

УДК 533.1

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ ЛАМИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

© 2023 г. В. В. Козлов^{а,*}, Ю. А. Литвиненко^а, М. М. Катасонов^а,
Д. В. Сарычев^а, А. Г. Шмаков^а

^аИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

*E-mail: kozlov@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.

После доработки 12.03.2023 г.

Принята к публикации 20.03.2023 г.

Представлены результаты исследований процесса взаимодействия двух соударяющихся осесимметричных ламинарных микроструй пропан/бутановой смеси при диффузионном горении и без горения. Истечение газовой смеси осуществлялось через круглые трубки с равными скоростями. В процессе эксперимента варьировалось поперечное положение трубок относительно друг друга с сохранением угла между ними. Выявлены особенности формирования результирующей струи в зависимости от поперечного положения трубок. Если трубки находятся в одной плоскости, то результирующая струя формируется в ортогональной к ней плоскости. Данный процесс наблюдается при взаимодействии горящих и не горящих струй. При увеличении скорости истечения струй обнаружена область локального разрыва фронта пламени.

Ключевые слова: соударение газовых микроструй, деформация факела, диффузионный факел, ламинарные струи

DOI: 10.31857/S1024708422601007, **EDN:** WKERLL

Решение целого ряда практических задач, связанных, в частности, с разработкой оптимальной конструкции тепло- и массообменных устройств, камер сгорания, топочных печей и т.п., требует изучения как химических, так и газодинамических процессов, протекающих в таких системах. Развитие струйных течений связано с возникновением различных типов гидродинамической неустойчивости. Так, например, для струй, сформированных в каналах с малым удлинением, характерно развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца варикозного или синусоидального типа с ранней турбулизацией. Для струй, сформированных каналами с большим удлинением, такая неустойчивость не реализуется, и струя имеет протяженный ламинарный участок [1]. Указанные особенности проявляются и при реализации соударяющихся струй. Использование соударяющихся струй позволяет, например, управлять скоростными параметрами результирующей струи [2–4], формировать форму факела, тем самым увеличивать полноту сгорания топлива. Особенность данных исследований состоит в том, что оси симметрии соударяющихся струй расположены под острым углом друг к другу, а поперечное положение сопел изменяется от полного перекрытия струй, когда оси симметрии находятся в одной плоскости, до полного расхождения струй, когда сопла разведены в поперечном направлении. Аналитическое описание столь сложной экспериментальной постановки создает значительные трудности и в настоящее время вряд ли может быть проведено известными методами. В этой связи экспериментальные исследования газодинамической структуры течения соударяющихся струй, в том числе и при наличии процессов диффузионного горения, вызывают большой интерес и несомненно актуальны. Цель данного экспериментального исследования состоит в определении структуры результирующей газовой струи при столкновении двух струй с различной степенью перекрытия, без горения и при диффузионном горении газа.

