

УДК 532.525.2

Г. Р. Грек¹, М. М. Катасонов¹, В. В. Козлов^{1,2}, О. П. Коробейничев³
Ю. А. Литвиненко¹, А. Г. Шмаков³

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

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт химической кинетики и горения СО РАН
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: kozlov@itam.nsc.ru

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРОПАНА В КРУГЛОЙ И ПЛОСКОЙ МАКРО- И МИКРОСТРУЕ В ПОПЕРЕЧНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА *

Представлены результаты экспериментальных исследований круглой и плоской макро- и микроструй с ударным и параболическим профилем скорости на срезе сопла в присутствии поперечного акустического поля при малых числах Рейнольдса. Показаны особенности их развития в данных условиях. На основе полученного знания обнаружен и объяснен ряд новых явлений, касающихся развития пламени в поперечном акустическом поле при горении пропана в данных струйных течениях.

Ключевые слова: струя, акустика, визуализация потока, термоанемометрические измерения, пламя, горение.

Введение

Понимание механизма развития круглой струи в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла и воздействия акустики очень важно для объяснения механизмов струйного горения. Процесс горения является одним из видов химической реакции, поэтому исследования его проводили, по существу, с давних времен в рамках одной из областей химической науки. Однако при горении, например струйном горении, происходят и физические процессы, такие как тепло- и массоперенос, возникновение и

развитие когерентных структур и т. п. Естественно, что горение должно рассматриваться в химическом и физическом аспектах. Например, можно сказать, что процесс самовоспламенения гомогенной газовой смеси является именно химической реакцией, однако различные реально наблюдаемые процессы самовоспламенения обусловлены и физическими явлениями. Важнейшими факторами, определяющими характер горения диффузионных пламен (*факелов*), являются такие физические процессы, как диффузия, смешение. Скорость распространения пламени в гомогенной газовой среде в

* Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 24 и проектов РФФИ (гранты № 11-01-00292, 12-08-31083, 12-07-00548, 13-07-00616).

большей степени определяется теплопередачей и диффузией, чем скоростью химических реакций [1].

Движение пламени по газовой смеси называется распространением пламени. При этом газовая смесь делится на две части: сгоревший газ, через который пламя уже прошло, и несгоревший газ, который вскоре войдет в область пламени. Граница между этими двумя частями горячей газовой смеси называется *фронтом пламени*. Распространение пламени бывает двух типов: детонационная волна и волна горения. Волна горения характеризуется тем, что пламя распространяется посредством теплопередачи и диффузии активных молекул от фронта пламени, последовательно преобразовывая несгоревший газ в продукты сгорания. *Скорость распространения* волны горения значительно ниже скорости звука, а скорость распространения детонационной волны превышает скорость звука. *Скорость горения* определяется как нормальная (к фронту пламени) составляющая скорости перемещения пламени по еще не сгоревшей (исходной) газовой смеси. *Скорость горения* отличается при этом от скорости пространственного движения пламени, т. е. от *скорости распространения* пламени. Фронт пламени смещается вследствие движения потока газовой смеси и расширения продуктов сгорания, поэтому *скорость распространения* пламени представляет собой сумму скоростей этих потоков и *скорости горения* [1].

Если горючее распыляется в воздухе или кислороде и перемешивается с ними в процессе горения, то пламя называется *диффузионным*. Горение струи при ее истечении из трубы (сопла) в открытое пространство или камеру – очень распространенный в технике вид горения. Различают горение при истечении заранее перемешанной смеси и при раздельном истечении горючего и окислителя, когда процесс определяется перемешиванием (диффузией) двух потоков. В *диффузионном* пламени диффузия является определяющим фактором горения, в отличие от пламени при горении предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя. *Диффузионное* пламя может быть стационарным (при непрерывном сгорании в различных горелках и газовых турбинах) и нестационарным (при прерывистом сгорании, например, в двигателе внутренне-

го сгорания). Наиболее типичное диффузионное (струйное) пламя образуется при воспламенении струи горючего газа, вытекающего из длинной трубки малого диаметра в атмосферу воздуха. Когда скорость струи невелика, течение, естественно, является ламинарным, граница пламени устойчива; пламя на вид гладкое; горение протекает спокойно. По мере увеличения скорости струи, высота пламени возрастает. Однако такая картина наблюдается лишь до некоторой предельной скорости струи. При дальнейшем увеличении скорости струи граница пламени становится неустойчивой, причем неустойчивость вначале возникает лишь у вершины пламени, а затем постепенно распространяется вниз, к срезу горелки. Одновременно резко уменьшается высота пламени. При последующем увеличении скорости струи высота пламени перестает зависеть от скорости струи и остается примерно постоянной, граница пламени резко пульсирует, горение сопровождается сильным шумом. При еще более высокой скорости струи пламя отрывается от среза горелки и устанавливается на некотором расстоянии над горелкой. Пламена такого типа называются *приподнятыми пламенами*. Реально область, в которой высота пламени почти не зависит от скорости струи, соответствует турбулентному течению струи. Это и есть так называемые турбулентные диффузионные пламена. Область, в которой высота пламени возрастает по мере увеличения скорости струи, относится к ламинарным диффузионным пламенам. Между ними имеется некоторая переходная область. Переход от ламинарного диффузионного пламени к турбулентному определяется изменением характера течения струи. Скорость распространения турбулентного пламени зависит от скорости потока, а также степени и масштаба турбулентности. Кроме того, на течение струи, разумеется, оказывает влияние изменение температуры в результате горения. Поэтому течение струи, в которой отсутствует горение, отличается от течения горячей струи [1]. Зависимость длины диффузионного факела от скорости истечения газа показана на рис. 1.

Изучению процесса диффузионного (в частности, струйного) горения посвящено большое количество аналитических, численных и экспериментальных работ [3–6]. Например, приподнятые турбулентные пла-

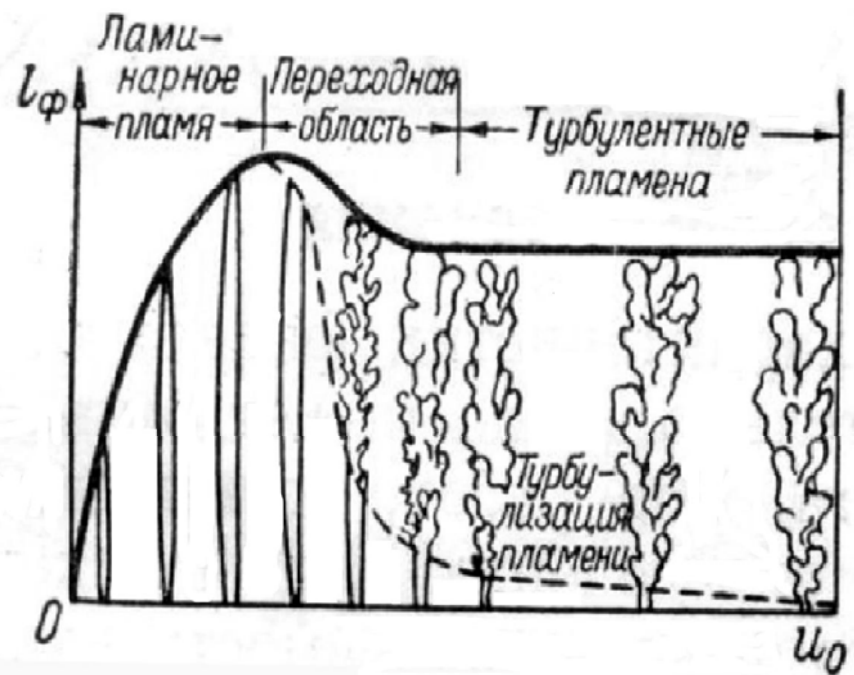
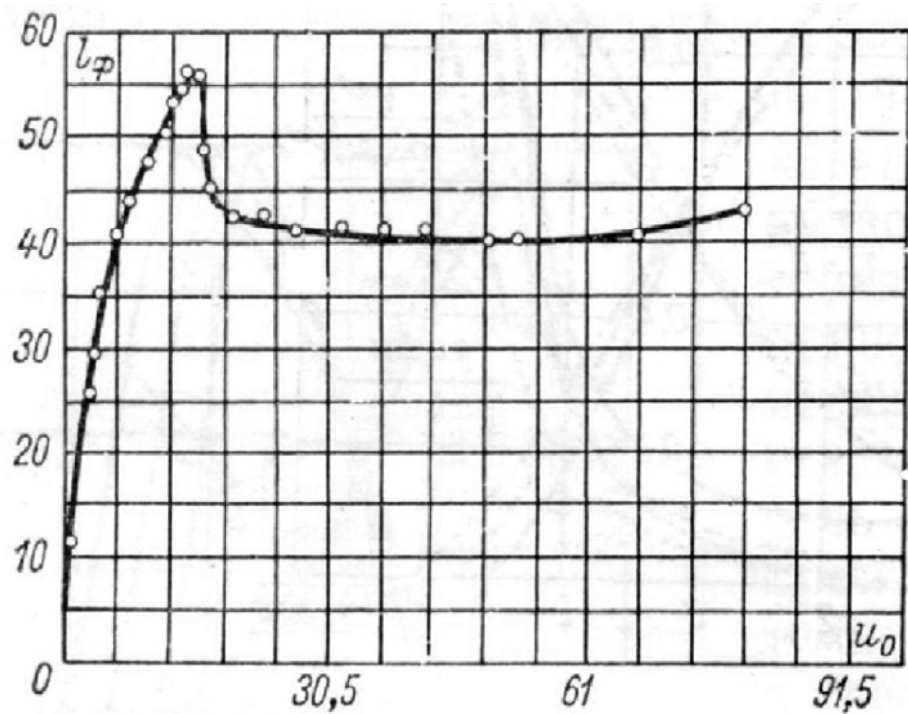


Рис. 1. Зависимость длины диффузионного факела от скорости истечения газа [2]

мена вызывают значительный интерес в связи с тем, что они включают в себя много фундаментальных механизмов, управляющих стабилизацией и затуханием пламени в практических горелках. Авторы работы [3] полагают, что в приподнятых факелах топливо и воздух предварительно, до воспламенения, полностью перемешиваются и что стабилизация наступает, когда локальная скорость течения вдоль стехиометрического контура равняется скорости распространения турбулентного факела. В модели [4] приведены доводы в пользу того, что топливо и воздух не перемешиваются в точке стабилизации пламени и что отрыв может быть объяснен в условиях концепции ламинарного пламени. Авторы модели [5] полагают, что приподнятое пламя будет стабилизировано, когда топливо и воздух перемешаны на молекулярном уровне вблизи условий стехиометрии (соотношение масс (объемов) реагирующих веществ), и локальная скорость течения будет равняться максимальной скорости распространения пламени. Какая из этих моделей ближе к истинной физической картине, не ясно. Проведенные с целью оценить предлагаемые теоретические модели экспериментальные исследования [6] показали, что первичными факторами, управляющими устойчивостью факела, являются локальная стехиометрия и характеристики турбулентности, а не диссипация. В работе [7] показано, что скорость турбулентного горения многократно превышает скорость горения в ламинарном режиме. Большую роль в механизме стабилизации факелов играют когерентные структуры турбулентной струи. Существуют значительные взаимодействия между крупномасштабной структурой, связанной с центральной струей, и зоной самого пламени.

