

УДК 536.46;621.454

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ С ДВУХРЯДНОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕПЯТСТВИЙ

Vijaya Kumar Cheeda

Центр изучения динамики детонации и взрыва, Тирупати-101, Андхра Прадеш, Индия  
vijaya\_cheeda\_chanti@yahoo.co.in

Экспериментально исследуется влияние препятствий, свободного от препятствий пространства, потоков газа и пристенной турбулентности на ускорение пламени при возгорании в замкнутом пространстве, транспорте, помещениях. Обнаружено, что два ряда препятствий, сходных по форме с сиденьями (моделирующими сиденья в транспортных средствах), вызывают увеличение скорости пламени в пространстве между препятствиями. Интенсивность турбулентности выше в локальных областях, где скорость газа близка к скорости звука и немного превышает ее, что увеличивает скорость пламени. В потоке, ускоряющемся под влиянием фронта пламени до сверхзвуковой скорости, могут сформироваться ударные волны, которые увеличивают скорость пламени. Учет геометрических ограничений может замедлить распространение пламени и предотвратить катастрофу.

Ключевые слова: пожаробезопасность в замкнутых пространствах, расстояние между препятствиями, интенсивность турбулентности, ускорение пламени, вихревое поле, неустойчивость Рихтмайера — Мешкова.

DOI 10.15372/FGV20210303

## ВВЕДЕНИЕ

Возгорание в замкнутых пространствах публичного доступа — в зрительных залах, школах, театрах, а также в туннелях шахт, на газовых заправочных станциях представляет серьезную опасность. Высокий риск в таких местах связан с присутствием легковоспламеняющихся веществ. Случайные утечки газа в замкнутых и полузамкнутых пространствах могут вызывать катастрофические последствия. Приведем примеры некоторых аварий. Авария в Порт-Хадсон (Миссури) в 1970 г. была обусловлена утечкой пропана из трубопровода в сельской местности на открытом воздухе. Сформировавшееся облако газа воспламенилось, и произошла детонация [1]. Пожар на крупном бензохранилище индийской нефтяной компании в Джайпуре (Индия) в 2009 г. был вызван утечкой бензина из трубопровода [2]. Хранилище было уничтожено при взрыве облака бензиновых паров. Такие аварии классифицируются как пожары на открытой местности. К человеческим жертвам привели пожа-

ры в начальной школе в Кумбаконаме (Тамилнаду, Индия) в 2004 г. вследствие возгорания от жаровни с углем и в театре Упахар в Дели в 1997 г. из-за утечки охладителя из электрического трансформатора. Наличие двухфазной газожидкостной пленки топлива в театре Упахар привело к возникновению турбулентного пламени [3]. Такие явления изучались в работах [4–8]. Основной причиной летальных исходов в театре Упахар стал ядовитый дым. Из-за наличия препятствий (кресел) пламя быстро распространилось по большой территории, заполнив пространство по всем направлениям. Многочисленными жертвами сопровождались пожары в железнодорожных туннелях: пожар в лондонском метро на станции Кингс-Кросс Сент-Панкрас в 1987 г., прорыв пламени в поезде метро в г. Баку (Азербайджан) в 1995 г., возгорание в метро в Даегу (Южная Корея) в 2003 г. и т. д. Возгорание в поезде-экспрессе Сабармати в Годхре (Гуджарат, Индия) в 2002 г. привело к гибели множества людей. Причинами стали быстрое распространение пламени, дым и блокировка дверей из-за термического расширения.

Во всех случаях возгораний как в замкнутых, полузамкнутых пространствах, так и на

открытой местности общими причинами являются утечка горючих материалов из хранилищ, распыление возгорающей смеси пылевых частиц, условия окружающей среды, неправильное размещение препятствий [9] и очаги возгорания. Влияет также качество горючих материалов. В [10, 11] установлено сильное влияние турбулентности на быстрые пламена.

Несмотря на невозможность предотвратить все такие случаи, хорошо спроектированная система может уменьшить риск. Целью данного исследования было определить, что именно способствует возникновению быстрых пламен. В первой части обсуждаются экспериментальные результаты по определению механизма ускорения пламени в ограниченных пространствах и по влиянию газодинамических факторов на этот процесс. Исследование проводили в миниатюрной модели, воспроизводящей пассажирский транспорт или зрительный зал. Распространяющаяся пламя вызывает формирование потока в том же направлении в неподвижном воздухе из-за объемного расширения горячих газов. Поток может двигаться в околосвуковом или сверхзвуковом режиме. В статье рассматривается возникновение околосвукового режима в пространстве с системой препятствий, по форме сходных с креслами. В такой конфигурации поток, задерживаемый препятствиями, становится сверхзвуковым [12–14]. Такие условия в стационарном потоке с препятствиями приводят к возникновению веера волн разрежения и впоследствии к возникновению ударных волн. Этот вопрос обсуждается во второй части. Помимо ударных волн, такой поток индуцирует турбулентность [15]. Для определения интенсивности турбулентности в холодном потоке вблизи пограничного слоя и в зоне свободного потока были проведены измерения при помощи лазерного доплеровского измерителя скорости (LDV). Эти результаты изложены в третьей части. Для выявления подобия газодинамических эффектов в мало- и крупномасштабной моделях было проведено численное моделирование, его результаты представлены в приложении.

### МЕТОДЫ

Эксперименты проводили на двух разных установках. Одна из них предназначалась для определения характеристик пламени, другая — для исследования механизма возникнове-

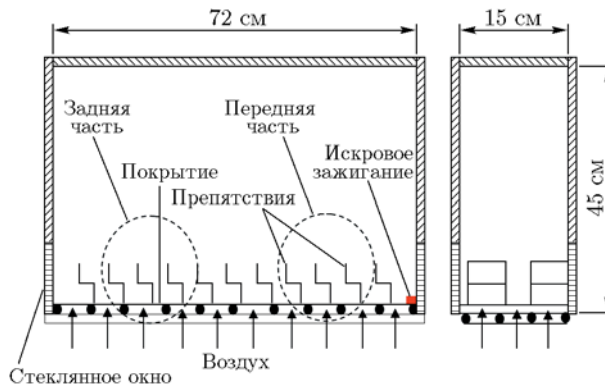


Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения распространения пламени в ограниченном пространстве

ния волн и определения параметров турбулентных потоков.

Первая установка показана на рис. 1. На поверхности дна находилось покрытие из хлопка или бумаги. Препятствия из листового металла создавали имитацию кресел. Несколько отверстий в нижней стенке служили вентиляционными клапанами, а также использовались для предотвращения повышения давления. В целом распространение пламени в малой модельной камере было аналогично такому в полноразмерных объектах — автобусах и зрительных залах. Перед началом эксперимента на покрытие и препятствия разбрызгивали бензиновое топливо. Пламя инициировали искрой в правом нижнем углу. Высокоскоростную съемку с выдержкой 2.5 мкс проводили цифровой камерой Casio EX FH-20. Для оптического доступа использовали стеклянные окна, через которые записывали шпирен- и фотоизображения.

