспериментальные исследования развития дозвуковой круглой микроструи при диффузионном горении пропана и без горения при малых числах Рейнольдса. Развитие струи происходило как при естественных условиях без акустического воздействия так и под действием внешнего акустического поля большой интенсивности (90–100 дБ), частота акустического воздействия варьировалась от нескольких герц до 6 кГц. Струйное течение было реализовано из сопла круглого сечения со скосом 45° и диаметром  $d = 0,45$  мм. Подаваемая в сопло смесь пропан-бутана предварительно проходила через испаритель, затем через регулятор расхода газа (двухканальный PR4000B). Исследования проводились при помощи теневого метода на базе ИАБ-451. По результатам исследований получены картины теневой визуализации, показано наличие развивающейся гидродинамической неустойчивости в том числе при наличии конвективных сил (при горении). Получены картины визуализации диффузионного горения круглой микроструи пропан-бутана при различных режимах горения – присоединенное и поднятое. Установлено, что пламя при диффузионном горении круглой микроструи под действием внешнего акустического поля, подвержено уплощению и раздвоению аналогично воздушной свободной круглой микроструе, при этом источник акустических колебаний ориентирован перпендикулярно к струе. Получены картины диффузионного горения для расщепленной акустическим полем импактной струи. Установлено, что в этом случае на ограничивающей пластине реализуется два температурных максимума.

*Ключевые слова:* теневая визуализация, акустическое поле, диффузионное горение, круглая микроструя, импактная микроструя, пропан-бутан.

**Введение**

Основой современной энергетики является потребление, главным образом, углеводородного сырья: угля, нефти и природного газа (этан, бутан, пропан и др.). В этой связи актуальными остаются задачи эффективного потребления различных видов топлива, усовершенствование механизмов сжигания и теплообмена. Определенный интерес в этой области вызывает диффузионное горение

пропана в воздушной среде как с точки зрения повышения устойчивости пламени, так и с точки зрения снижения вредных выбросов в атмосферу оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ). Одним из важных вопросов на пути решения данных задач является возможность влияния на процесс горения, например, методом наложения внешнего акустического поля. Эффективность метода акустического воздействия возрастает при уменьшении размеров сопел и соответственно масштаба струйных

\* Работа поддержана грантами Президента РФ (НШ-87.88.2016.1) и РФФИ (№16-08-00425А, 14-08-00201А).

Литвиненко Ю. А., Балбуцкий А. Б., Вихорев В. В., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Экспериментальное исследование развития гидродинамической неустойчивости в круглой микроструе пропана при воздействии внешнего акустического поля с горением и без горения // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 4. С. 21–28.

течений. В то же время следует понять, в чем состоит отличие в воздействии акустического поля на макро- и микрострую. Данные исследования являются первыми шагами в этом направлении.

Исследования диффузионного горения струи осложнены ограничением методов регистрации режима и характера течения. Для получения качественных данных о развитии круглой микроструи пропан-бутана при различных начальных условиях (при наличии диффузионного горения и режиме без поджига, с акустикой и без) использовался теневой метод. Данный метод основан на зависимости коэффициента преломления излучаемого света газами, отличающимися по плотности от окружающего воздуха. Также для случая с воздушной микроструей были выполнены термоанемометрические измерения.

#### Условия и методика измерений

Экспериментальные исследования проводились в Институте теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Исследования проводились для диффузионных пламен пропан-бутана на открытом горелочном стенде, состоящем из соплового блока и расходомера MKS Instruments, подключаемого к системе подачи и испарения газа. Схема установки представлена на рис. 1. В качестве прибора для теневых измерений использовался ИАБ-451. Пропан-бутановая смесь из баллона поступала в испаритель, затем газовая фаза проходила через электромагнитный клапан массового расхода и подавалась к соплу круглого сечения со скосом  $45^\circ$ . Использовался электромагнитный клапан типа 179В фирмы MKS Instruments, обеспечивающий точность измерения расхода газа в пределах 0,7 %. Диаметр сопла  $d = 0,45$  мм, расход газа варьировался от 1 до 4,5 см<sup>3</sup>/с. Контроль расхода осуществлялся с помощью блока управления электромагнитным клапаном. Для реализации внешнего акустического воздействия, использовался генератор сигналов ГЗ-33, сигнал от которого подавался на динамик, при этом уровень звукового давления соответствовал 90–120 дБ. Частота акустического воздействия варьировалась в различных экспериментах от нескольких герц до 6 кГц. Картины визуализации фиксировались на цифровую камеру