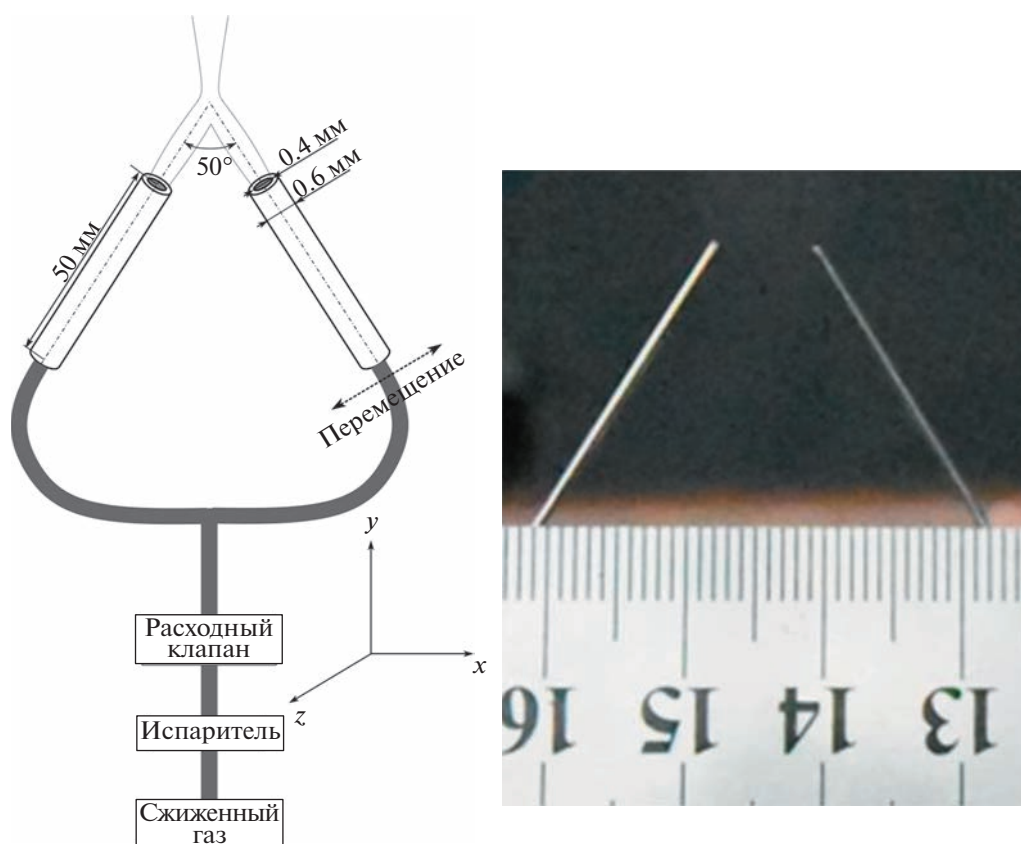


Рис. 1. Схема струйной установки и расположение трубок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА

Эксперименты проводились на струйной установке в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Установка состояла из двух идентичных цилиндрических трубок длиной 50 мм и внутренним диаметром 0.4 мм, расположенных под углом 50° между осями симметрии трубок. Расстояние между срезами трубок 7 мм. Схема установки представлена на рис. 1. В качестве газа использовалась пропан/бутановая смесь в процентном соотношении 70/30. Сжиженный газ подавался из баллона через испаритель на редуктор GCE DINOX 03-10, затем на регулятор массового расхода MKS MASS FLOW, после чего разделялся тройником на две трассы, подводящие газ к трубкам. Управление регулятором массового расхода осуществлялось через двухканальный модуль MKS PR4000B. Расход газа контролировался с точностью $\pm 0.7\%$. Перед регулятором массового расхода создавалось избыточное давление. Истечение осуществлялось в воздушное пространство при 20°C и атмосферном давлении.

Поджог осуществлялся без предварительного смешения, таким образом реализовывался диффузионный режим горения. Расход газа через каждую трубку соответствовал $\frac{1}{2}$ устанавливаемого расхода на регуляторе и был равен $1.0 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$. Учитывая диаметр трубки 400 мкм, расчетная скорость газа, истекающего через каждую трубку $U_1 = U_2 = 0.39 \text{ м/с}$, что соответствовало числу $Re_{\text{пропан}} = 42$. При данном числе Рейнольдса режим горения факела являлся ламинарным, при увеличении скорости истечения до $U \geq 0.53 \text{ м/с}$ ($Re \geq 55$) режим горения становился турбулентным, пламя отрывалось от среза сопел, реализовывался так называемый поднятый факел. Точка поджога или стабилизации факела соответствовала области пересечения двух струй.