Для исследований в холодном потоке использовали вторую установку, схема которой показана на рис. 2. Воздух подавался в установ-

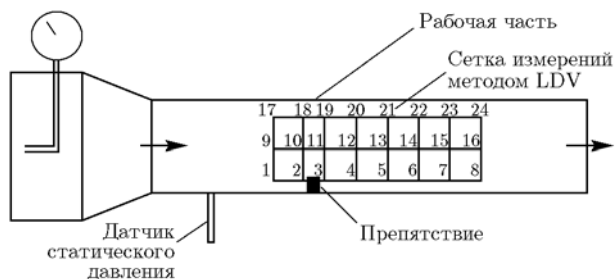


Рис. 2. Установка для измерений в холодном потоке методом LDV

ку через клапан из резервуара с полным давлением 3.5 бар. Полное давление поддерживали постоянным во время эксперимента для получения околосвукового потока. Условия в таком потоке идентичны создаваемым в области перед пламенем. Время одного эксперимента составляло 10 с.

В экспериментах с целью визуализации вихрей использовали влажный воздух, так как в сухом воздухе шлирен-методом вихри не фиксируются. Во влажном воздухе под действием волн происходит конденсация влаги. Конденсированная влага движется с газом и накапливается в вихре. По градиенту плотности на шлирен-экране судят о наличии вихря. Такая простая методика позволяет увидеть возмущения потока. Интенсивность турбулентности в потоке измеряли методом LDV в разных точках сетки (см. рис. 2) в плоскости, расположенной на расстоянии 1 мм от боковой стенки установки. Точки находятся на расстоянии 10 мм друг от друга по ходу потока и против его хода у препятствия. Расстояние между точками сетки спереди и сзади от препятствия составляет 5 мм. Точки сетки между 1 и 8 располагаются на расстоянии 6 мм от нижней стенки установки, а точки между 9 и 16 — на расстоянии 18 мм от нижней стенки. Точки 17–24 расположены на расстоянии 6 мм от верхней стенки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения особенностей пламени и потоков вблизи препятствий, сходных по форме с креслами, 10 мл летучего жидкого топлива (бензин) разбрызгивали на легковоспламеняющееся покрытие из хлопковой ткани или бумажной массы (целлюлозы). Пламя инициировали искрой, а его распространение от одного препятствия до другого регистрировали при помощи шлирен-аппаратуры и прямой визуализации скоростной камерой с частотой 400 кадр/с. Распространяющееся пламя при объемном расширении сжимает газ, находящийся спереди. Влияние сжатия газа на взаимодействие с препятствиями изучали шлирен-методом. Для этого в аэродинамической трубе применяли сжатый воздух. Кроме того, интенсивность турбулентности измеряли также в холодном потоке с использованием LDV в пространстве над препятствиями и вблизи боковых стенок установки.

### Хлопковое покрытие

Ламинарное пламя искажается после соприкосновения с нижней половиной препятствия, как показано на рис. 3,а. Искаженное пламя увеличивает свою высоту до высоты препятствия. Пламя распространяется быстрее в пространстве между двумя рядами препятствий (свободное от препятствий пространство показано на рис. 3,б). По краям объектов создается рециркуляционный пузырь, при этом смешиваются пары топлива, воздух и газообразные продукты. Это способствует ускорению реакции и увеличению скорости пламени. Фронт ламинарного пламени раздваивается после взаимодействия с первым рядом препятствий, обозначенных как  $F_1$  и  $F_2$  на рис. 4, с расстоянием между препятствиями 2 см. Получившиеся после раздвоения фронты пламени движутся по свободному пространству между двумя рядами препятствий. Вплоть до кадра 2 на рис. 4 фронт пламени неискаженный, на кадрах 3–8 видны искажения.

Фронт пламени охватывает препятствие целиком. Стационарное и искаженное пламя на схематично показаны на рис. 5. Причинами искажения являлись края препятствий, из-за которых деформировалась поверхность пламени, а также неустойчивость Рэлея — Тейлора, вызванная градиентом плотности между холодным воздухом над поверхностью пламени и горячими газами (рис. 6).

Пламя на переднем крае достигает высоты большей, чем высота препятствия. При достижении нижней половины препятствия поверхность пламени искажается, а на длине 2.5 см оно становится стационарным. Затем верхняя поверхность пламени взаимодействует с верхней половиной препятствия, и пламя деформируется еще сильнее. Задержка распространения пламени в верхней поверхности вызывает завихрения, которые увеличивают скорость выделения тепла. Кроме того, раздвоенный фронт перемещается в поперечном направлении в промежутке между препятствиями (два фронта в противоположных направлениях). Здесь расстояние между стенкой камеры и рядом препятствий составляет 2 см с одной стороны. Расстояние между двумя рядами в средней части — 5 см. Такая геометрия создает медленное пламя в меньшем промежутке и быстрое пламя в большем. Таким образом, различие скоростей вызывает образование несимметричных поперечных малых очагов пламени.

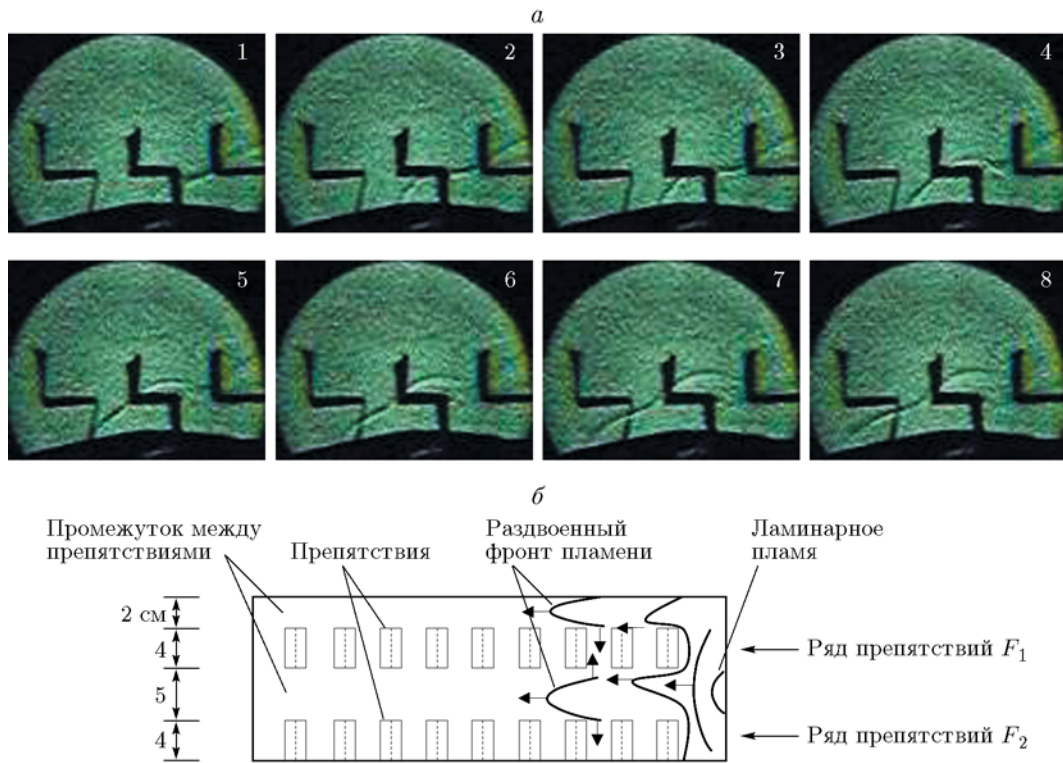


Рис. 3. Искажение пламени в области заднего края при промежутке между препятствиями 2 см и тканевом покрытии нижней стенки (а). Изображение раздвоенного фронта пламени, развивающегося из фронта ламинарного пламени (б)