Olympus SZ-17 с разрешением 12 МП. Для случая воздушной микроструи были выполнены термоанемометрические измерения однониточным датчиком. С учетом размеров микроструи был выбран датчик с длиной нити 300 микрон и диаметром 3 микрона. Тарировка датчика производилась на специально созданной мобильной установке, после тарировки установка заменялась на струйную, таким образом исключались возможные ошибки, связанные с перемещением контактов и приборов. Используемый термоанемометр типа mini СТА фирмы DANTEC был связан с 16-битным АЦП типа PCI-6035E от National Instruments, установленным в компьютере, через восьми-канальный коннектор BNC-2120 National Instruments. Сбор экспериментальных данных и линеаризация сигнала термоанемометра осуществлялись с помощью компьютерных программ, выполненных в среде MATLAB с использованием закона Кинга. Регистрировалось мгновенное значение продольной скорости микроструи затем в процессе обработки рассчитывалась пульсационная ее составляющая. Число Рейнольдса ( $Re_d$ ), рассчитанное по диаметру сопла ( $d$ ), составляло  $Re_d = 1\,057$  при  $u_{\text{струи}} = 9,4$  м/с;  $Re_d = 1\,265$  при  $u_{\text{струи}} = 11,25$  м/с;  $Re_d = 1\,687$  при  $u_{\text{струи}} = 15$  м/с.

#### Результаты

В результате проведенных исследований были получены теневые фотографии процесса развития круглой микроструи пропан-бутана при различных начальных условиях. Для диффузионного режима горения исследования производились как при присоединенном факеле, т. е. пламя развивалось непосредственно со среза сопла, так и при поднятом факеле, когда фронт горения начинался на несколько калибров выше по течению. При данных условиях были проведены исследования возможности воздействия / управления развитием процесса горения наложением внешних акустических колебаний. На рис. 2 представлены теневые фотографии развития микроструи пропана при наличии диффузионного горения (вид справа) и при отсутствии пламени (вид слева). Следует отметить, что расход газа соответствовал присоединенному режиму горе-

ния и развитие происходило при естественных условиях без акустического воздействия.

При отсутствии пламени установлено, что струя остается ламинарной более 100 калибров, затем происходит нарастание амплитуды колебательного движения струи и переход к турбулентному состоянию. При

поджиге пламя распространяется непосредственно от сопла, появляется неоднородность плотности, связанная с градиентом температуры, контур пламени значительно шире предыдущего случая. По оси струи, начиная от сопла на 10–15 калибров, наблюдается след, соответствующий газу, не вступившему в реакцию. Позднее след исче-