В экспериментах [8] обнаружено, что средняя высота отрыва турбулентного диффузионного пламени растет с ростом сопровождающего течения (воздуха) и скорости струи на срезе сопла. Колебания высоты отрыва факела имеют тенденцию к увеличению с ростом как самой высоты отрыва факела, так и ширины струи. Данное наблюдение показывает, что механизм затухания факела может быть связан с крупномасштабной вихревой структурой. Найдено два критерия стабилизации пламени [8]. **Первый критерий** устанавливает, что факел самостабилизируется, когда локальная ско-

рость газа близка к скорости распространения предварительно перемешанного ламинарного факела, и не превышает $3S_L$, где S_L – максимальная скорость распространения предварительно перемешанного ламинарного пламени. Этот результат объясняет, почему малые скорости сопутствующего течения (подсасываемого воздуха) могут иметь такое большое влияние на полную стабилизацию факела, и наводит на мысль, что факел будет затухать при скоростях сопутствующего течения, превышающих эту величину. **Второй критерий** стабилизации пламени указывает на то, что структура смеси топливо / воздух должна быть в пределах воспламеняемости, желательно вблизи условий стехиометрии, когда скорость распространения пламени максимальна. Авторы работы [9] показали, что зона воспламеняемости реагентов находится на базе (передней границе) приподнятого факела и что распространение предварительно перемешанного факела может объяснить движение вверх по потоку базы факела. Толщина этого слоя воспламеняемости меняется в зависимости от характеристик смешения крупномасштабных вихрей, генерируемых в слое сдвига.

Важным фактором в процессе горения является воздействие на него акустики. Упорядоченные вихревые структуры [10] сильно восприимчивы к акустическим возмущениям. Следовательно, искусственно генерированные возмущения могут быть использованы для значительного изменения и даже управления развитием струйных структур [11] (например, для снижения турбулентности [12; 13]). С другой стороны, акустические поля обычно присутствуют при горении, их появление создает новые условия в окружении струйного пламени. Зная природу этих полей, можно помочь устранить трудности горения. Так, различные авторы изучили диффузию или предварительно не перемешанные пламена в присутствии возбуждения акустики. В ламинарных диффузионных пламенах акустика придает особое значение поведению поднятого пламени [14]. В поднятых струйных пламенах акустика может быть использована для изменения процесса горения с целью уменьшения выбросов сажи и окиси азота [15]. В работе [16] показано, что высота подъема снижается с усилением струи при ее продольном возбуждении на естествен-

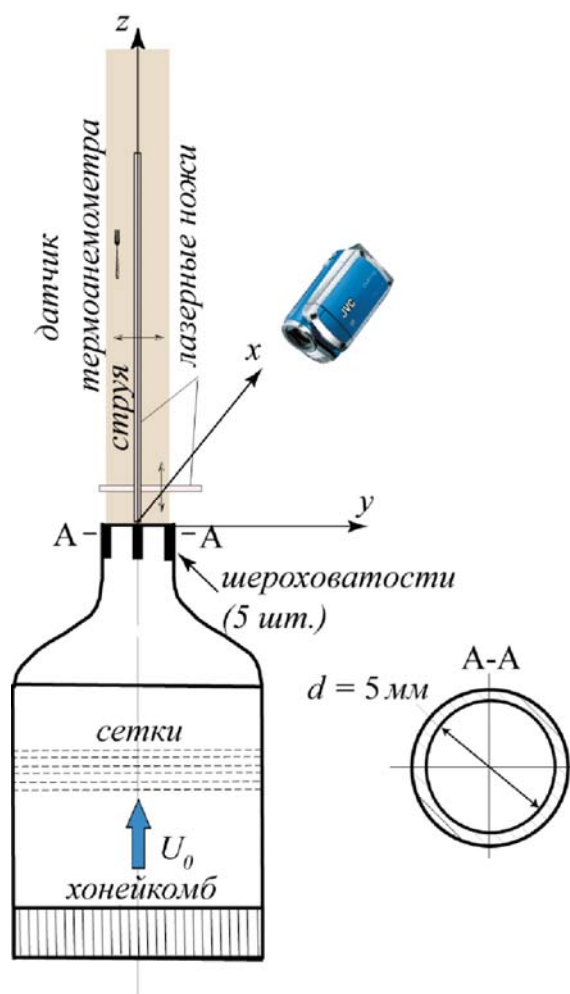


Рис. 2. Схема эксперимента: установка для реализации круглой струи с ударным профилем скорости на срезе сопла

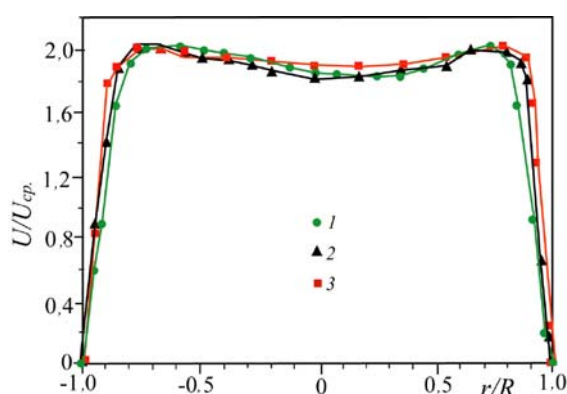


Рис. 3. Профили скорости в поперечном сечении круглой струи на различных расстояниях от среза сопла: 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 15 мм

ной частоте струи, но не была подчеркнута важность трехмерных неустойчивостей.

В работе [17] исследован процесс раздвоения пламени при горении малоразмерных круглой и плоской струй под воздействием поперечного акустического поля.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия на структуру и характеристики развития ламинарной и турбулентной круглых струй без горения и при горении. Причем на первом этапе будут проведены предварительные исследования диффузионного ламинарного и турбулентного горения струи пропана без акустического воздействия с целью выявления особенностей данного процесса при изменении начальных условий на срезе сопла. Далее будет проведено экспериментальное исследование диффузионного горения пропана и горения предварительно перемешанной смеси пропан / воздух в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле.

Диффузионное горение газообразного топлива (пропана) в круглой струе

Ламинарная и турбулентная круглая струя с ударным профилем скорости на срезе сопла. На рис. 2 показана схема экспериментальной установки для реализации круглой струи диаметром 5 мм с ударным профилем скорости на срезе сопла (рис. 3). Как и в случае исследования круглой струи диаметром 20 мм, описанного в работе [18], использована методика дымовой визуализации течения с записью видеoinформации, получаемой при синхронизации схода вихрей Кельвина – Гельмгольца и включения лазерной подсветки струи акустикой, на видеокамеру.

Полосчатые структуры были генерированы с помощью элементов шероховатости (5 шт.), наклеенных на внутреннюю поверхность сопла. На картинах дымовой визуализации струи (рис. 4) хорошо видны вихри Кельвина – Гельмгольца и результат их взаимодействия с полосчатыми структурами, приводящего к звездообразному искажению кольцевых вихрей в виде пяти азимутальных лучей, соответствующих позициям полосчатых структур.

Экспериментальные исследования горения струи газообразного топлива (пропана), выходящей из сопла экспериментальной

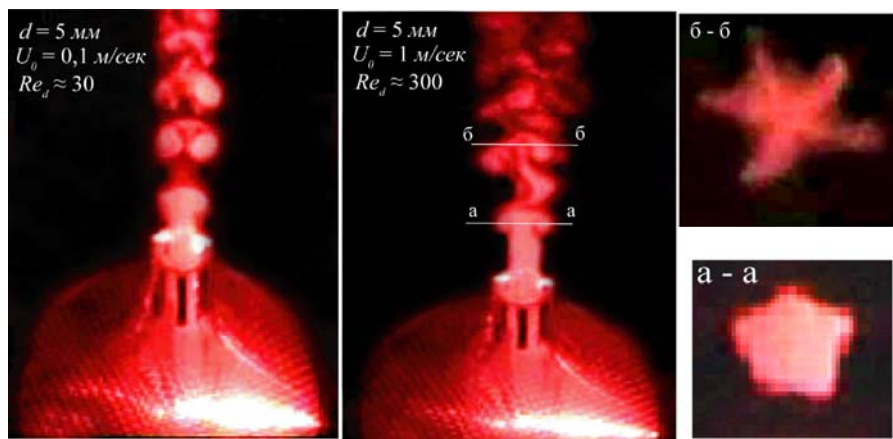


Рис. 4. Картины визуализации дымом общего вида круглой ламинарной струи с ударным профилем скорости на срезе сопла при различной скорости потока и поперечного сечения струи при ее взаимодействии с полосчатыми структурами, генерированными элементами шероховатостей

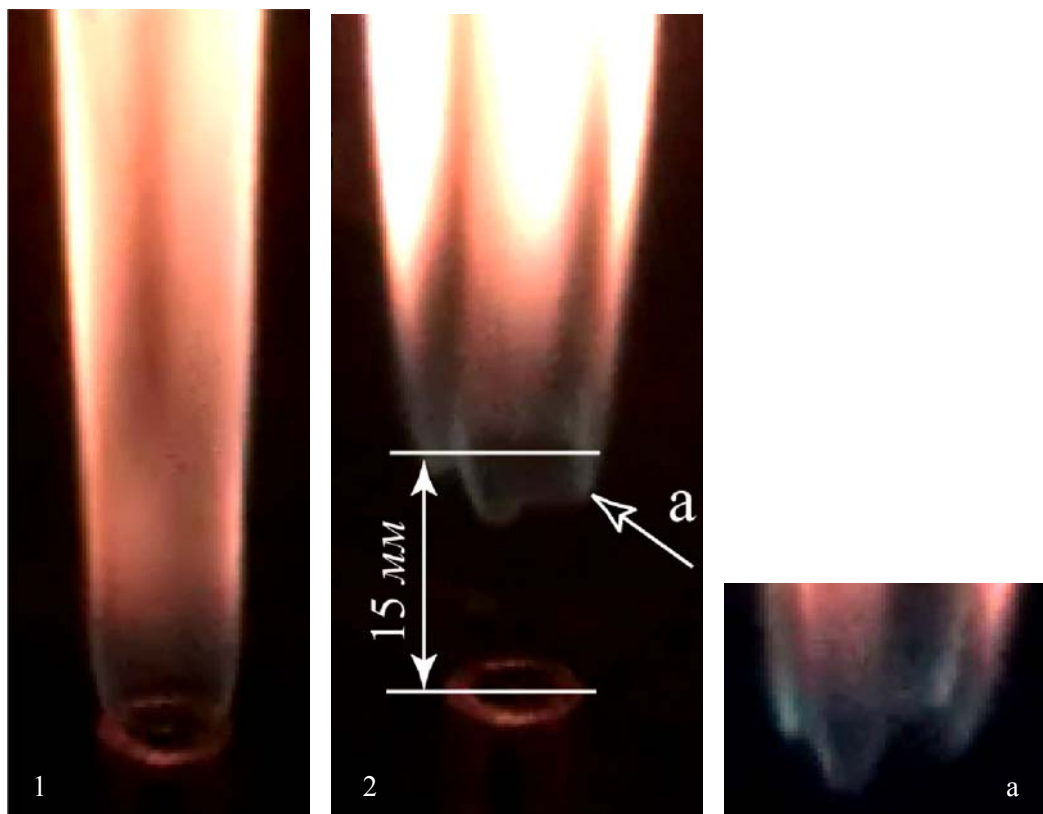


Рис. 5. Картины горения ламинарной (1) и турбулентной (2) круглой струи газообразного топлива, выходящей из установки с ударным профилем скорости на срезе сопла

установки, показали, что при малой скорости истечения струи реализуется процесс горения ламинарной струи с присоединенным к срезу сопла пламенем. При увеличении скорости истечения реализуется процесс горения турбулентной струи с пламенем, оторвавшимся от среза сопла (рис. 5).