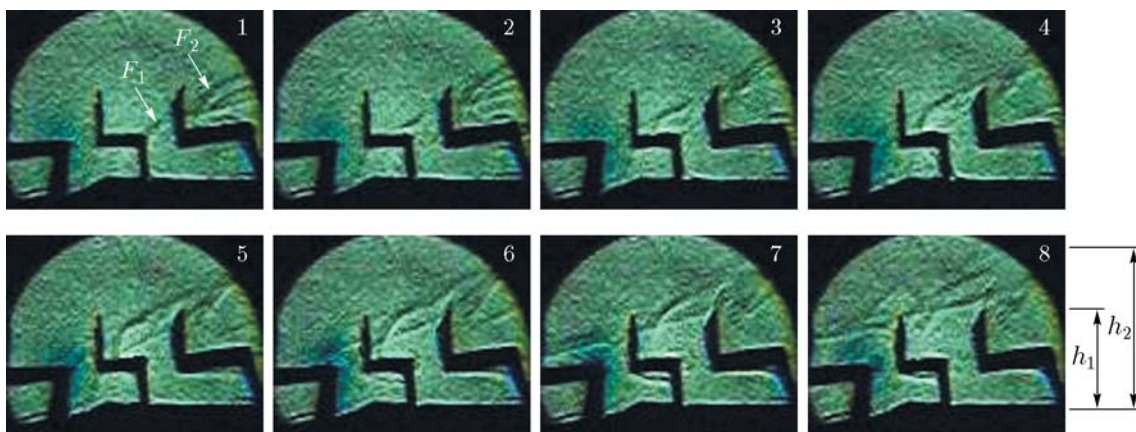


Рис. 4. Искажение пламени в области переднего края при промежутке между препятствиями 2 см и тканевом покрытии нижней стенки

Наличие таких противоположных поперечных пламен приводит к встрече двух фронтов. Так под действием гидродинамической неустойчивости возникают крупные турбулентные вихри, причем их размеры соответствуют размерам препятствий [16]. Это создает благоприятные условия для возникновения быстрых пламен. Воспламенение больших вихрей при их

захвате пламенем может вызывать локальные взрывы или детонацию. Если пламя затухает, вихрь может способствовать повторному воспламенению [17], что зависит от чувствительности реакционной среды. Наличие реакционноспособной топливоздушной смеси в больших вихрях может приводить к катастрофическим последствиям. Быстрые пламена в реакци-





Рис. 5. Искажение пламени из-за гидродинамической неустойчивости (по горизонтали)

рующем газовом потоке могут достигать предельной установившейся скорости [18]. В случае большого расстояния (4 см) в невозмущенной области между рядами препятствий об-

разуются ламинарные раздвоенные пламена. Вплоть до кадра 4 на рис. 6 фронт пламени остается невозмущенным. Затем возникает искажение, которое заметно на кадрах 5–8. В области заднего края на одном кадре наблюдаются  $F_1$  и  $F_2$  на более ранней стадии, чем в случае промежутка 2 см.

Поверхность пламени менее искажена на переднем крае фронта (рис. 7) при промежутке между препятствиями 4 см по сравнению с промежутком 2 см (см. рис. 4). В этом случае высота пламени едва достигает высоты препятствий. Холодный воздух диффундирует в пламя, а горячие газообразные продукты движутся вверх, так что поверхность пламени дополнительно искажается, как показано на рис. 8. Ядро пламени и развитие ламинарного пламени можно наблюдать на кадрах прямой визуализации — кадры 1–3 на рис. 9. Кадры 4–9

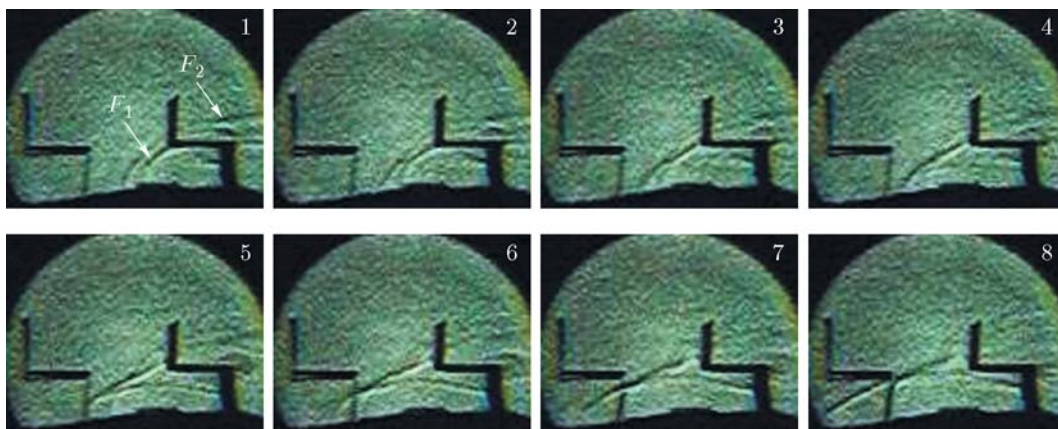


Рис. 6. Искажение пламени в области заднего края при промежутке между препятствиями 4 см и тканевом покрытии нижней стенки

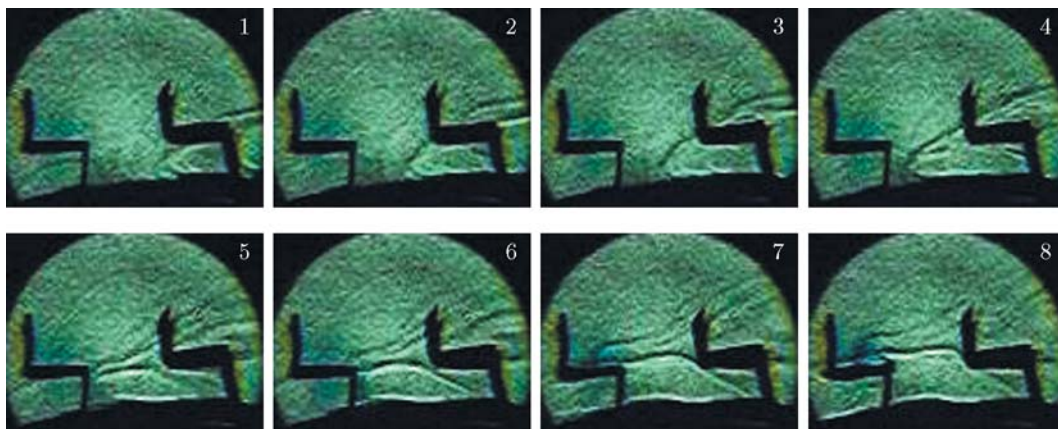


Рис. 7. Искажение пламени в области переднего края при промежутке между препятствиями 4 см и тканевом покрытии нижней стенки

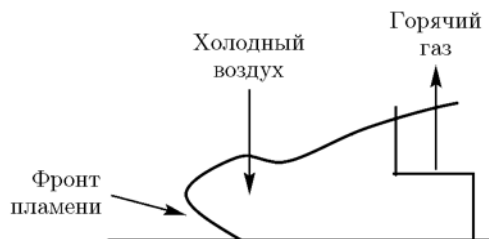


Рис. 8. Искажение пламени из-за эффекта подъемной силы

показывают более быстрое расходование топлива при промежутке размером 2 см (рис. 9,а) по сравнению с промежутком 4 см (рис. 9,б), что связано с недостаточной завихренностью потока. Еще одна отличительная черта — более длинный и быстрый язык пламени в случае, когда препятствия размещены ближе друг к другу. К этому приводит интенсивный вихревой поток горячего газа и воздуха, вызывающий сильнейшее растяжение поверхности пламени (см. рис. 9,а).