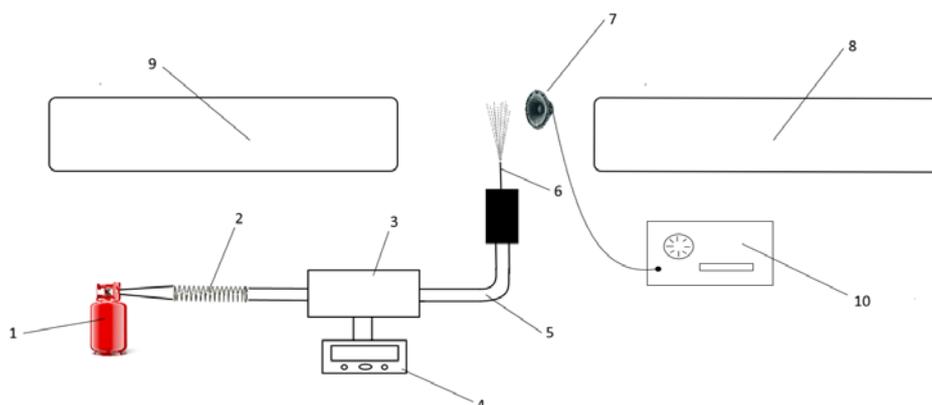


Рис. 1. Схема установки: 1 – баллон с пропан-бутановой смесью; 2 – испаритель; 3 – электромагнитный пневмоклапан; 4 – блок управления электромагнитным клапаном; 5 – трубка; 6 – сопло ( $d = 450$  мкм); 7 – динамик (80–100 дБ); 8 – осветительная часть прибора ИАБ-451; 9 – приемная часть прибора ИАБ-451; 10 – генератор сигналов ГЗ-33

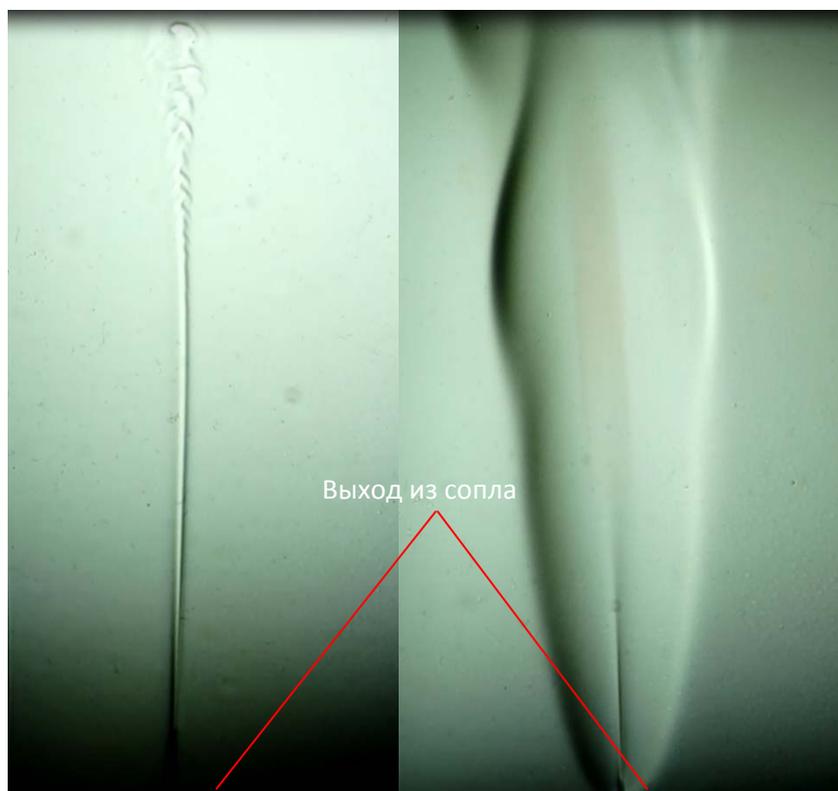


Рис. 2. Теневые фотографии струи пропана без акустического воздействия при диффузионном горении в режиме присоединенного пламени (справа) и без горения (слева), расход газа  $1,5 \text{ см}^3/\text{с}$