Причем можно отчетливо наблюдать на торе оторвавшегося от среза сопла пламени турбулентной струи деформацию первого кольцевого вихря, вызванную наличием полосчатых структур. По-видимому, пламя распространяется вниз по потоку начиная с первой когерентной структуры, указывая

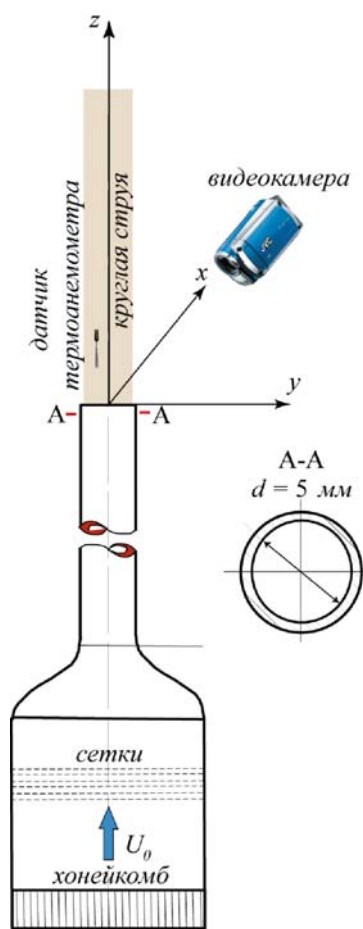


Рис. 6. Схема эксперимента: установка для реализации круглой струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла

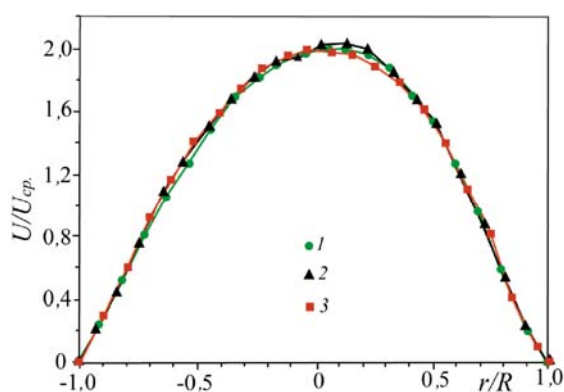


Рис. 7. Профили скорости в поперечном сечении круглой струи на различных расстояниях от среза сопла: 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 15 мм

на то, что процесс горения не влияет на структурные характеристики круглой струи, имеющие место в отсутствие процесса горе-

ния (кольцевые вихри, полосчатые структуры и результат их взаимодействия).

Ламинарная и турбулентная круглая струя с параболическим профилем скорости на срезе сопла. На рис. 6 показана схема экспериментальной установки для реализации круглой струи диаметром 5 мм с параболическим профилем скорости на срезе сопла (рис. 7). Предварительные экспериментальные исследования горения струи газообразного топлива, выходящей из сопла данной экспериментальной установки, показали, что при малой скорости истечения струи реализуется горение ламинарной струи с присоединенным к срезу сопла пламенем, а при увеличении скорости истечения реализуется горение турбулентной струи с пламенем, оторвавшимся от среза сопла (рис. 8). Причем можно отчетливо наблюдать на торце оторвавшегося от среза сопла пламени турбулентной струи кольцевое образование, демонстрирующее распространение пламени в узкой области на периферии струи.

Диффузионное горение газообразного топлива (пропана) в круглой микроструе при акустическом воздействии

Круглая микроструя в поперечном акустическом поле (уплощение струи). Экспериментальные исследования структуры и характеристик развития круглой макро- (диаметр выходного отверстия сопла 1,5 мм) и микроструи (диаметр выходного отверстия сопла от 200 до 500 мкм) под воздействием поперечного акустического поля большой интенсивности (90–100 дБ) показали, что струя уплощается, начинает синусоидально колебаться как единое целое и далее вниз по потоку расщепляется на две струи [19; 20]. Были проведены экспериментальные исследования процесса диффузионного горения пропана в круглой струе при акустическом воздействии на пламя. Схема эксперимента представлена на рис. 9.

Термоанемометрические измерения распределения средней (U) и пульсационной (u') составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла и скорости потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с показали наличие ударного профиля скорости при коротком канале сопла (рис. 10) и пара-

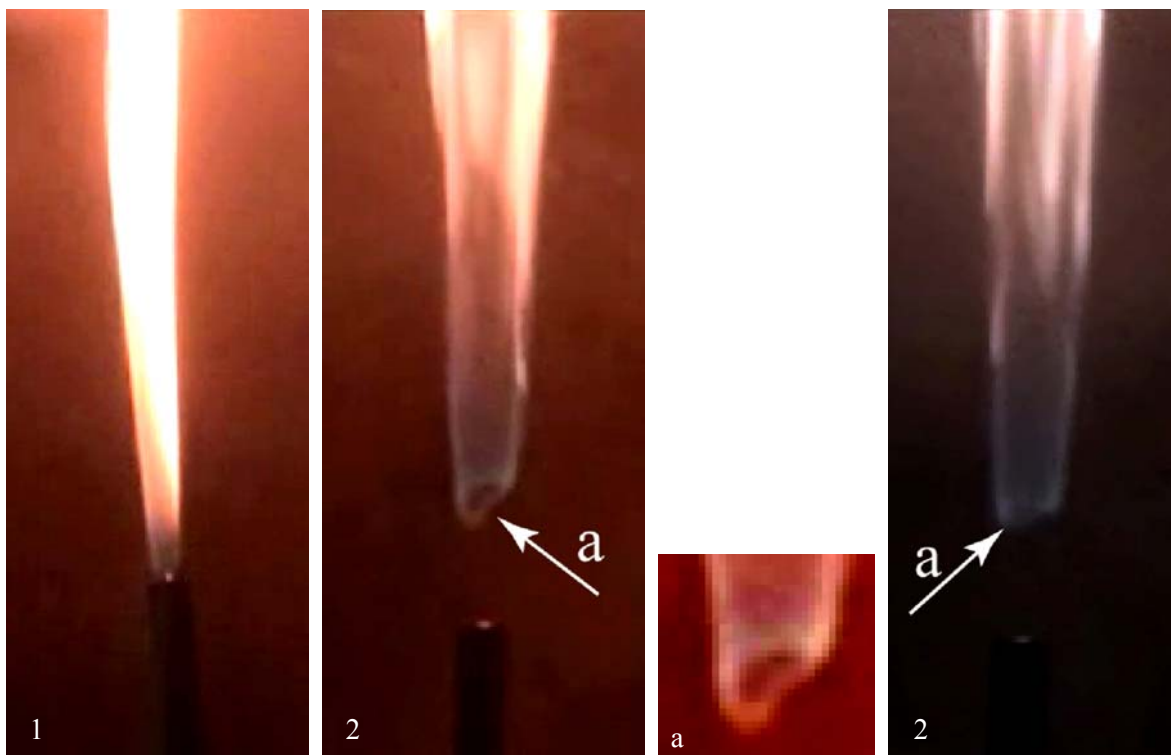


Рис. 8. Картины горения ламинарной (1) и турбулентной (2) круглой струи пропана, выходящей из установки с параболическим профилем скорости на срезе сопла

болического профиля скорости (рис. 11) по причине большого удлинения канала сопла ($l/d \approx 40$, где l – длина канала сопла, d – диаметр выходного отверстия сопла).

Следует отметить, что нам впервые удалось измерить и обнаружить принципиальную разницу (ударную и параболическую формы струи) в распределении составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи при столь малом ее диаметре ($d = 1$ мм). С этой целью был использован датчик термоанемометра с длиной чувствительного элемента 0,3 мм, с шагом измерений 0,02 мм, и проводилось осреднение по времени показаний датчика в каждой точке измерений.

Как видно из графиков (рис. 10, 11), форма профиля скорости на срезе сопла ударная с максимумом интенсивности пульсаций скорости ($u' \approx 0,4\% U_0$) в областях максимального градиента скорости и минимумом интенсивности пульсаций скорости ($u' = 0,2\% U_0$) в области безградиентного ядра струи для случая короткого канала сопла (см. рис. 3) и форма профиля скорости на срезе сопла параболическая с максиму-

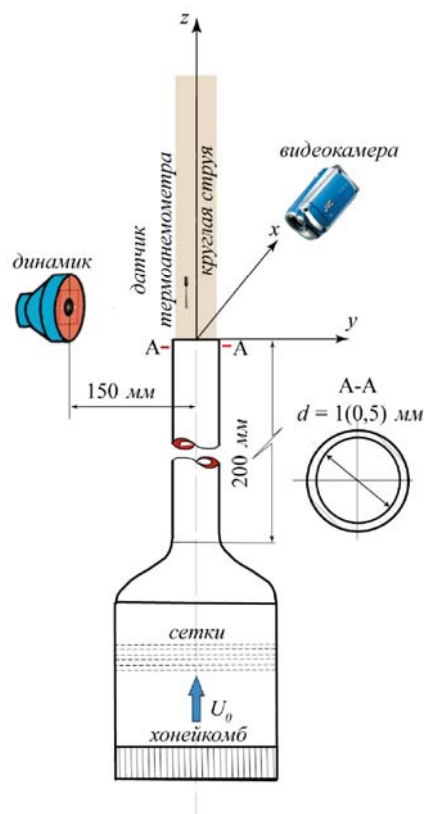


Рис. 9. Схема эксперимента

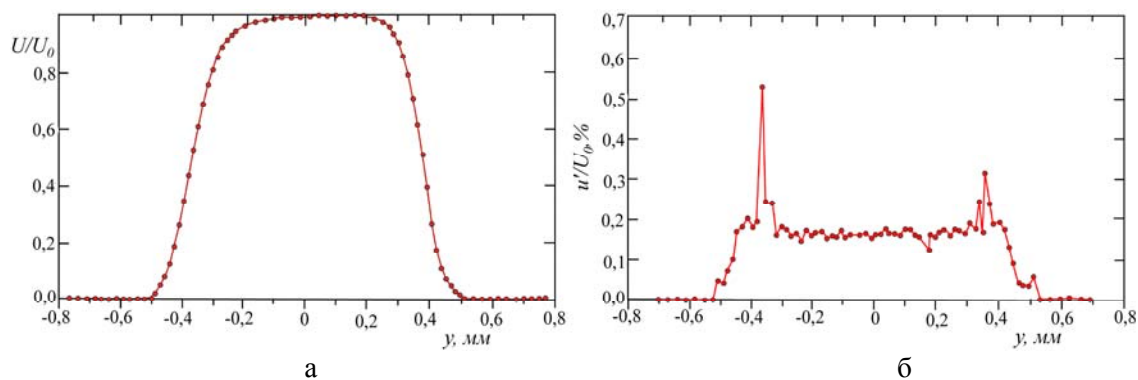


Рис. 10. Распределение средней (а) и пульсационной (б) составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая короткой длины канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/с