#### Покрывание из бумажной массы

При использовании покрытия из бумажной массы фронт пламени развивается на высоту, большую, чем высота препятствий, при промежутке между ними 2 см (рис. 10), особенно в области заднего края фронта, тогда как в области переднего края происходит закручивание пламени над препятствиями (рис. 11). На плоской поверхности препятствия образуются вихри (рис. 11). При бумажном покрытии и промежутке между препятствиями 4 см пламя движется медленнее, чем в случае хлопкового покрытия. Бумажное покрытие, в отличие от хлопкового, не поглощает жидкое топливо, поскольку поверхность хлопковых волокон больше и соответственно удерживает больше жидкости вследствие поверхностного натяжения. Таким образом, жидкая пленка горит с большей скоростью на бумажном покрытии. Дополнительное ускорение пламени наблюдается при малом промежутке между объектами и связано с массовой диффузией газообразных продуктов и с завихренностью в направлении потока [19]. Более высокая скорость выделения тепла приводит к быстрой деформации объектов из листового металла. Это могло быть причиной блокировки дверей при пожаре в поезде-экспрессе вблизи станции Годхра. В районе заднего края пламя продвигается

медленнее в случае промежутка размером 4 см, чем при его величине 2 см (рис. 12). При иницировании пламени у заднего края объектов в области переднего края не наблюдалось образования вихрей при промежутке между препятствиями 2 см (рис. 13). В этом случае пламя также распространяется быстрее, чем при промежутке 4 см (рис. 14). Таким образом, при бумажном покрытии наблюдается та же тенденция, что и в случае хлопкового покрытия.

#### Влияние интенсивности скачка уплотнения на генерацию вихрей и неустойчивость Рихтмайера — Мешкова

Генерация вихрей под действием ударной волны и неустойчивости Рихтмайера — Мешкова [20, 21] является важным фактором при ускорении пламени. Завихренность, возникающую при движении ударных волн, экспериментально исследовали в работе [22]; показано, что ее можно охарактеризовать числом Маха  $M = 1.5$  при возникновении скачка уплотнения. На заключительных стадиях ускорения пламени, перед началом детонации, число  $M$  составляет около 3.0. Вихри большого размера, образующиеся впереди пламени, становятся горячей точкой, которая способна запустить детонацию. Начало распространения детонационной волны из такой точки, возникшей на краю турбулентного пламени — так называемой огневой щетки, наблюдали в работе [23]. Моделирование этого явления проведено в [24]. Турбулентная огневая щетка, сформированная взаимодействием с ударной волной, создавала вихри на границе раздела пламени и потока. Обнаружено, что механизмом, ответственным за эти вихри на границе раздела, является неустойчивость Рихтмайера — Мешкова [25]. Вихревая дорожка образуется в потоке позади стоячей или движущейся ударной волны у фронта возмущений из тройной точки, где соединяются нормальная и набегающая ударные волны. В нашей работе наблюдалось образование вихря из слабых стационарных ударных волн в промежутке между препятствиями, как показано на рис. 15. Вблизи двух смежных препятствий при возникновении внезапного потока (примерно за 30 мс) над препятствиями образовался большой вихрь диаметром 6 мм. Ударная волна (рис. 15,б) была очень слабой ( $M \approx 1.1$ ). Это показывает, что образование вихрей зависит от интенсивности скачка уплотнения. Известно,