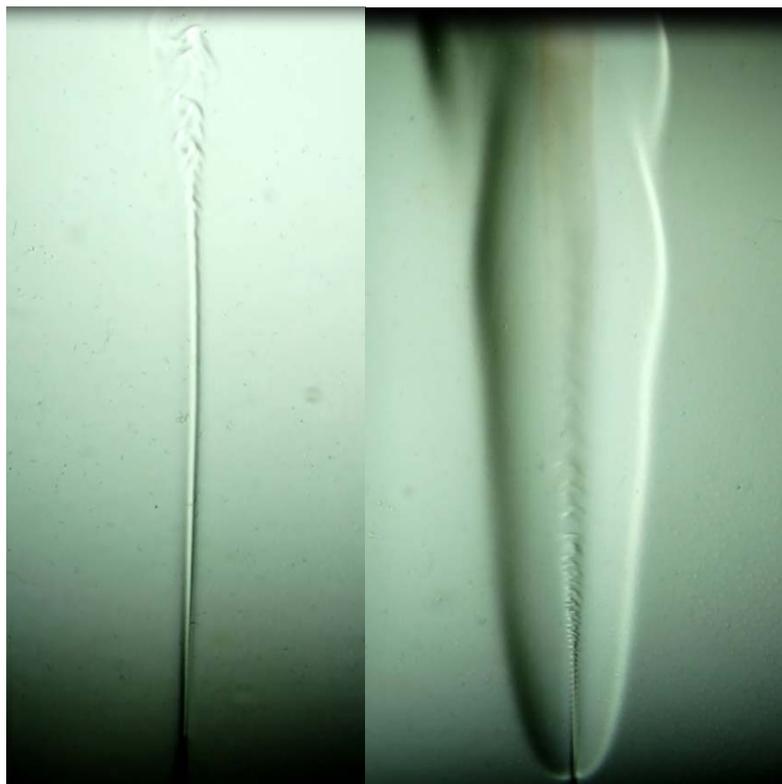


Рис. 3. Теневые фотографии струи пропана при диффузионном горении в режиме присоединенного пламени (справа) и без горения (слева). Частота наложенного поля  $f = 4,5$  кГц, расход газа  $1,5$  см<sup>3</sup>/с

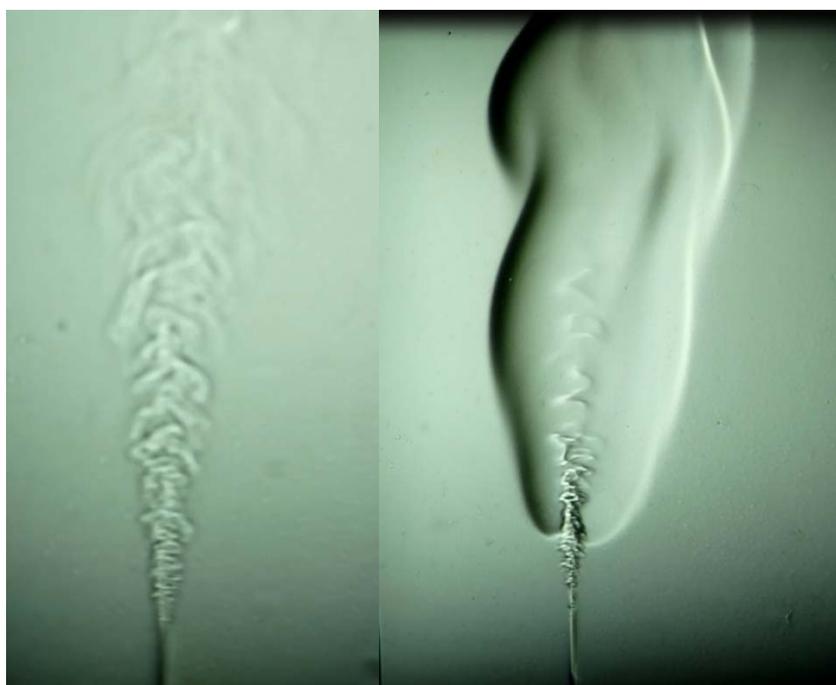


Рис. 4. Теневые фотографии струи пропана без акустического воздействия при диффузионном горении в режиме оторванного пламени (справа) и без горения (слева), расхода газа  $2,4$  см<sup>3</sup>/с