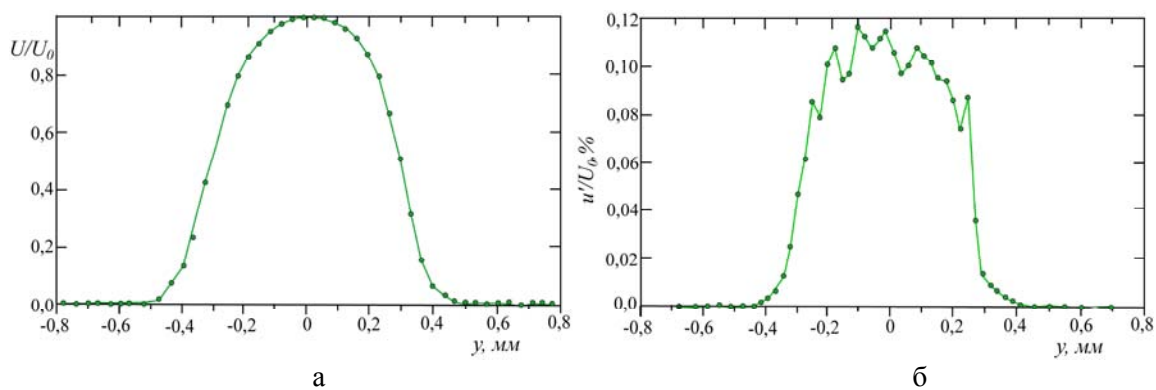


Рис. 11. Распределение средней (а) и пульсационной (б) составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая удлиненного ($l/d \approx 40$) канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/с

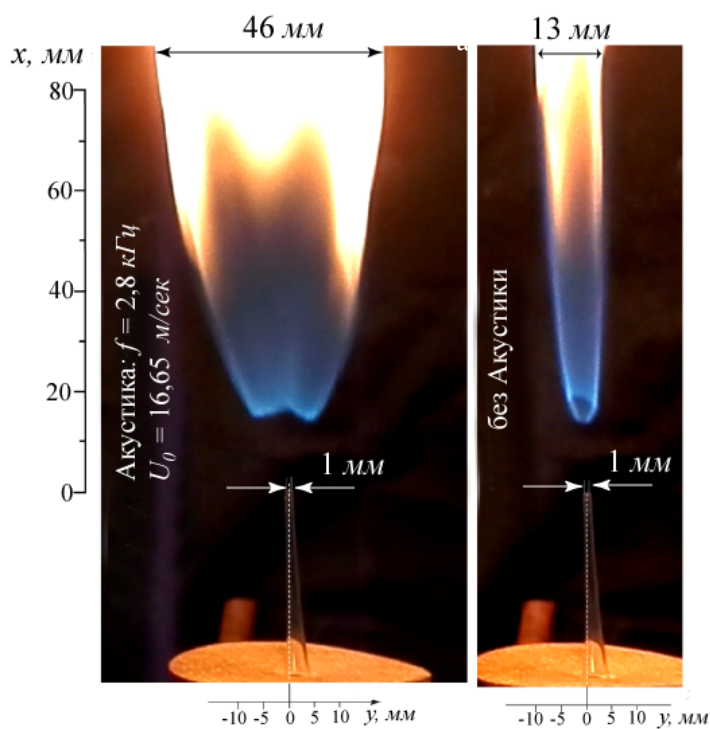


Рис. 12. Процесс уплощения пламени круглой микроструи в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (а – горение струи при акустическом воздействии, б – без акустического воздействия, $f = 2,8$ кГц), $U_0 = 16,65$ м/с

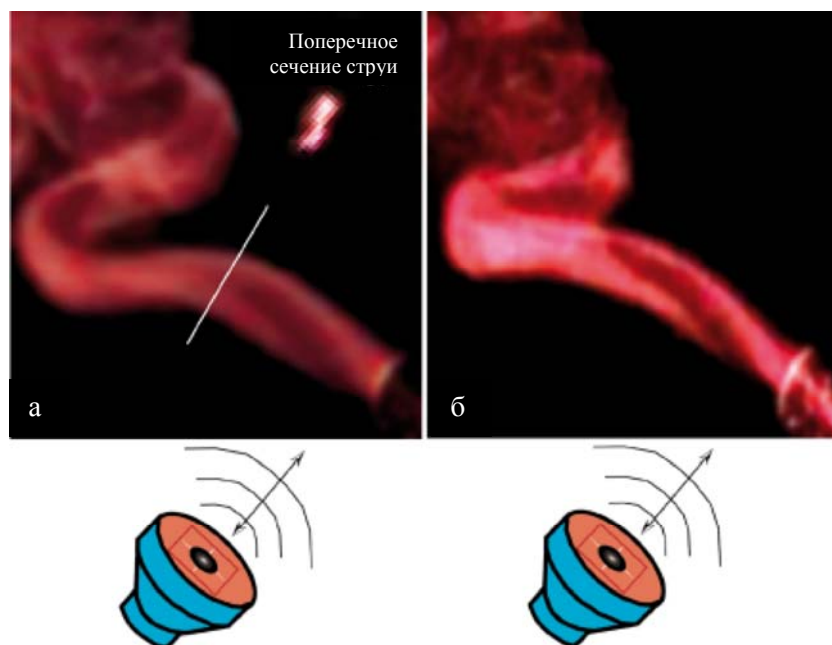


Рис. 13. Картины визуализации дымом развития и уплощения круглой микроструи в присутствии поперечного акустического поля ($f = 40$ Гц (а) и 100 Гц (б), интенсивность звука 90 дБ) [19]

мом интенсивности пульсаций скорости ($u' \approx 0,1 \% U_0$) на оси струи для случая удлиненного канала сопла (см. рис. 11). Данные результаты измерений коррелируют с данными измерений профилей средней и пульсационной составляющих скорости для круглых макроструй [18]. Однако в отличие от круглых макроструй с ударным профилем скорости на срезе сопла, где развитие струи связано с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца и сопровождается генерацией кольцевых вихрей по типу варикозной неустойчивости полосчатых структур в пристенных сдвиговых течениях, параболические макро- и микроструя как с ударным, так и параболическим профилем скорости на срезе сопла подвержены лишь синусоидальной неустойчивости как единое целое. Попытки возбудить варикозную моду неустойчивости (кольцевые вихри) в данных течениях не увенчались успехом. Эксперименты показали, что макроструя с параболическим профилем скорости на срезе сопла сохраняла чисто ламинарную форму течения большой дальности без каких-либо кольцевых вихрей. Механизм турбулентного разрушения струи был связан с иными видами неустойчивостей. С другой стороны, круглая микроструя как с ударным,

так и параболическим профилем скорости на срезе сопла также сохраняла чисто ламинарную форму течения большой дальности без каких-либо кольцевых вихрей.

На основании полученных знаний о характеристиках развития круглой макро- и микроструи как в отсутствие акустического воздействия, так и при его наличии проведены экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Динамика развития пламени записывалась на цифровую видеокамеру, включение которой было синхронизировано с частотой акустического воздействия на струю. Частота акустического воздействия варьировалась от единиц герц до 4 кГц, интенсивность звука составляла 90 дБ. Скорость истечения струи контролировалась с помощью прецизионного расходомера и составляла $U_0 = 16,65$ м/с.

На рис. 12 представлены снимки оторвавшегося от срез сопла пламени как под воздействием поперечного акустического поля, так и без акустического воздействия. Видно, что под воздействием поперечного акустического поля оторвавшееся пламя струи значительно расширилось по сравнению с пламенем без акустического воздей-

ствия – почти в четыре раза. С чем это связано? В работах [19; 20] показано, что круглая микроструя под воздействием поперечного акустического поля уплощается и приобретает свойства, типичные для развития плоских струй, например синусоидальное колебание струи как единого целого (рис. 13).

Следует отметить, что синусоидальное колебание плоской струи как единого целого приводит к естественному уширению струи в плоскости, перпендикулярной плоскости воздействия поперечного акустического поля, и в итоге к разрыву струи на два потока (рис. 14).

В ситуации горения круглой струи (см. рис. 12) динамика развития пламени очень напоминает процесс уплощения круглой струи в поперечном акустическом поле. На снимке струи без акустического воздействия ясно виден торец оторвавшегося пламени в виде искаженной окружности, что указывает на распространение пламени по внешнему контуру именно круглой струи. С другой стороны, струя под воздействием поперечного акустического поля (см. рис. 12) де-

монстрирует отсутствие какого-либо кольца в конфигурации оторвавшегося торца пламени и мощное уширение пламени (примерно в 3 раза) вниз по потоку из-за колебательного процесса несущей пламя струи как единого целого.

Круглая микроструя в поперечном акустическом поле (раздвоение струи). Если рассмотреть поведение пламени струи далее вниз по потоку (рис. 15, выходной диаметр сопла $d = 1$ мм) можно отчетливо наблюдать процесс раздвоения пламени, что напрямую связано с механизмом, наблюдаемым при раздвоении круглой струи в поперечном акустическом поле на два потока (см. рис. 14). Аналогичный результат раздвоения пламени круглой микроструи при диффузионном горении струи пропана, истекающей из сопла диаметром $d = 0,5$ мм, представлен на рис. 16. Виден процесс раздвоения пламени, но при акустическом воздействии на частоте, примерно в 2 раза более высокой, чем в случае, показанном на рис. 15. Таким образом, с уменьшением выходного диаметра сопла растет частота акустики, приводящая к процессу раздвоения пламени круглой микроструи.