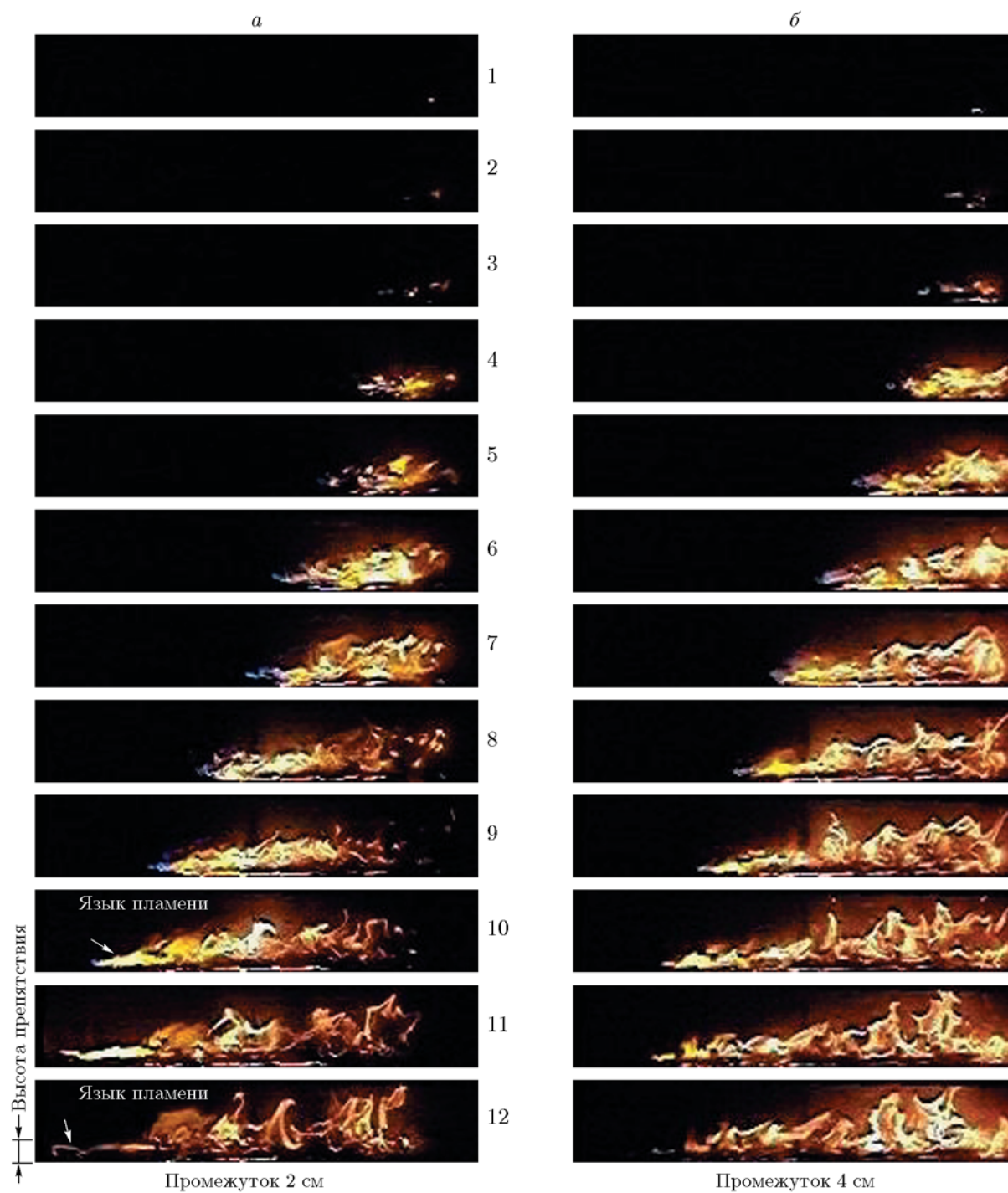


Рис. 9. Ускорение пламени над препятствиями в случае тканевого покрытия



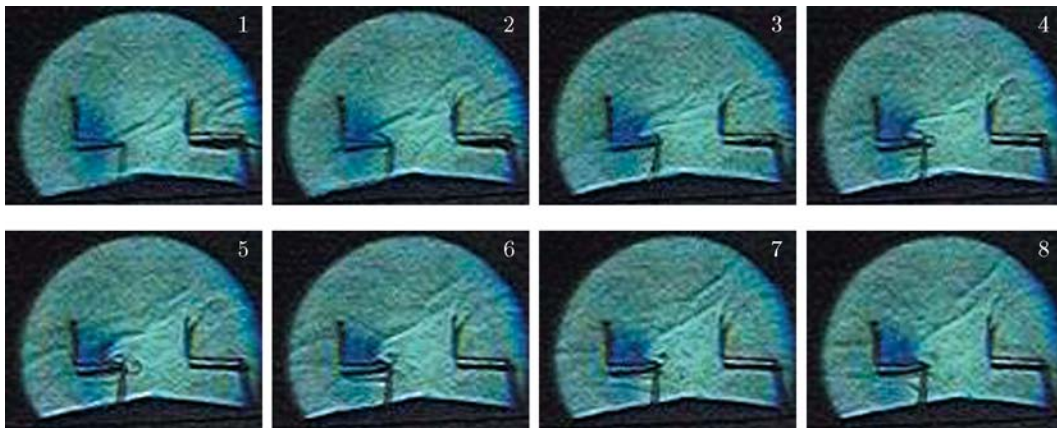


Рис. 10. Искажение пламени в области заднего края при промежутке между препятствиями 2 см и бумажном покрытии нижней стенки

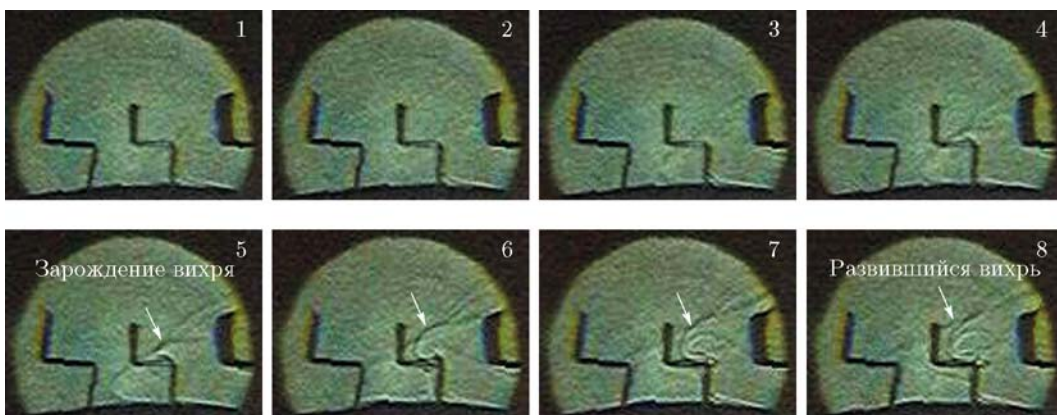


Рис. 11. Искажение пламени в области переднего края при промежутке между препятствиями 2 см и бумажном покрытии нижней стенки

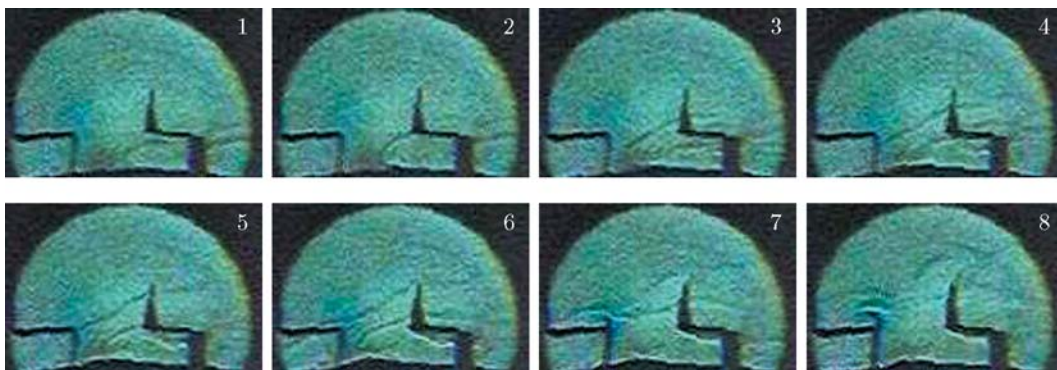


Рис. 12. Искажение пламени в области заднего края при промежутке между препятствиями 4 см и бумажном покрытии нижней стенки



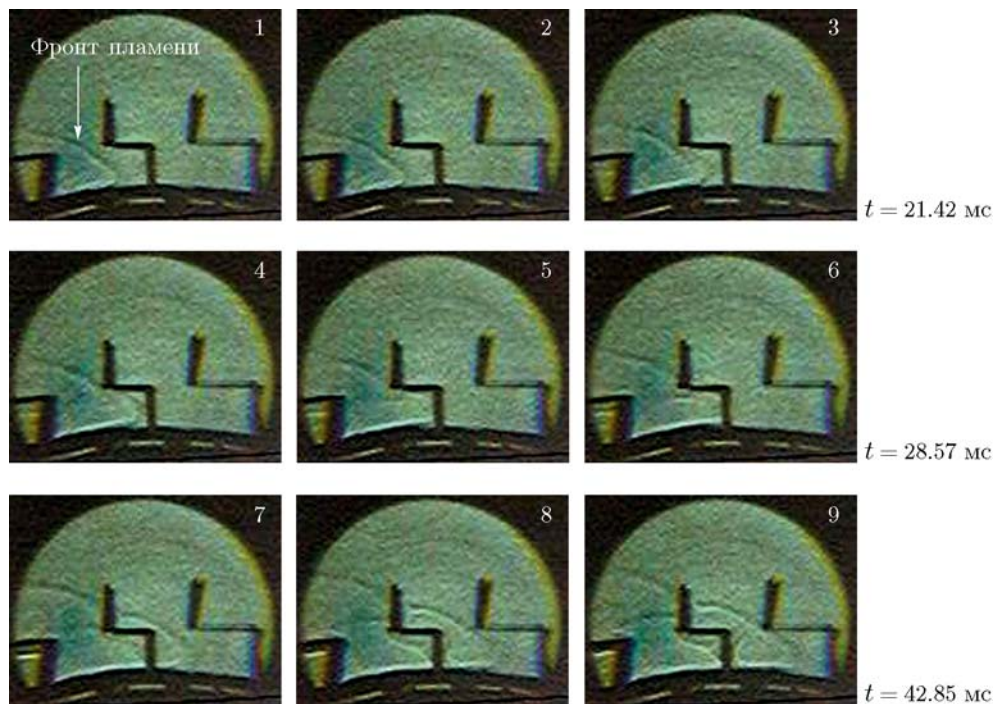


Рис. 13. Искажение пламени в области переднего края при промежутке между препятствиями 2 см и бумажном покрытии нижней стенки (пламя инициировано в области позади препятствий)

что гидродинамическая неустойчивость Рихтмайера — Мешкова усиливает смешивание реагентов и газообразных продуктов. Это может приводить к локальным взрывам. Если объем взрывчатого газа достаточно велик, такой взрыв запускает детонацию в ограниченном и неограниченном пространстве.