Регистрация процесса горения осуществлялась на цифровую камеру Nikon D7500 с объективом AF-S NIKKOR 18-105mm, в том числе с использованием теневого метода на базе прибора ИАБ-461. Измерение температуры факелов производилось с использованием платина-платинородиевой термопары S-типа с толщиной нити 50 мкм. Поскольку процесс диффузионного горения пропан/бутановой смеси связан с образованием твердых частиц сажи, в качестве регистра-

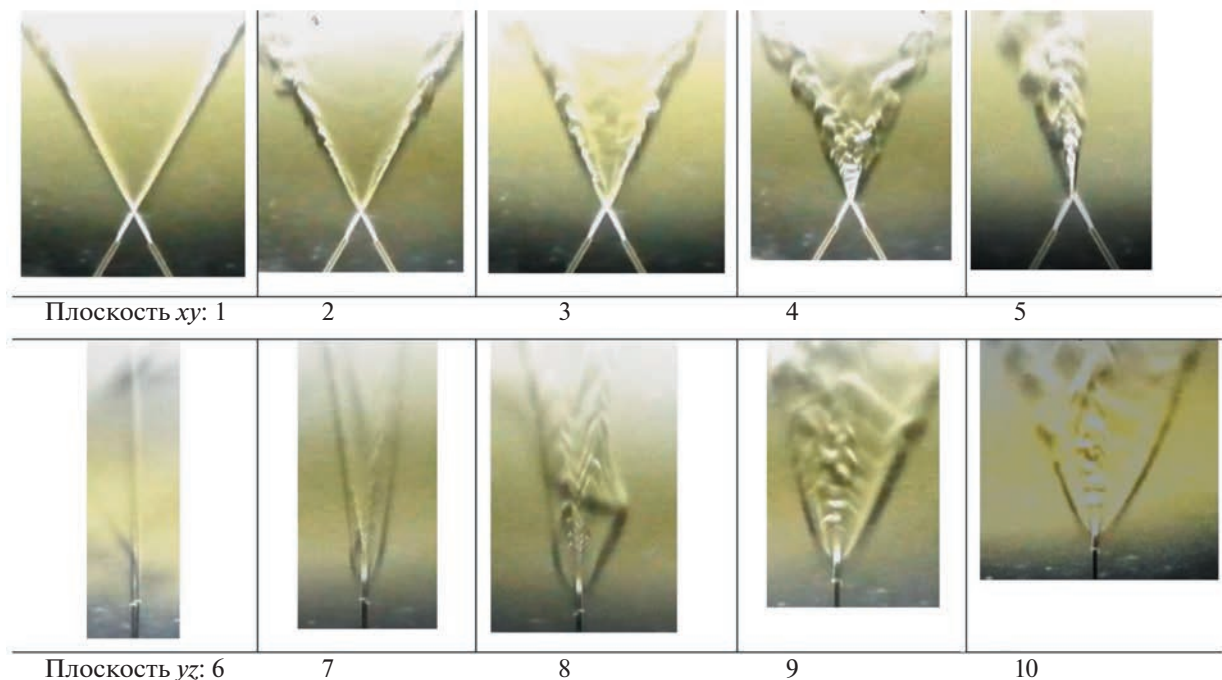


Рис. 2. Теневые фотографии сталкивающихся ламинарных газовых струй при различной степени перекрытия, в плоскости xy (1–5) и yz (6–10): 1, 6 – без перекрытия; 2, 7 – перекрытие $\sim 20\%$; 3, 8 – перекрытие $\sim 50\%$; 4, 9 – перекрытие $\sim 75\%$; 5, 10 – перекрытие $\sim 100\%$; $U_1 = U_2 = 0.39$ м/с, $Re_{\text{пропан}} = 42$.

тора полей концентрации сажи использовался инфракрасный тепловизор RGK TL-80. Частота обновления кадров 50 Гц, микроболометр 80×80 пикселей, регистрация данных производилась на microSD-карту. Полученные с его помощью тепловизионные картины факелов сопоставлялись с данными по температуре, полученными термопарой в определенных областях факела. Таким образом, оттенки цветовой гаммы соответствовали определенной температуре.