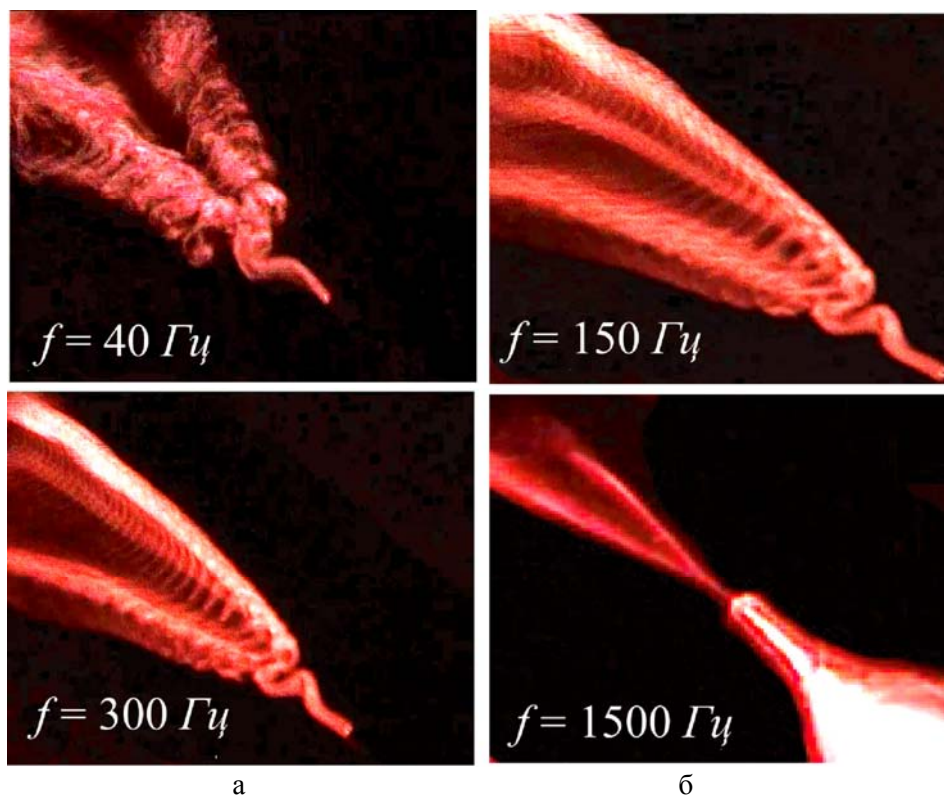


Рис. 14. Картины дымовой визуализации течения круглой струи с параболическим (а) и ударным (б) профилем скорости на срезе сопла с диаметром выходного отверстия 500 и 1 600 $\mu\text{м}$ [20]

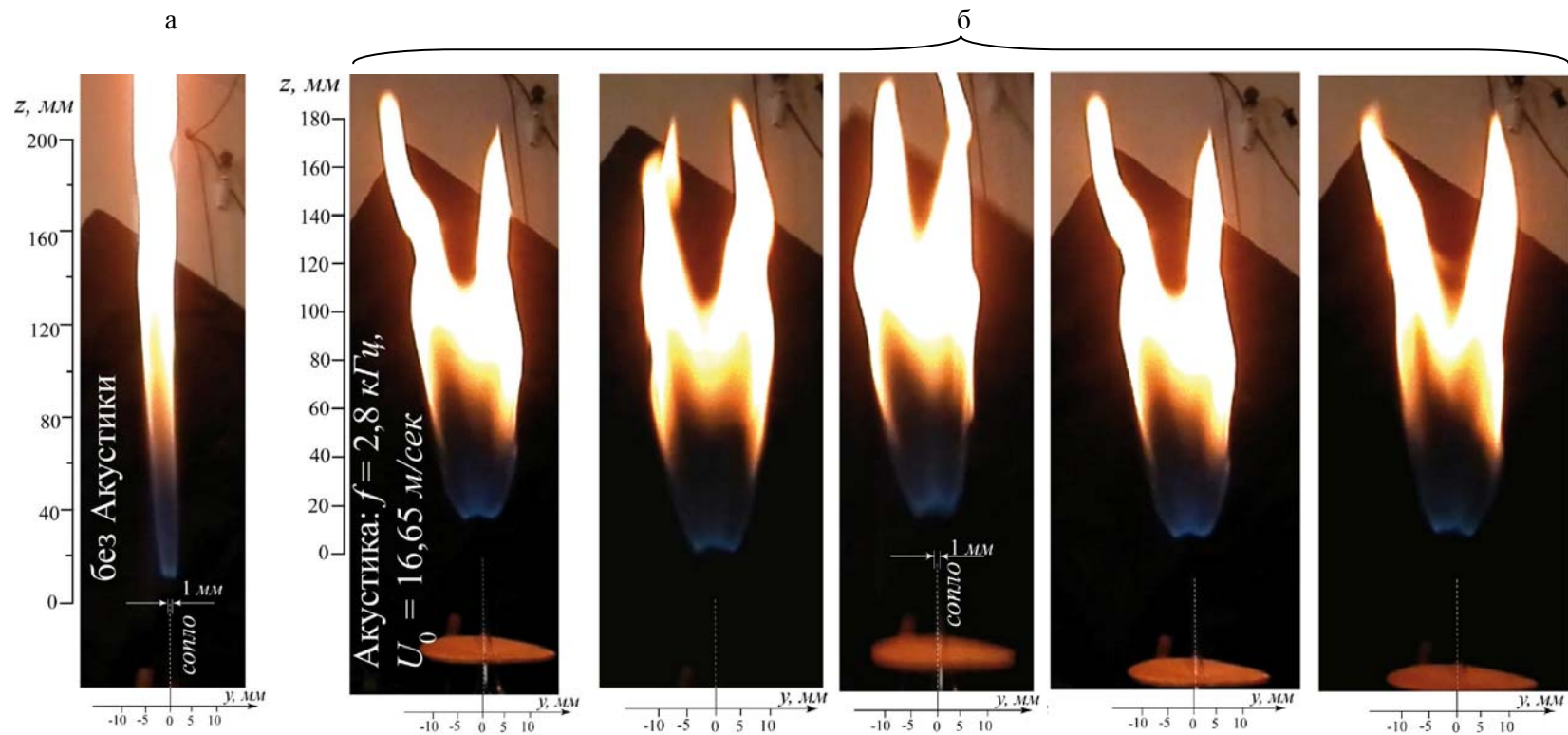


Рис. 15. Процесс раздвоения пламени круглой микроструи ($d = 1 \text{ мм}$) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (а – пламя струи без акустического воздействия, б – снимки пламени струи при акустическом воздействии, $f = 2,8 \text{ кГц}$, $U_0 = 16,65 \text{ м/с}$)

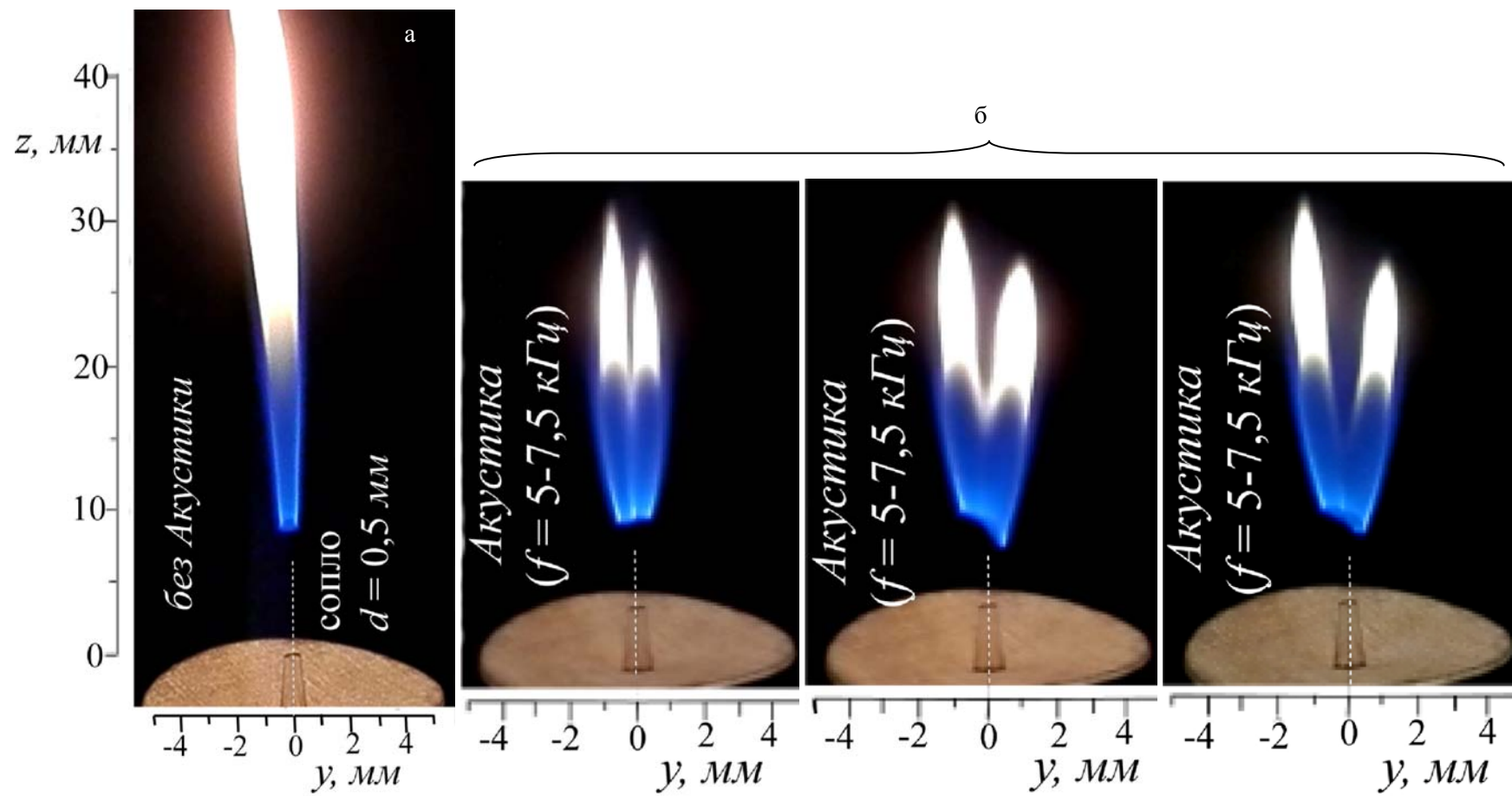


Рис. 16. Процесс раздвоения пламени круглой микроструи ($d = 0,5$ мм) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (а – пламя струи без акустического воздействия, б – снимки пламени струи при акустическом воздействии, $f = 5-7,5$ кГц), $U_0 = 12,5$ м/с

Следует отметить, что в отсутствие акустического воздействия конфигурация пламени, распространяющегося по внешней поверхности круглой микроструи, при диффузионном горении пропана сохраняет типичное состояние для струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Это состояние характеризуется отсутствием когерентных вихревых структур типа кольцевых вихрей и большой дальностью чисто ламинарного течения в струе [21]. Данная конфигурация пламени сохраняется как при присоединенном, так и при оторвавшемся пламени.

В нашем случае раздвоение пламени струи под воздействием поперечного акустического поля наблюдалось только в ситуации оторвавшегося от среза сопла пламени, в отличие от ситуации раздвоения присоединенного к срезу сопла пламени под воздействием акустики, наблюдаемой авторами работы [17]. С другой стороны, авторы недавно опубликованной работы [22] также обнаружили раздвоение пламени круглой микроструи под воздействием акустики именно у оторвавшегося от среза сопла пламени. Отметим следующее обстоятельство. Из работ [17; 22] остается непонятным сам механизм раздвоения пламени круглой струи под воздействием акустики. Как мы полагаем, объяснение дают результаты наших исследований по изучению влияния поперечного акустического поля на поведение круглой микроструи в отсутствие горения [19; 20]. Именно уплощение струи под воздействием акустики преобразует ее в плоскую квазидвумерную струю, подверженную синусоидальному колебательному процессу, разрывающему струю далее вниз по потоку на две струи [19; 20]. Установлено также, что синусоидальная неустойчивость пламени круглой микроструи, т. е. ее уплощение и синусоидальное колебание, зависит от направления вектора скорости потока, создаваемого поперечным акустическим полем.