Наибольшая интенсивность турбулентности в плоскости на высоте 6 мм от нижней стенки камеры получена в точке 6 сетки (см. рис. 2). Расположенная у стоячей ударной волны точка 3 находится близко к краю препятствия и лежит внутри слоя смешения. Интенсивность турбулентности в этих точках выше из-за флуктуаций в слое смешения. Соотношение интенсивностей турбулентности в различных точках этой плоскости показано на рис. 16,а. Интенсивность турбулентности в средней части плоскости выше в точках 12, 15 и 16 (рис. 16,б). Точки 15 и 16 расположены на набегающей и отраженной ударных волнах соответственно (в скачке уплотнения).

Наибольшая интенсивность турбулентности вблизи верхней стенки наблюдается в точке 23 (рис. 16,в), расположенной в районе прямого скачка уплотнения на фронте возмущения, и вызвана взаимодействием флуктуиру-

ющей взрывной волны, пограничного слоя и слоя смешения. Ускорение пламени происходит до тех пор, пока скорость турбулентного смешения эквивалентна скорости реакции [26], но пламя гаснет, если скорость смешения становится больше скорости реакции. Ускорение пламени не может произойти до газодинамического запираения, за исключением случая, когда время реакции очень мало. Турбулентность в пограничном слое делает пламя более волнистым. Это еще больше увеличивает скорость реакции. Процесс продолжается до того момента, пока скорость пламени не достигнет стационарного значения или конечной установившейся скорости. Ускорение языка пламени в области между препятствиями зависит от турбулентности в пограничном слое. Обнаружено, что скорость воздуха является еще одним важным параметром, определяющим распространение пламени и дыма [27] и приводящим к увеличению турбулентности в потоке впереди языка пламени. Размер вихря [28] определяет повышение скорости распространения маленького пламени в турбулентном режиме при более низкой интенсивности турбулентности.

Гидродинамическое сопротивление [29], сопротивление стенок и взаимодействие удар-

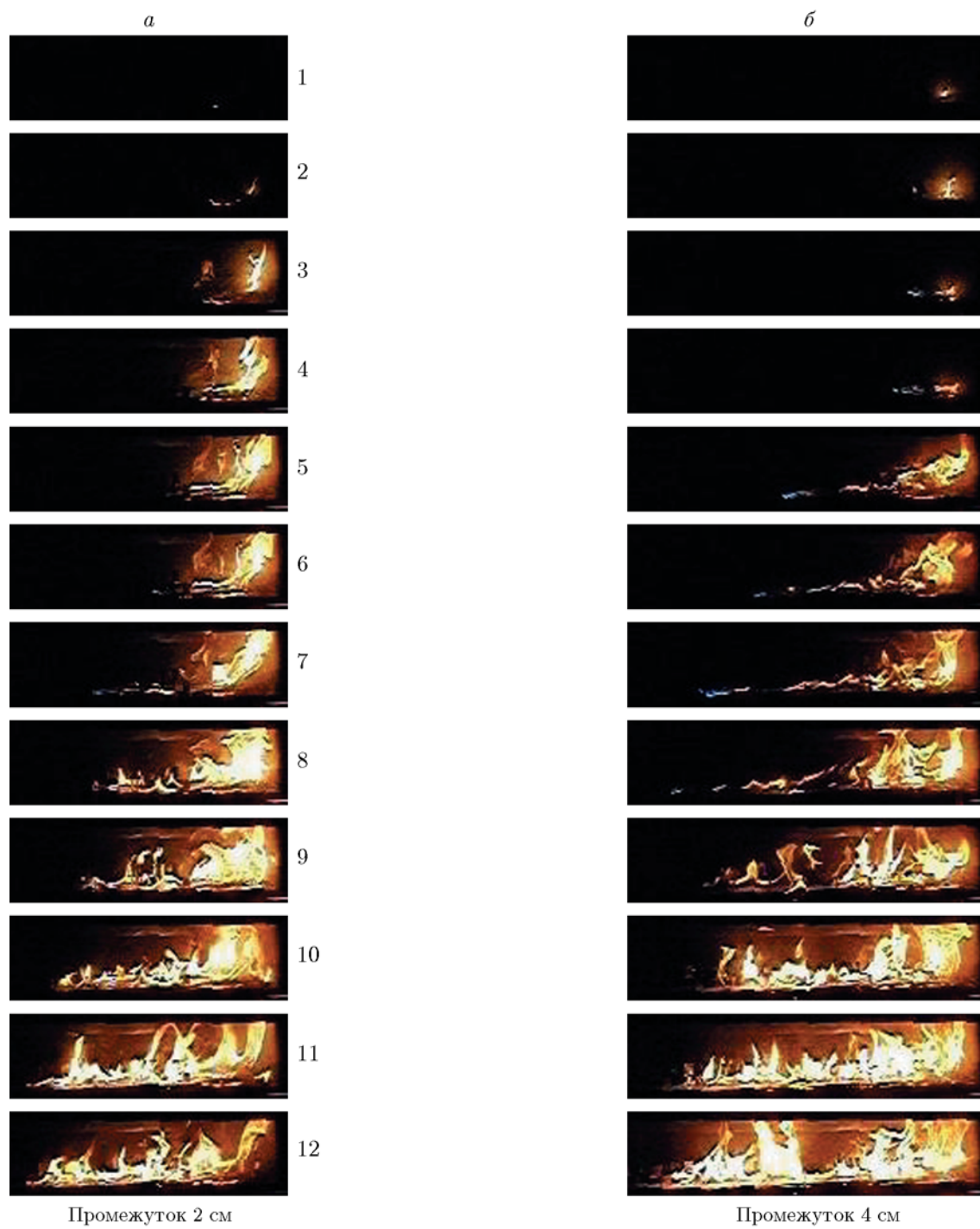


Рис. 14. Ускорение пламени в области над препятствиями в случае бумажного покрытия нижней стенки

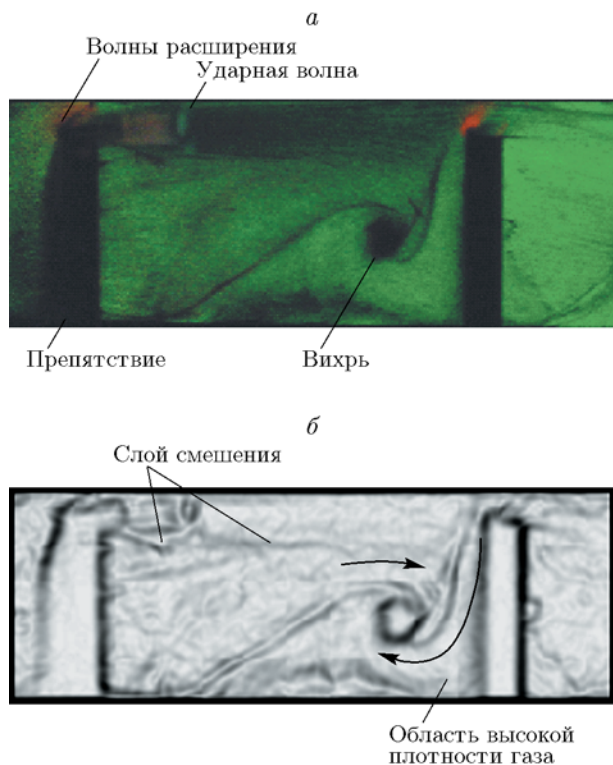


Рис. 15. Вихрь в области между препятствиями (препятствия расположены одно за другим):