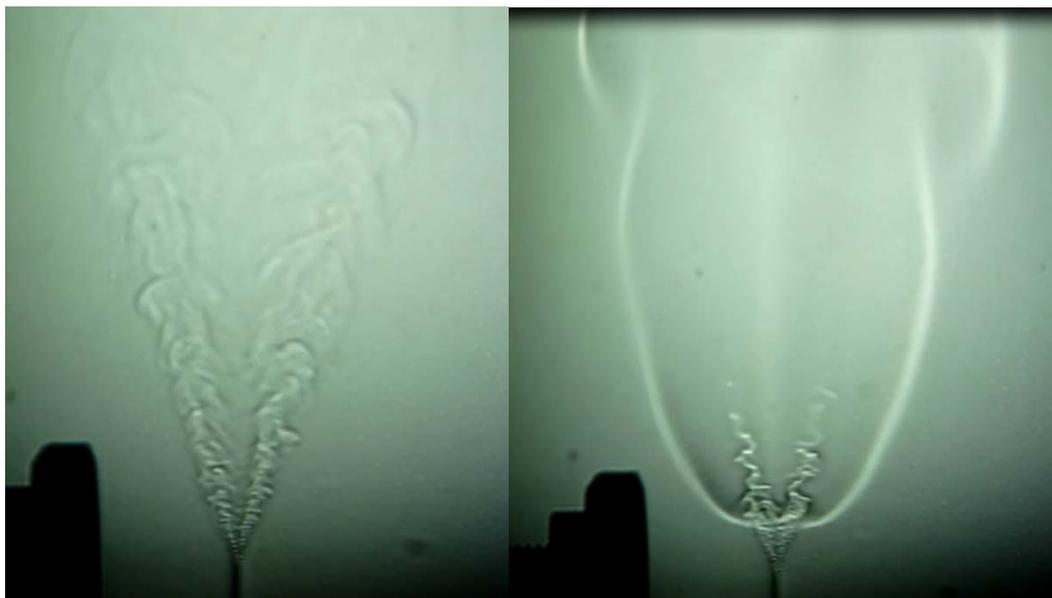


Рис. 5. Теневые фотографии микроструи пропана при акустическом воздействии ( $f = 4,5$  кГц) при диффузионном горении (справа) и без (слева), расход газа  $2,4 \text{ см}^3/\text{с}$

зает, что связано с постепенным перемешиванием газа и воздуха. Также наблюдается развитие волн конвективной неустойчивости.

В следующей серии экспериментов на струю воздействовало акустическое поле. На рис. 3 показаны теневые снимки микроструи пропана в режиме присоединенного пламени и без горения.

Частота внешнего поперечного акустического поля  $f = 4,5$  кГц, уровень звукового давления 80 дБ. Следует отметить, что в режиме присоединенного пламени акустические колебания не вносят существенных изменений в топологию развития струи. Факт отсутствия реакции на акустические возмущения у присоединенного пламени связан с наличием мощного конвективного течения с сильными градиентами плотности. Увеличения энергии акустических колебаний вплоть до 140 дБ недостаточно, чтобы дестабилизировать струю с присоединенным факелом, т. е. факелом, развивающимся непосредственно от сопла.

При увеличении расхода газа до  $1,8 \text{ см}^3/\text{с}$  режим горения струи изменяется. Пламя отрывается от среза сопла, и реализуется поднятый факел. Фронт горения развивается начиная с 10–20 калибров ниже по течению. На рис. 4 показаны теневые фотографии струи пропана при диффузионном горении в режиме поднятого пламени (справа) и без горения (слева).

В этом случае наблюдается рост естественных возмущений и турбулизация струи. В целом, такой сценарий развития для случая с горением и без горения не имеет каких-либо особенностей за исключением того, что не происходит образования кольцевых вихрей, характерных для круглых макроструй.