Диффузионное (пропан) и предварительно перемешанное (пропан / воздух) горение газообразного топлива в плоской микроструе при акустическом воздействии

Плоская микроструя (сопло № 1) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (раздвоение струи). Экспериментальные исследования структуры

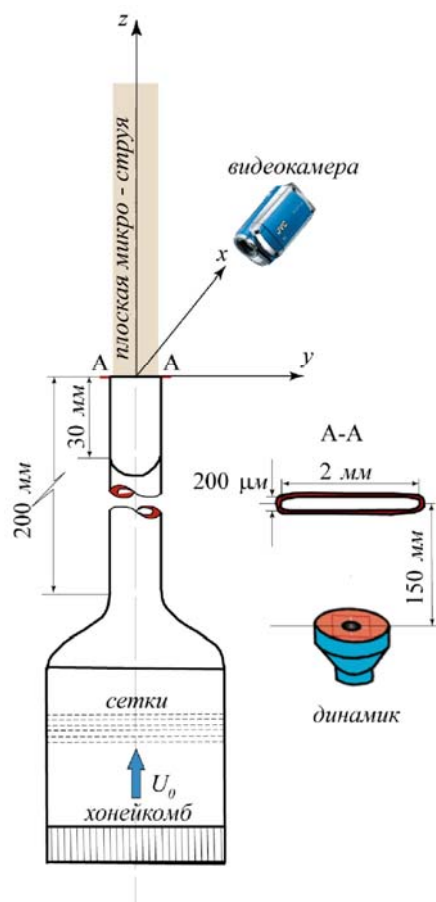


Рис. 17. Схема эксперимента

и характеристик развития плоской макро- (ширина выходной щели сопла $h = 2,5$ мм) и микроструи (ширина выходной щели сопла $h = 700, 500, 200$ мкм) под воздействием поперечного акустического поля большой интенсивности (90–100 дБ) показали, что струя подвержена синусоидальному колебательному процессу как единое целое и далее вниз по потоку расщепляется на две струи [19; 20]. Проведены экспериментальные исследования процесса диффузионного горения пропана в плоской струе на выходе из сопла малого удлинения ($l/h = 10$, где l – длина щели сопла, h – ширина щели сопла) при акустическом воздействии на пламя. Схема эксперимента представлена на рис. 17.

На основании полученных знаний о характеристиках развития плоской макро- и микроструи как в отсутствие акустического воздействия, так и при его наличии проведены экспериментальные исследования диффузионного (пропан) и предварительно перемешанного (пропан / воздух) горения

плоской микроструи с параболическим профилем скорости на срезе сопла. Параболический профиль скорости на срезе сопла был обеспечен результатами наших предыдущих исследований [23], показавших, что он реализуется при достаточно большом удлинении канала сопла и соотношении $l/h \geq 150$. Динамика развития пламени записывалась на цифровую видеокамеру, включение которой было синхронизировано с частотой акустического воздействия на струю. Частота акустического воздействия варьировалась от единиц герц до 6 кГц, интенсивность звука составляла примерно 90 дБ. Скорость истечения струи контролировалась с помощью прецизионного расходомера и составляла $U_0 \approx 20,8$ (32) м/с для двух экспериментов.

На рис. 18 показаны фото присоединенного к срезу сопла пламени под воздействием поперечного акустического поля и без акустического воздействия. Видно, что присоединенное к срезу сопла пламя при наложении акустического поля заметно уширяется вследствие распространения пламени по поверхности синусоидальной вихревой

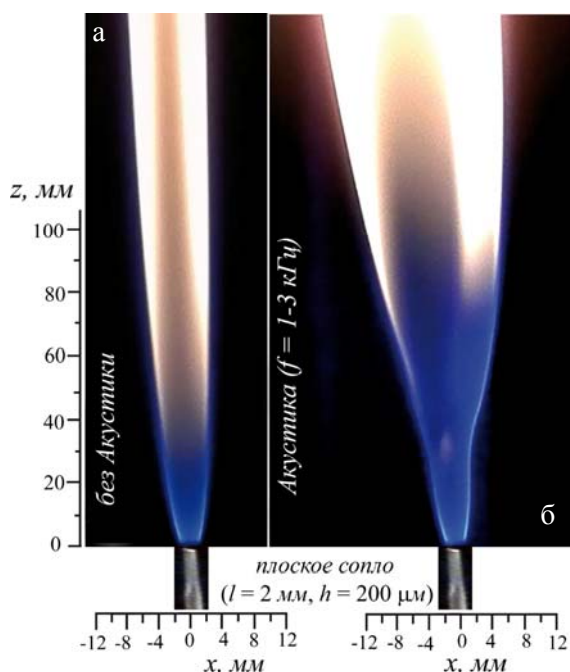


Рис. 18. Процесс уширения пламени плоской микроструи ($h = 0,2$ мм) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (а – пламя струи без акустического воздействия, б – пламя струи при акустическом воздействии, $f = 1-3$ кГц), $U_0 \approx 20,8$ м/с

дорожки, генерируемой акустикой, под воздействием которой ее трансверсальный размер в плоскости xz непрерывно растет вниз по потоку [19; 20].

С ростом скорости истечения струи, при ее определенном пороговом значении пламя резко отходит от среза сопла и реализуется так называемое приподнятое пламя (рис. 19). В данной ситуации можно отчетливо наблюдать раздвоение пламени при акустическом воздействии в диапазоне частот от 1 до 3 кГц. Для сравнения на рис. 19 показано пламя в отсутствие акустического воздействия, где видно, что высота отрыва пламени от среза сопла примерно в 2 раза больше, чем данный параметр в ситуации наличия акустического воздействия на струю.

По-видимому, акустика стабилизирует процесс горения, способствует более интенсивному тепло- и массопереносу между пропаном и воздухом, что приводит к расширению области горения, сдвигу пламени к срезу сопла и в итоге к его разрыву на два пламени, распространяющихся по поверхности двух струй, которые возникли в результате разрыва акустикой единой синусоидальной вихревой дорожки свободной плоской микроструи, исследованной ранее [19; 20; 23].

Плоская микроструя (сопло № 2) в поперечном акустическом поле при диффузионном горении пропана (раздвоение струи). Проведены экспериментальные исследования процесса диффузионного горения пропана в плоской струе на выходе из сопла большого удлинения ($l/h = 180$, где l – длина щели сопла, h – ширина щели сопла) при акустическом воздействии на пламя. Схема эксперимента представлена на рис. 20.

В данном случае, в отличие от струи, истекающей из сопла малого удлинения, можно наблюдать не только процесс раздвоения струи под действием поперечного акустического поля, но и процесс сворачивания вихревой пелены струи в противоположных друг от друга направлениях на каждом периоде акустического воздействия (рис. 21). В процессе диффузионного горения данной струи можно также наблюдать распространение пламени по поверхности этих двух разделенных и закручивающихся струй (рис. 21, а). Следует заметить, что оторвавшийся от среза сопла торец пламени имеет деформированную форму из-за шероховато-

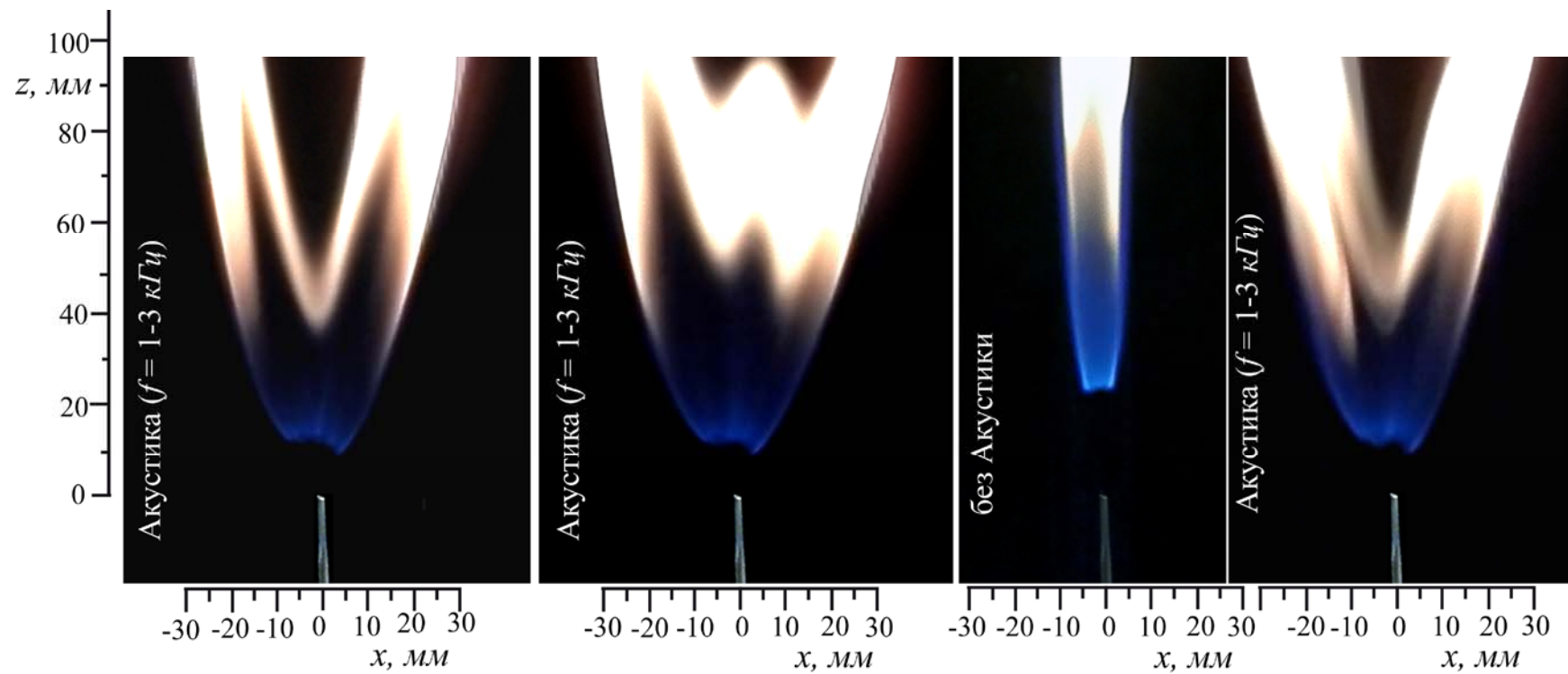


Рис. 19. Процесс раздвоения пламени плоской микроструи ($h = 0,2$ мм) в поперечном акустическом поле ($f = 1-3$ кГц, $A \approx 90$ дБ) при диффузионном горении пропана, $U_0 \approx 32$ м/с