*a* — изображение, полученное шпирен-методом,  
*б* — инвертированное полутоновое изображение

ных волн увеличивают скорость пламени. Морщинистость поверхности пламени появляется при промежутке между препятствиями размером 2 см в случае тканевого покрытия, а не бумажного, так как тканевая поверхность более шероховата, что увеличивает трение и вызывает интенсивное турбулентное перемешивание [30]. Интенсивность турбулентности гораздо выше ( $\approx 80\%$ ) в районе препятствий (точки 3, 6 на рис. 16, *a*), ударных волн (точки 23, 24 на рис. 16, *в*), а также в пограничном турбулентном слое. Интенсивность турбулентности внутри пограничного слоя составляет  $10 \div 20\%$  на расстоянии 0.5 мм от поверхности стенки и  $80\%$  на препятствии внутри пограничного слоя. В турбулентных областях могут наблюдаться пламена, разветвленные [31] из-за взаимодействия с ударными волнами. Кроме того, теплоотвод к стенкам может отсрочить продвижение пламени [32], а бумажное или тканевое покрытие на нижней стенке замедляет передачу тепла от огибающей предварительного разогрева вокруг языка пламени.

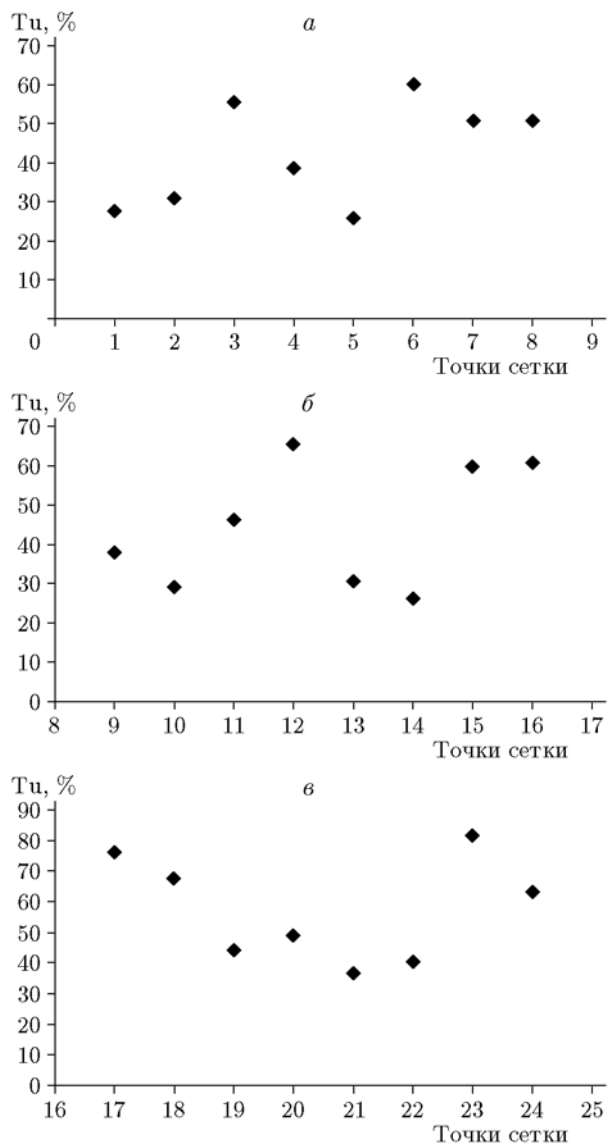


Рис. 16. Интенсивность турбулентности в точках 1–8 (*a*), 9–16 (*б*), 17–24 (*в*)

Следовательно, в случае покрытия из материала с высокой теплопроводностью потеря тепла будет гораздо больше, поэтому увеличивается скорость пламени. В нашей работе нижняя стенка изготовлена из проволочной сетки, поверх которой помещается покрытие, так что потери тепла могут быть уменьшены.

В ускоряющемся пламени может произойти детонация [23], если скорость смешения превышает скорость реакции. В рассматриваемом случае смешение происходит сильнее у нижней стенки, чем в области над препятствиями. Следовательно, скорость пламени увеличивается и, если длина прохода достаточно велика,

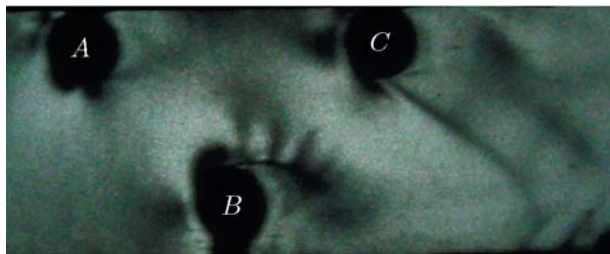


Рис. 17. Сложный многократный скачок уплотнения в околозвуковом потоке (такие условия существуют в области перед быстрым пламенем)

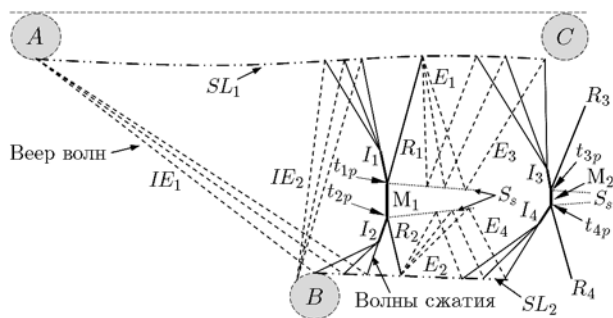


Рис. 18. Схематичное изображение скачка давления, соответствующего шпирен-изображению

реакции будут ускоряться вплоть до достижения стационарной (конечной) скорости. Структура, возникающая в случае цилиндрических препятствий с промежутком, равным высоте канала, характеризуется сложными интенсивными волновыми явлениями, которые схематично показаны на рис. 17. Волновая диаграмма (рис. 18) свидетельствует об образовании множества ударных волн в режиме движения по отрицательной наклонной плоскости. Когда высокоскоростной дозвуковой поток приближается к препятствию  $A$ , в критическом режиме возникает веер волн разрежения  $IE_1$ . Эти волны разрежения отражаются как волны сжатия от сдвигового слоя  $SL_2$ , которые образуются у препятствия  $B$ . Волны сжатия от  $SL_2$  сливаются, образуя косой скачок  $I_2$ , аналогично этому другой косой скачок  $I_1$  образуется волнами сжатия от сдвигового слоя  $SL_1$  (возникшими от препятствия  $A$ ). Два скачка  $I_1$  и  $I_2$  встречаются с ножкой Маха  $M_1$  в тройных точках  $t_{p1}$  и  $t_{p2}$  соответственно. От этих тройных точек падающие скачки  $I_1$  и  $I_2$  отражаются как слабые скачки  $R_1$  и  $R_2$  соответственно. Эти скачки становятся веерами слабых волн разре-