На рис. 2 представлены теневые фотографии развития двух сталкивающихся струй газа без поджога с различной степенью перекрытия. Фото 1 и 6 на рис. 2 соответствуют одному положению трубок, представленному в плоскости xy и yz , соответственно, при котором струи не взаимодействуют. Следующая пара фото 2 и 7 рис. 2 выполнена в тех же плоскостях, при этом перекрытие струй составляет $\sim 20\%$ площади сечения каждой трубки. Далее представлены фотографии с перекрытием 50%, 75% и 100%. По мере сближения трубок от положения без взаимодействия струй к положению с полным перекрытием при расположении трубок в одной плоскости наблюдается изменение структуры результирующей струи. Частичное перекрытие сталкивающихся струй формирует струю, отклоняющуюся от начальной плоскости развития, происходит поворот результирующей струи. Фото 5, 10 рис. 2 демонстрируют истечение струй с полным перекрытием.

В результате реализуется разворот результирующей струи в плоскость, ортогональную по отношению к начальной плоскости развития струй. В центральной части результирующей струи отмечается развитие периодического колебательного процесса, его можно наблюдать на фото, выполненных в плоскости yz . По мере нарастания площади перекрытия струй частота понижается. На рис. 3 показан сценарий развития сталкивающихся газовых струй при диффузионном горении при различной степени перекрытия. Как и выше, пары фотографий 1–6, 2–7, 3–8 и т.д. иллюстрируют факела в двух плоскостях xy и yz при различной степени перекрытия. По мере нарастания степени перекрытия наблюдается слияние факелов с формированием ортогонального факела в плоскости yz . Подобные явления характерны при истечении сталкивающихся жидких струй с формированием нескольких ортогональных плоскостей [5]. В случае без горения струи газа развиваются прямолинейно и имеют большую протяженность ламинарного участка, также отмечается развитие неоднородностей в виде волн неустойчивости. При наличии горения происходит деформация факелов под действием конвективных сил в поле тяжести земли. Оба факела имеют саблеобразную форму.