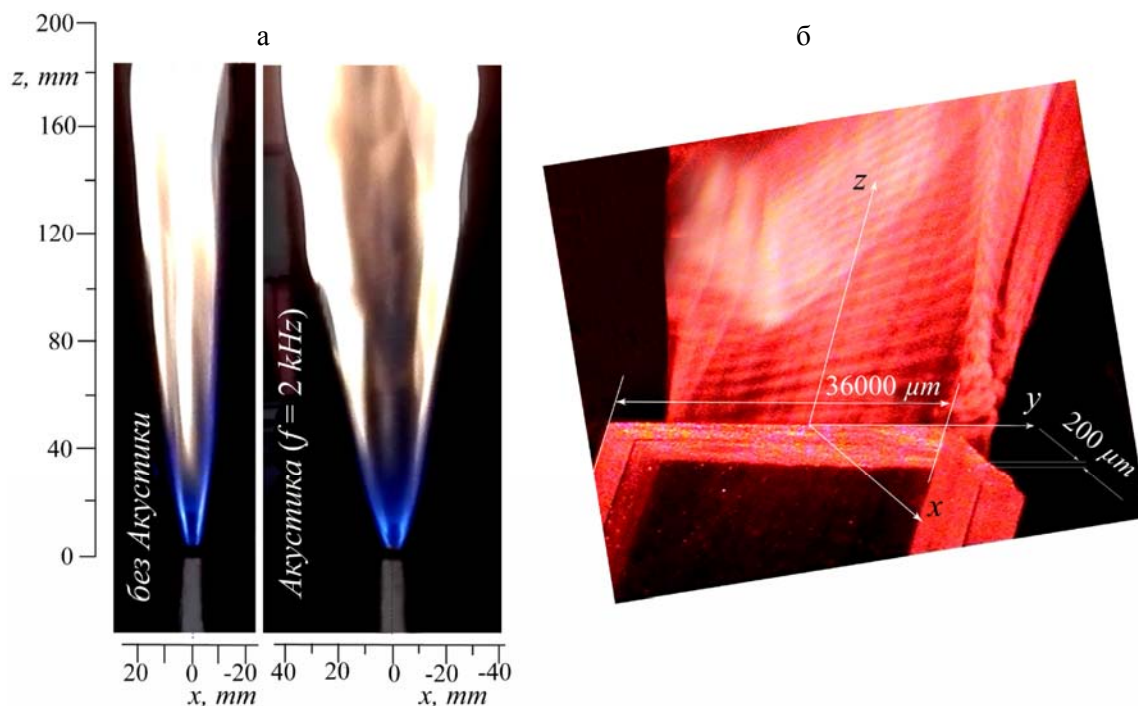


Рис. 22. Процесс раздвоения пламени плоской микроструи ($l/h = 180$) в поперечном акустическом поле ($f \approx 2$ кГц, $A \approx 90$ дБ) при диффузионном горении пропана (а) и картина дымовой визуализации данного процесса для струи без горения (б) (см. [20]), $U_0 \approx 16$ м/с

ном горении пропана полностью отражает явления, наблюдаемые ранее при изучении характеристик развития данной струи воздуха в отсутствие горения (раздвоение струи и ее закрутка из-за концевых эффектов).

Плоская микроструя (сопло № 1) при горении предварительно перемешанной смеси пропан / воздух в поперечном акустическом поле (раздвоение струи). Проведены экспериментальные исследования процесса горения предварительно перемешанной смеси пропан / воздух в плоской струе при акустическом воздействии на пламя (схему эксперимента см. на рис. 17). Соотношение смеси пропан (C_3H_8) / воздух составляло 37,2 / 62,8 % (коэффициент избытка топлива $\varphi = 14$). При меньшем коэффициенте избытка топлива эффект воздействия поперечного акустического поля на процесс горения струи был значительно слабее, а иногда и вовсе отсутствовал. Как и в ситуации диффузионного горения плоской микроструи пропана (см. рис. 19), пламя плоской микроструи при горении смеси пропан / воздух также подвержено раздвоению при акусти-

ческом воздействии (рис. 23). На фото хорошо видно, что пламя струи в отсутствие акустики и при акустическом воздействии на частотах менее 500 Гц присоединено к срезу сопла горелки. Как известно, отрыв пламени происходит при увеличении скорости истечения струи или, как в данном случае, когда скорость струи оставалась неизменной, отрыв пламени от среза сопла произошел из-за акустического воздействия на определенных частотах ($f = 1-3$ кГц). В данной ситуации (см. рис. 23), оторвавшееся пламя резко уширяется в плоскости xz и далее вниз по потоку можно наблюдать его раздвоение, как и в предыдущем случае диффузионного горения плоской микроструи, подвергнутой акустическому воздействию (см. рис. 19). Можно отметить еще одно интересное явление – резкое возрастание высоты отрыва пламени от среза сопла (примерно в 3 раза) при отключении акустического воздействия (см. рис. 23, последнее фото).

Установлено также, что неустойчивость пламени плоской микроструи не зависит от направления вектора поперечного акустиче-

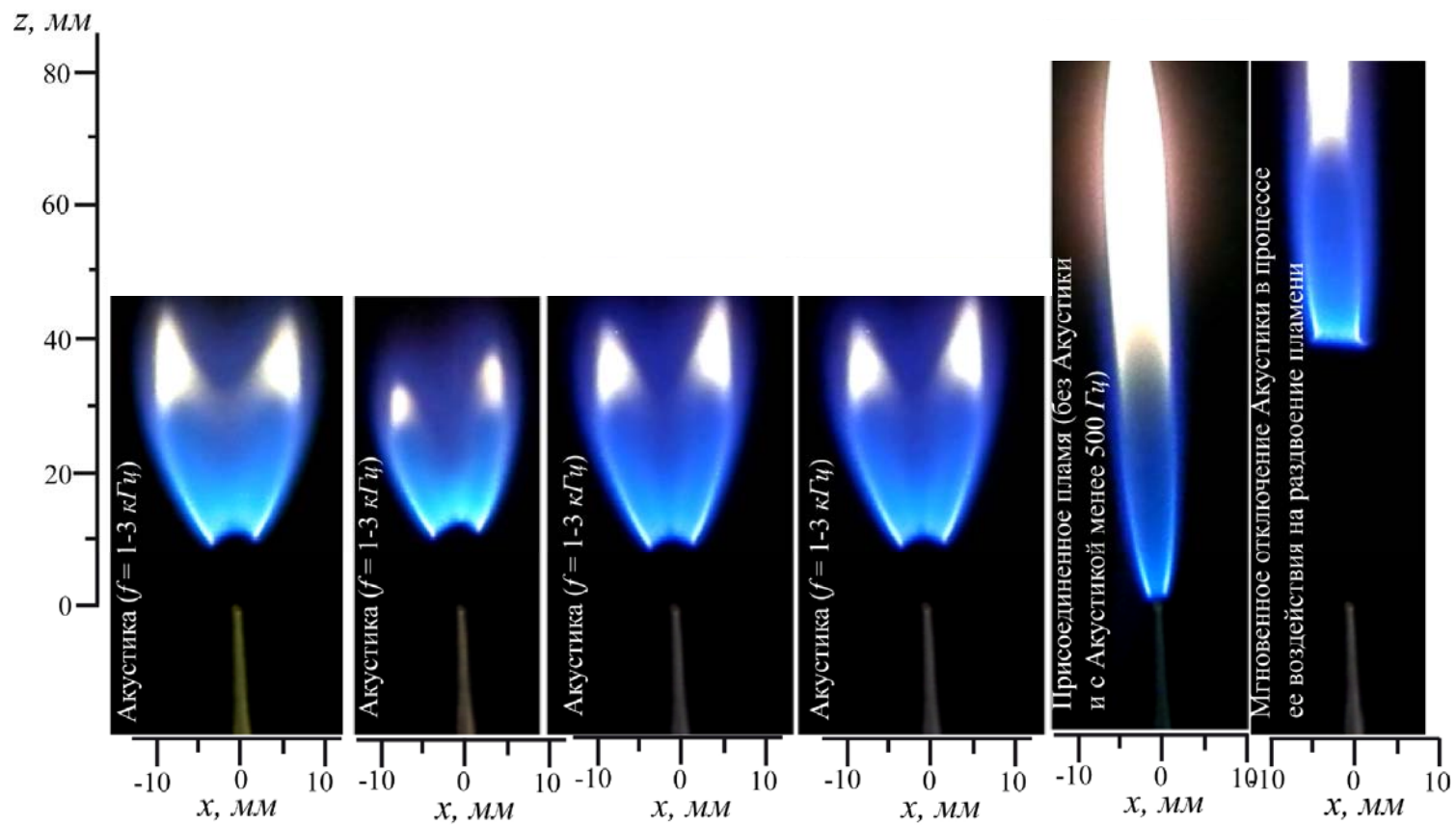


Рис. 23. Процесс раздвоения пламени плоской микроструи ($h = 0,2 \text{ мм}$) в поперечном акустическом поле ($f = 1-3 \text{ кГц}$, $A \approx 90 \text{ дБ}$) при кинетическом горении смеси пропан / воздух, $U_0 \approx 14 \text{ м/с}$

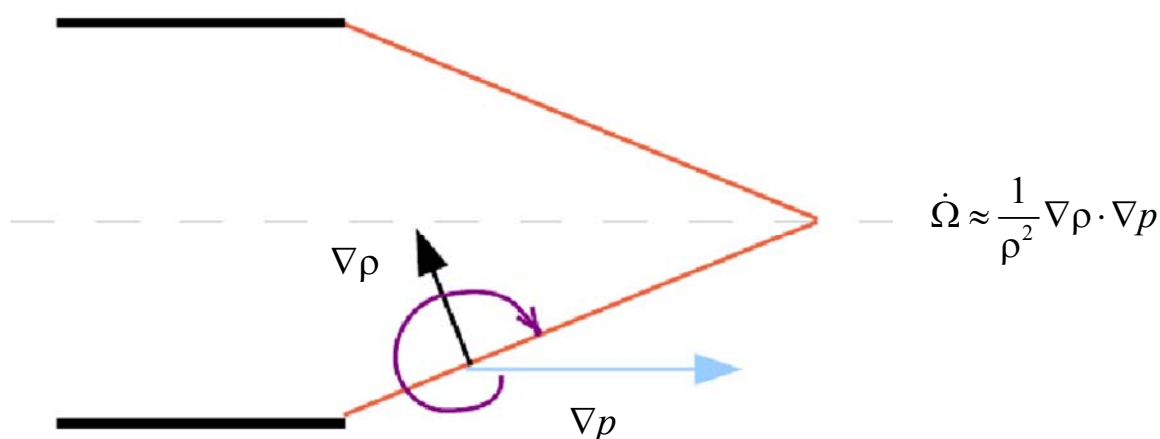


Рис. 24. Схема завихренности, генерированной из-за вращающего момента (baroclinic torque). Комбинация разрегулированности (непараллельности) градиентов давления и плотности вызывает завихренность на фронте пламени [24]

ского поля, в отличие от ее зависимости от направления вектора поперечного акустического поля для пламени круглой микроструи.

Таким образом, экспериментальные исследования диффузионного горения и горения предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя дозвуковой плоской микроструи показали, что процесс развития пламени отражает все явления, обнаруженные ранее при изучении механизма развития плоской макро- и микроструи в поперечном акустическом поле, но в отсутствие горения. К ним относятся: возбуждение звуком синусоидальной вихревой дорожки, уширение и раздвоение вихревой дорожки вниз по потоку [19; 20].