На рис. 5 показаны теневые фотографии микроструи пропана при акустическом воздействии ( $f = 4,5$  кГц), при диффузионном горении (справа) и без горения (слева). Показано, что в режиме поднятого пламени появляется участок вблизи сопла без горения. Этот участок восприимчив к влиянию акустического поля даже малой интенсивности, и колебания, создаваемые акустическим давлением, в этом случае приводят к изменению топологии развития струи. Периодические колебания акустической волны в перпендикулярном к струе направлении приводят к деформации поперечного сечения микроструи от круглого к овальному. В процессе развития выделяются большая и меньшая стороны струи. После такого преобразования формы к квазиплоской в струе развивается синусоидальная мода неустойчивости и возникает периодическое колебание струи. Такой механизм развития колебаний является характерным для плоских струй [1; 2].

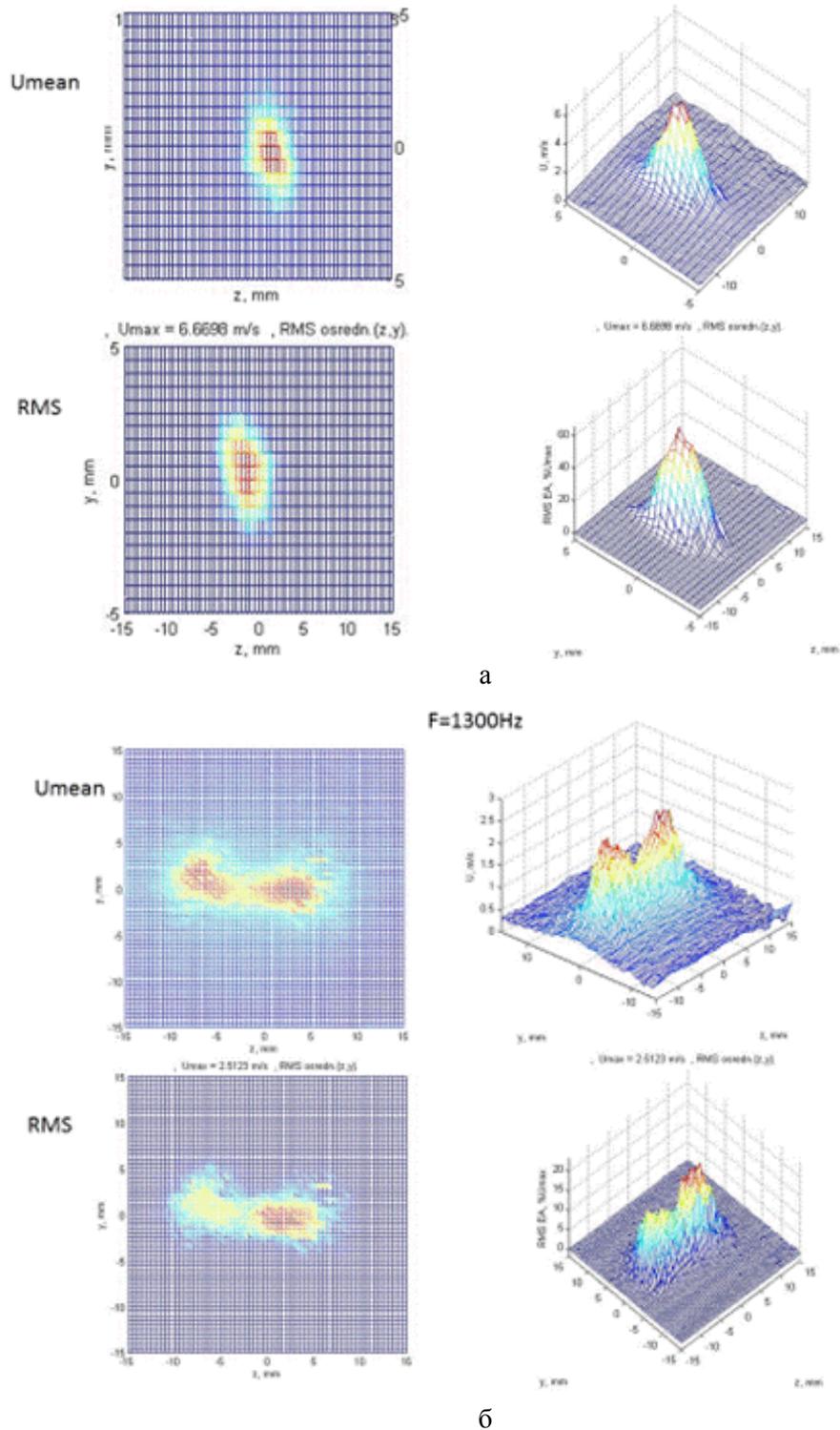


Рис. 6. Распределение продольной компоненты скорости и среднеквадратичных пульсаций для затопленной микроструи: а – при естественных условиях; б – при акустическом воздействии  $f = 1300$  Гц

Таким образом, появляется новая особенность в развитии круглой микроструи, связанная с ее расщеплением под действием акустического поля, и, что еще более важно, устойчивость колебательного процесса к