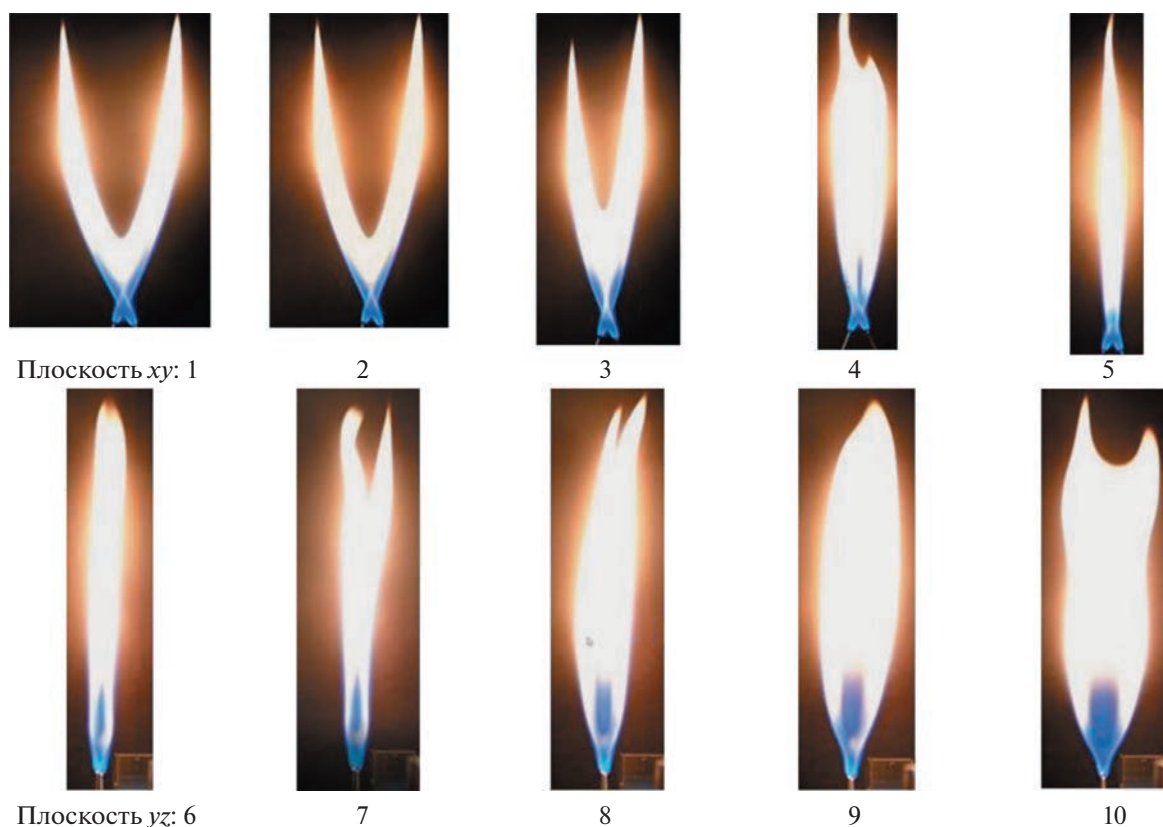


Рис. 3. Визуализация ламинарного диффузионного пламени сталкивающихся газовых струй при различной степени перекрытия, в плоскости xy (1–5) и yz (6–10): 1, 6 – без перекрытия; 2, 7 – перекрытие $\sim 20\%$; 3, 8 – перекрытие $\sim 50\%$; 4, 9 – перекрытие $\sim 75\%$; 5, 10 – перекрытие $\sim 100\%$; $U_1 = U_2 = 0.39$ м/с, $Re_{\text{пропан}} = 42$.

На фото 1, 2 рис. 4 сравниваются факелы при различной степени перекрытия. Факелы представлены в виде обращенного цвета в оттенках серого. Так, при перекрытии струй до 50% в плоскости xy (фото 1) наблюдаются два факела, что свидетельствует о том, что зона взаимного торможения встречных струй незначительна и деформации факелов практически не наблюдается. На фото 2 картина существенно изменилась – при перекрытии более 75% происходит слияние факелов в области торможения струй, где и стабилизируется процесс горения. Выше этой зоны развивается факел в ортогональной плоскости по отношению к плоскости расположения сопел. Такой режим горения способствует ряду преимуществ, например, повышению диапазона устойчивости процесса горения, увеличению теплонапряженности, интенсификации передачи тепла в камерах сгорания.

Как упоминалось выше, для получения осредненной картины распределения температуры факела использовались термопара и тепловизор. Как известно, диффузионное горение углеводородных топлив происходит с образованием твердых частиц сажи, воды и т.д., в результате излучения такого факела в инфракрасном диапазоне наблюдается сложная термическая картина рис. 5. В нашем случае тепловизор не дает полноценной температурной картины, поскольку предназначен для измерения температуры твердых тел. Измерение температуры производилось сканированием факела термопарой, после чего сопоставлялись тепловизионная картина и показания термопары. Такой подход позволил получить термическую картину факела с распределением температурных зон. Режим горения в данном случае является ламинарным.

При увеличении расхода газа картина горения меняется. На рис. 6 представлена серия снимков, демонстрирующих процесс перестроения факела, формирующегося из двух присоединенных факелов в поднятый факел с увеличением скорости от $U = 0.46$ м/с на фото 1, до $U = 0.53$ м/с на фото 5–6 рис. 6. При этом в пламени наблюдаются периодические кольцеобразные разрывы фронта пламени. Развитие такого разрыва показано на фото 2–4 рис. 6. (показано стрелкой). Процесс развития разрыва сопровождается генерацией акустических колебаний. При увеличе-