Анализ одной из возможных причин механизма раздвоения пламени при диффузионном горении круглой струи. Характеристики акустически возбужденных диффузионных пламен с акцентом на исследование механизма раздвоения пламени были изучены в работе [17]. Авторы работы попытались разобраться в механизме раздвоения пламени диффузионного горения круглой струи с помощью эксперимента при диффузионном горении плоской струи. Хотя механизм раздвоения пока неясен, авторы работы [17] рассмотрели одну из ближайших идей объяснения данного явления – эффект вращающего момента (*baroclinic torque* [24]), который пропорционален вектору векторно-

го произведения градиентов давления и плотности (рис. 24).

Градиент давления порожден горизонтально распространяющейся звуковой волной, в то время как градиент плотности вызван распределениями видового состава газа и температуры, которые в основном осесимметричны вокруг вертикальной оси круглой горелки. Вращающий момент, распределенный в поле потока, является, таким образом, трехмерным. Авторы работы [17] заменили круглую горелку на щелевую, конфигурация которой может быть расценена как двумерная. Пламя новой щелевой горелки было сравнено с пламенем предыдущей круглой горелки (см. [17. Fig. 6]). Результаты показали, что раздвоение является исключительно двумерным, а это означает, что градиенты плотности в направлении от оси струи не могут быть ключевым фактором раздвоения струи, если явление вызвано эффектом вращающего момента. Таким образом, явление раздвоения круглой микроструи в поперечном акустическом поле, по-видимому, связано с иным механизмом, а именно с процессом уплощения круглой микроструи в поперечном акустическом поле, как показано на рис. 13. В данной ситуации струя подвержена синусоидальному колебательному процессу, как единое целое (см. рис. 14). Пламя, распространяющееся по такой струе, раздваивается вниз по потоку за счет синусоидального ко-

лебательного процесса всей струи в целом и ее разрыва на два потока на каждом полу-периоде колебания (см. рис. 14–19). На Fig. 3b из работы [17] можно ясно наблюдать синусоидальный колебательный процесс пламени плоской струи, а на Fig. 3a – картину раздвоения струи. Аналогичный результат раздвоения круглой (см. рис. 15, 16) и плоской (см. рис. 19, 21–23) микро-струи под воздействием поперечного акустического поля получен в настоящем эксперименте. Следует отметить, что в отличие от исследований в работе [17], где представлено раздвоение пламени под воздействием акустического поля при горении струи топлива с присоединенным к срезу сопла пламенем, в настоящих экспериментах исследована динамика развития пламени, оторвавшегося от среза сопла. Данное явление наблюдалось при воздействии поперечного акустического поля как на круглую, так и на плоскую микрострую.

Таким образом, в работе представлены результаты исследований влияния акустики на физические процессы, сопровождающие горение пропана в круглой и плоской микро-струе при малых числах Рейнольдса. При этом обнаружен целый ряд новых явлений развития пламени, коррелирующих с аналогичными явлениями, обнаруженными в процессе изучения развития микроструй в отсутствие горения. К сожалению, понимание только физики процесса горения не может дать ответа на вопрос, оказывает ли влияние акустика на полноту сгорания топлива и уменьшение вредных выбросов в атмосферу. Для ответа на данный вопрос необходимо изучение химических процессов горения, что и предполагается сделать.

Выводы

По результатам настоящих экспериментальных исследований процесса развития пламени при горении газообразного топлива в круглой макро- и микро-струе как при акустическом воздействии, так и без него можно сделать следующие выводы.

Обнаружено, что диффузионное горение пропана в круглой ламинарной макро-струе с ударным профилем скорости на срезе сопла сопровождается наличием присоединенного к срезу сопла пламени, развивающегося вниз по потоку ровно, без каких-либо пульсаций.

Показано, что диффузионное горение пропана в круглой турбулентной макро-струе сопровождается отрывом пламени от среза сопла, наличием на торце оторвавшегося пламени деформации первого кольцевого вихря, вызванной наличием полосчатых структур и уширением пламени.

Установлено, что диффузионное горение пропана в круглой ламинарной макро-струе с параболическим профилем скорости на срезе сопла сопровождается наличием присоединенного к срезу сопла пламени, развивающегося вниз по потоку ровно, без каких-либо пульсаций.

Показано, что диффузионное горение пропана в круглой турбулентной макро-струе сопровождается отрывом пламени от среза сопла, наличием на торце оторвавшегося от среза сопла пламени струи кольцевого образования, демонстрирующего распространение пламени в узкой области на периферии струи. Обнаружено уширение струи и наличие в ней высокочастотных пульсаций.

Установлено, что пламя при горении круглой микро-струи в поперечном акустическом поле подвержено уплощению и расщеплению на две струи.

Показано, что оторвавшееся от среза сопла пламя при диффузионном горении круглой микро-струи, находящейся под воздействием поперечного акустического поля, подвержено уплощению и более чем в 3 раза поперечному уширению по сравнению с пламенем без акустического воздействия.

Обнаружено, что оторвавшееся от среза сопла пламя при диффузионном горении круглой микро-струи, находящейся под воздействием поперечного акустического поля, подвержено раздвоению по причине его разрыва на две части, вызванного колебательным процессом самой струи.

Показано, что воздействие поперечного акустического поля на процесс диффузионного горения пропана и горения предварительно перемешанной смеси пропан / воздух в плоской микро-струе, истекающей из сопла малого удлинения ($l/d = 10$), приводит к уширению области горения и раздвоению пламени далее вниз по потоку.

Установлено, что воздействие поперечного акустического поля на процесс диффузионного горения пропана в плоской микро-струе, истекающей из сопла большого удлинения ($l/d = 180$), приводит к уширению

области горения и раздвоению пламени. Показано, что пламя распространяется по закрученной поверхности каждой из двух возникающих при раздвоении струй.

Показано, что механизм раздвоения пламени круглой микроструи связан с ее уплотнением в поперечном акустическом поле, что приводит к двумерному характеру развития струи и невозможности объяснения явления раздвоения струи в рамках эффекта вращающего момента (*baroclinic torque*).

Список литературы

1. *Кумагау С.* Горение. М.: Химия, 1979. 256 с.
2. *Вулис Л. А., Ершин Ш. А., Ярин Л. П.* Основы теории газового факела. Л.: Энергия, 1968. 203 с.
3. *Vanquickenborne L., Tiggelen A. van.* The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames // *Combustion and Flame*. 1966. Vol. 10. No. 1. P. 59–69.
4. *Peters N., Williams F.* Liftoff Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames // *AIAA J.* 1983. Vol. 21. No. 1. P. 423–429.
5. *Byggstoyl S., Magnussen B. F.* A Model for Flame Extinction in Turbulent Flow // *Fourth Symposium on Turbulent Shear Flows* / Eds. L. J. S. Bradbury, F. Durst, F. W. Schmidt, J. H. Whitelaw. Karlsruhe, 1983. P. 10.32–10.38.
6. *Schefer R. W., Namazian M., Kelly J.* Stabilization of Lifted Turbulent-Jet Flames // *Combustion and Flame*. 1994. Vol. 99. No. 1. P. 75–86.
7. *Полежаев Ю. В.* О турбулентных струях и физике струйно-факельного горения газов // *Материалы междунар. конф. «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность»*. М., 2010. С. 137–144.
8. *Muniz L., Mungal M. G.* Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted Jet Diffusion Flames // *Combustion and Flame*. 1997. Vol. 111. No. 1/2. P. 16–31.
9. *Everest D., Feikema D., Driscoll J. F.* A Study of the Mechanism of Jet Flame Lift-off-Based on Images of the Strained Flammable Layer // *Twenty Sixth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, 1996. Vol. 26. P. 129
10. *Huerre P., Monkewitz P. A.* Local and Global Instabilities in Spatially Developing Flows // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1990. Vol. 22. P. 473.
11. *Crow S. C., Champagne F. H.* Orderly Structure in Jet Turbulent // *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 48. P. 547.
12. *Zaman K. B. M. Q., Hussain A. K. M.* Turbulent Suppression in Free Turbulent Shear Flows by Controlled Excitation // *J. Fluid Mech.* 1981. Vol. 103. P. 133.
13. *Hussain A. K. M., Hasan M. A. Z.* Turbulent Suppression in Free Turbulent Shear Flows under Controlled Excitation. Pt 2 // *J. Fluid Mech.* 1985. Vol. 150. P. 159.
14. *Hertzberg J. R.* Conditions for a Split Diffusion Flame // *Combust. Flame*. 1996. Vol. 109. P. 49.
15. *Chao Y. C., Yuan T., Tseng C. S.* Effects of Flame Lifting and Acoustic Excitation on the Reduction on NO_x Emission // *Combust. Sci. Technol.* 1996. Vol. 113. P. 49.
16. *Chao Y. C., Yuan T., Jong Y. C.* Measurement of the Stabilization Zone of a Lifted Jet Flame under Acoustic Excitation // *Exp. Fluids*. 1994. Vol. 17. P. 381.
17. *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.
18. *Litvinenko M. V., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Grek G. R.* Effect of Streamwise Streaky Structures on the Turbulization of Round Jets // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2004. Vol. 45. No. 3. P. 50–60.
19. *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.
20. *Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Kozlov G. V., Litvinenko M. V.* Round and Plane Jets in a Transverse Acoustic Field // *J. of Engineering Thermophysics*. 2011. Vol. 20. No. 3. P. 1–18.
21. *Kozlov G. V., Grek G. R., Sorokin A. M., Litvinenko Yu. A.* Influence of Initial Conditions at the Nozzle Exit on the Structure of Round Jet // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2008. Vol. 15. No. 1. P. 55–68.
22. *Кривокорытов М. С., Голуб В. В., Володин В. В.* Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 38, вып. 10. С. 57–63.

23. Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Kozlov G. V., Litvinenko M. V. Influence of Initial Conditions at the Nozzle Exit and Acoustical Action on the Structure and Stability of a Plane Jet // Visualization of Mechanical Processes. 2012. Vol. 2. Iss. 3. P. 29.

24. Polifke W. Influence of Oscillating Pressure Gradient on Premixed Flame Dynamics. Internet, tm.mv.tum.de, baroclinic torque. Project EU FP-7 ITN MYPLANET.

Материал поступил в редколлегию 18.06.2013

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

FEATURES OF THE PROPANE COMBUSTION IN THE ROUND AND PLANE MACRO- AND MICRO-JET IN A TRANSVERSE ACOUSTIC FIELD AT THE SMALL REYNOLDS NUMBER

Results of experimental studies on round and plane macro- and micro-jets with top-hat and parabolic mean velocity profile at the nozzle exit subjected to transverse acoustic field at small Reynolds number are presented in this review. Features of their evolution in the given conditions are shown. On the basis of the received knowledge the new phenomena uncovered at study of the flame evolution in a transverse acoustic field by the propane round and plane micro-jet combustion are revealed and explained.

Keywords: jet, acoustic, flow visualization, hot-wire anemometric measurements, combustion.