воздействию конвективных сил. Тот факт, что наличие горения не способно подавить развитие синусоидальной моды неустойчивости, является, на наш взгляд, значимым, так как появляются фактически две струи,

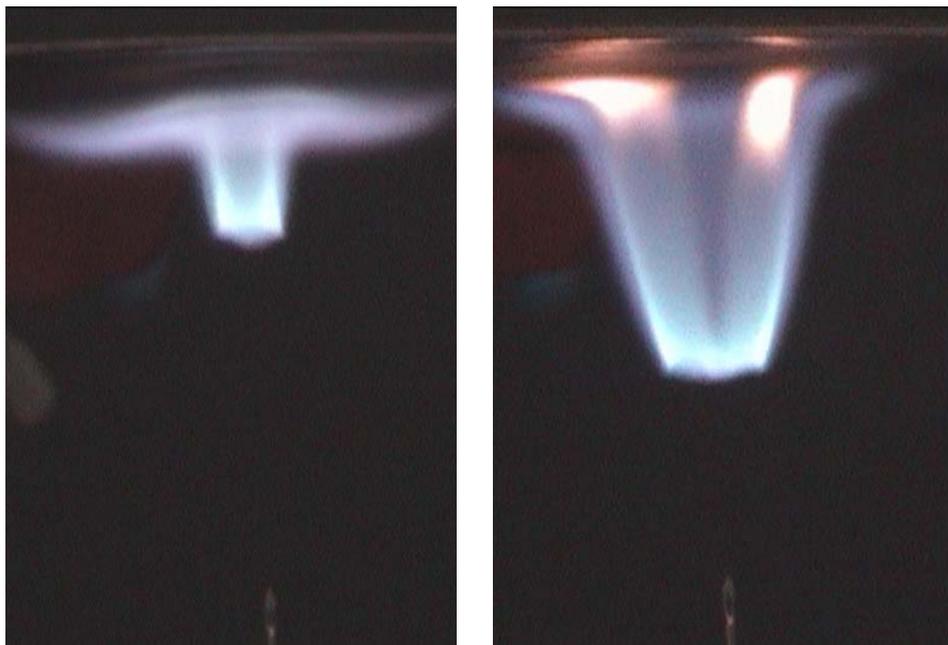


Рис. 7. Визуализация процесса диффузионного горения импактной микроструи пропана при естественных условиях (слева) и с акустическим воздействием  $f = 1\ 300$  Гц (справа)

два максимума температуры при горении. Отличия в развитии воздушной микроструи с акустическим воздействием и без него проиллюстрированы на рис. 6. При естественных условиях существует один максимум в распределении продольной компоненты средней скорости, и он совпадает с максимумом среднеквадратичных пульсаций. При наложении акустического поля в трансверсальном направлении, т. е. в направлении движения акустической волны перпендикулярно к оси струи, наблюдаются два выраженных максимума в распределении скорости и пульсаций. Соответственно в данных областях происходит более интенсивное перемешивание, а для случая диффузионного горения в этих областях происходит интенсивное подмешивание окислителя к газу, как было показано выше.