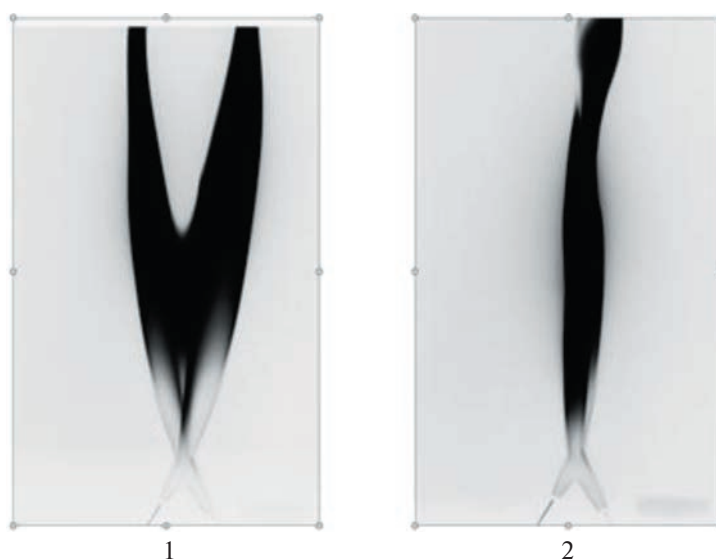


Рис. 4. Визуализация ламинарного диффузионного пламени сталкивающихся газовых струй при различной степени перекрытия, в плоскости xu : 1, 2 – перекрытие 50 и 100%; $U_1 = U_2 = 0.39$ м/с, $Re_{\text{пропан}} = 42$.

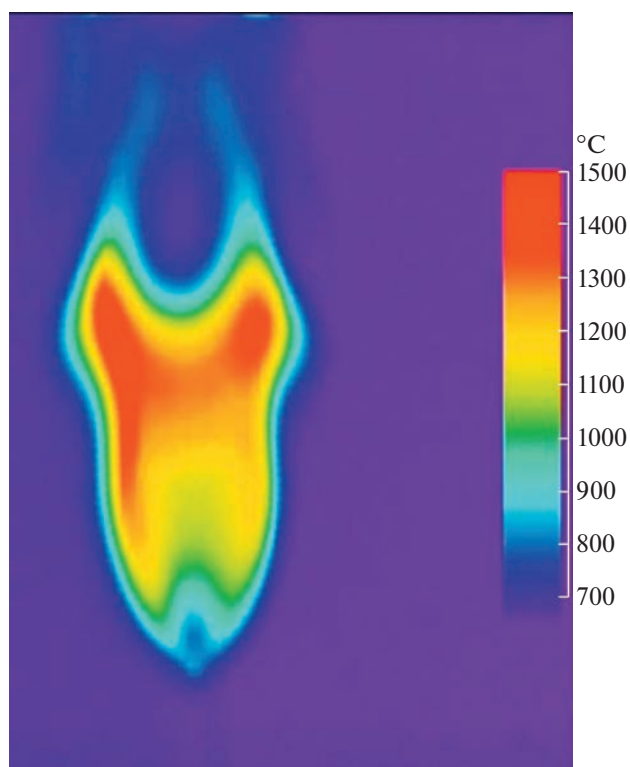


Рис. 5. Тепловизионное изображение диффузионного факела сталкивающихся газовых струй при полном перекрытии, в плоскости uz . $Re_{\text{пропан}} = 48$.

нии скорости до $U = 0.53$ м/с происходит турбулизация струй со стабилизацией единого факела на уровне точки пересечения струй фото 5–6 рис. 6. При этом явление разрыва факела исчезает. По-видимому, развитие разрыва связано с относительно высокими градиентами скорости пересекающихся струй и вихревым взаимодействием внутри факела. Например, в [6] представлен случай диффузионного горения одиночной газовой микроструи, взаимодействующей с преградой и