Важным представляется влияние акустического поля на развитие импактной микроструи пропана при диффузионном горении. На рис. 7 показаны картины визуализации процесса диффузионного горения импактной микроструи пропана при естественных условиях и при воздействии акустического поля с частотой 1 300 Гц. Для обоих случаев начальные условия предполагали наличие поднятого факела. На картине справа зарегистрировано наличие двух факелов. Таким образом, площадь контакта факела и огра-

ничающей поверхности импактной струи становится больше в сравнении с аналогичным случаем при естественных условиях и ведет к ускорению процесса теплопередачи. Если использовать вместо газа воздушную среду, можно предположить ускорение процесса охлаждения нагретой ограничивающей поверхности. Следовательно, использование акустического поля является эффективным методом управления развитием воздушной микроструи и способом ускорения процессов смешения и теплообмена при диффузионном горении.

## Выводы

По результатам настоящих экспериментальных исследований процесса развития микроструи пропана в режиме диффузионного горения и без горения как при акустическом воздействии, так и без него, можно сделать следующие выводы.

1. Показано отличие в развитии микроструи пропана для поднятого и присоединенного факела для диффузионного горения при воздействии акустического поля.

2. Установлено, что поднятое пламя при диффузионном горении круглой микроструи подвержено уплощению и раздвоению в поперечном акустическом поле аналогично

свободной круглой воздушной микроструе без горения в поперечном акустическом поле.

3. Установлено, что фронт пламени при поднятом диффузионном горении круглой микроструи существенно расширяется при воздействии поперечного акустического поля. Это позволяет говорить о возможности влияния на процесс горения.

### Список литературы

1. Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко Ю. А., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Вестн. Новосиб. Гос. ун-та. Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 2. С. 28–42.

2. Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Kozlov G. V., Litvinenko M. V. // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20 (3). P. 1–18.

3. Foucault L. Ann. de l'observ. imp. De Paris 5, 1858. 203 p.

4. Toepler A. Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode. Bonn, 1864.

5. Васильев Л. А. Теневые методы. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968.

6. Бойко В. М., Оришнич А. М., Павлов А. А., Пикалов В. В. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте: Монография / РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича. Новосибирск, 2009. 450 с.

*Материал поступил в редколлегию 13.10.2015*

**Yu. A. Litvinenko<sup>1</sup>, A. B. Balbutsky<sup>2</sup>, V. V. Vikhorev<sup>2</sup>  
G. V. Kozlov<sup>1</sup>, M. V. Litvinenko<sup>1,2</sup>**

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

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

*litur@itam.nsc.ru*

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEVELOPMENT OF HYDRODYNAMIC INSTABILITY IN ROUND MICROJET UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL ACOUSTIC FIELD WITH AND WITHOUT BURNING

Experimental study of subsonic round micro jets in the diffusion combustion of propane and without combustion at low Reynolds numbers was performed. Development of the jet was as under natural conditions without the acoustic excitation and as acoustic excitation of high intensity (90–100 dB), frequency of acoustic oscillations was from a few Hz to 6 kHz. The jet flow was realized through the nozzle of round cross-section with a bevel of 45° and a diameter  $d = 0,45$  mm. Blown through the nozzle mixture of propane-butane previously passed through the evaporator, then through flowmeter (two-channel PR4000B) gas consumption. The studies were performed using Schlieren method based on the IAB-451. The pictures of the shadow visualizations was received, the presence of a developing hydrodynamic instability was found, including the presence of convective forces (by burning). The pictures of diffusion combustion of round propane-butane micro-jet at various modes of combustion – lifted and attached flame were received. It was found that the flame in the diffusion combustion of round microjet at an external acoustic field, exposed to flattening and bifurcation as the air free round microjet, while the source of acoustic oscillations is oriented perpendicular to the jet. The pictures of the diffusion combustion for splitting impact jet by acoustic field were obtained. It was found that in this case on the limits plate two temperature maximum were realized.

*Keywords:* shadow pictures, acoustic field, diffusion combustion, round microjet, impact micro-jets, propane-butane jet.