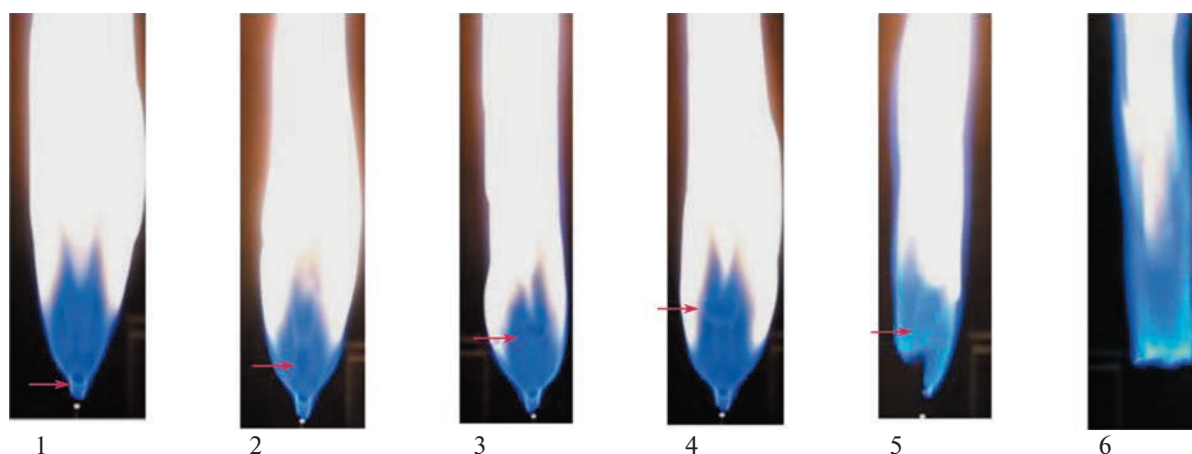


Рис. 6. Визуализация ламинарного диффузионного пламени сталкивающихся газовых струй при полном перекрытии в плоскости yz с ростом скорости истечения, $U_1 = U_2$: 1 – $U = 0.46$ м/с ($Q = 1.16 \times 10^{-7}$ м³/с); 2–4 – $U = 0.5$ м/с ($Q = 1.25 \times 10^{-7}$ м³/с); 5, 6 – $U = 0.53$ м/с ($Q = 1.33 \times 10^{-7}$ м³/с).

на начальном этапе показано, что процесс горения протекает кольцеобразно. Отмечается также возможность управления периодическим акустическим воздействием развитием такого пламени. Можно предположить, что в нашем случае два факела на начальном этапе также имеют кольцеобразную структуру и дальнейшее их взаимодействие приводит к образованию вышеупомянутых разрывов. Возможность акустического управления такой структурой на данном этапе не исследовалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований взаимодействия двух микроструй пропан/бутана, включая процесс диффузионного горения, установлено следующее.

При истечении с 100% перекрытием газовых микроструй происходит формирование ортогонального к плоскости микроструй результирующего факела. При отсутствии горения формирование результирующей газовой струи происходит аналогично, в ортогональной плоскости.

Установлено, что форма факела и во многом процесс диффузионного горения двух сталкивающихся газовых микроструй определяются гидродинамическими свойствами струйных течений.

В результате взаимодействия двух микроструй с 100% перекрытием реализуется плоский ортогональный факел большой относительной ширины, поле температур свидетельствует о наличии обширной высокотемпературной зоны в таком факеле.

Подготовка статьи поддержана грантом Российского научного фонда № 22-19-00151, <https://rscf.ru/project/22-19-00151/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. // Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 240 с.
2. Кулумбаев Э.Б., Никуличева Т.Б. Взаимодействие плазменных струй в двухструйной электрической дуге // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 4. С. 483–490.
3. Laurendeau E., Jordan P., Bonnet J.P., Delville J., Parnaudeau P., and Lamballais E. Subsonic jet noise reduction by fluidic control: The interaction region and the global effect // Phys. Fluids. 2008. V. 20. P. 101519.
4. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. Особенности изменения термической структуры газовых импактных струй // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 2. С. 104–111.
5. Navish Wadhwa and Sunghwan Jung Non-coalescence of jets // Phys. Fluids. 2011. V. 23. P. 091105.