жения  $E_1$  и  $E_2$  в сдвиговых слоях  $SL_1$  и  $SL_2$ . При взаимодействии с потоками  $S_s$  (давление в которых постоянно) волны  $E_1$  и  $E_2$  продолжают как одно и то же семейство волн  $E_3$  и  $E_4$ . В дальнейшем веера волн разрежения  $E_3$  и  $E_4$  приводят ко второму тройному скачку с  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и  $M_2$ . Такие тройные ударные конфигурации (включающие в себя  $I$ ,  $R$  и  $M$ ) образуются и над сдвиговым слоем  $SL_2$  (ср. рис. 17 и рис. 18). Многократно повторяющиеся маховские конфигурации усиливают турбулентность. Когда пламя взаимодействует с этой сложной ударной системой у препятствия  $B$ , могут возникать турбулентные облака пламени и горячие точки [33, 34]. Формирование ударных волн  $I_1$  и  $I_2$  аналогично формированию ударных волн [35], возникающих из-за увеличения крутизны волн разрежения, отраженных от границы постоянного давления. Это явление при последующих препятствиях в конечном итоге может привести к детонации в реагирующей среде.

## ВЫВОДЫ

На распространение пламени в канале с препятствиями влияет наличие свободного промежутка между двумя рядами препятствий. Такой промежуток моделирует проход между двумя рядами сидений в пассажирском автобусе. Возникновение вихря в пространстве между близко расположенными препятствиями вызывает появление быстрого пламени, а его размер эквивалентен половине высоты препятствия. Вихрь такого размера приводит к появлению быстрого пламени в том случае, если препятствия расположены друг от друга на расстоянии одной высоты препятствия. Возмущения, вызванные гидродинамической неустойчивостью, также увеличивают скорость пламени даже в полуограниченном пространстве. Раздвоение пламени приводит к формированию малых латеральных очагов пламени.

Поток, инициированный пламенем, вызывает негативное воздействие, формирует ударные волны, которые порождают интенсивную турбулентность, что еще сильнее искажает фронт пламени и таким образом ускоряет пламя. Измерения скорости лазерным доплеровским методом показали, что наибольшая турбулентность наблюдается вблизи стен. Наличие областей рециркуляции позади препят-



ствий обеспечивает лучшее смешение реагентов и газообразных продуктов.

С точки зрения безопасности расстояние между следующими друг за другом сиденьями в транспортных средствах и зрительных залах должно быть не меньше высоты сидений. Это поможет избежать возникновения быстрого пламени и минимизировать тяжесть последствий. Заклинивания дверей из-за несимметричного термического расширения можно избежать, изготавливая двери из материалов с малыми коэффициентом термического расширения.

### ЛИТЕРАТУРА

- Burgess D. S., Zabetakis M. G.** Detonation of a flammable cloud following a propane pipeline break: the December 9, 1970, explosion in Port Hudson, Mo // Tech. Rep. BM-RI-7752, Bureau of Mines, Pittsburgh, Pa, USA, Pittsburgh Mining and Safety Research Center, 1973.
- Johnson D. M.** Vapour cloud explosion at the IOC terminal in Jaipur // Symp. Series No. 158, Hazards XXIII, Institution of Chemical Engineers, 2012.
- Vijaya Kumar Cheeda.** Experimental investigation of flame propagation during fire accidents in confined space // Proc. of the 9th Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9). — 2019. — P. 321–332.
- Dabora E. K., Weinberger L. P.** Present status of detonations in two-phase systems // Acta Astronaut. — 1974. — V. 1. — P. 361–372.
- Roy G. D., Frolov S. M., Kailasanath K., Smirnov N. N.** Gaseous and heterogeneous detonations: Science to Applications. — Moscow: ENAS Publ., 1999. — P. 3–24.
- Wolański P.** Detonative propulsion // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34, N 1. — P. 125–158.
- Митрофанов В. В.** Детонационные волны в гетерогенных средах: учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 1988.
- Bradley D., Lawes M., Liu Kexin.** Turbulent flame speeds in ducts and the deflagration/detonation transition // Combust. Flame. — 2008. — V. 154. — P. 96–108.
- Na'inna A. M., Somuano-Ballesteros G., Phylaktou H. N., Andrews G. E.** Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance // 10th Int. Symp. on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (XISHP-MIE), Bergen, Norway, 2014.
- Dorofeev S. B.** Hydrogen flames in tubes: critical run-up distances // Int. J. Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34. — P. 5832–5837.
- Gökalp Iskender.** On the turbulence in premixed flames // Acta Astronaut. — 1979. — V. 6, N 7-8. — P. 847–860.
- Smirnov N. N., Panfilov I. I., Tyumikov M. V., Berdyugin A. G., Dushin V. R., Presnyakov Yu. P.** Theoretical and experimental investigation of combustion to detonation transition in chemically active gas mixtures in closed vessels // J. Hazard. Mater. — 1997. — V. 53. — P. 195–211.
- Vijaya Kumar Cheeda, Amit Kumar, Rammurthi K.** Influence of shear layers on the structure of shocks formed by rectangular and parabolic blockages placed in a subsonic flow-field // Shock Waves. — 2014. — V. 24. — P. 157–169.
- Vijaya Kumar Cheeda, Amit Kumar, Rammurthi K.** Influence of height of confined space on explosion safety // Fire Saf. J. — 2015. — V. 76. — P. 31–38.
- Renard P. H., Thevenin D., Rolon J. C., Candel S.** Dynamics of flame/vortex interactions // Prog. Energy Combust. Sci. — 2000. — V. 26. — P. 225–282.
- Teodorczyk A., Lee J. H. S., Knystautas R.** The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels // Symp. (Int.) Combust. — 1990. — V. 23, N 1. — P. 735–741.
- Lee U. D., Yoo C. S., Chen J. H., Frank J. H.** Effects of H<sub>2</sub>O and NO on extinction and re-ignition of vortex-perturbed hydrogen counter flow flames // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32, N 1. — P. 1059–1066.
- Bédard-Tremblay L., Fang L., Melguizo-Gavilanes J., Bauwensa L., Finstad P. H. E., Cheng Z., Tchouvelev A. V.** Simulation of detonation after an accidental hydrogen release in enclosed environments // Int. J. Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34. — P. 5894–5901.
- Moen I. O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H.** Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles // Combust. Flame. — 1980. — V. 39, N 1. — P. 21–32.
- Meshkov E. E.** Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave // Fluid Dynamics. — 1969. — V. 4. — P. 101–104.
- Mahmoudi Y., Mazaheri K., Parvar S.** Hydrodynamic instabilities and transverse waves in propagation mechanism of gaseous detonations // Acta Astronaut. — 2013. — V. 91. — P. 263–282.
- Prestridge K., Orlicz G., Balasubramanian S., Balakumar B. J.** Experiments of the Richtmyer — Meshkov instability // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. — 2013. — V. 371, N 2003. — DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0165>.
- Thomas G., Bambrey R.** Observations of the emergence of detonation from a turbulent flame brush // Proc. Combust. Inst. — 2002. — V. 29, N 2. — P. 2809–2815. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80343-1](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80343-1).

24. **Oran E. S., Khokhlov A. M.** Deflagrations, hot spots and the transition to detonation // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* — 1999. — V. 357. — P. 3539–3551.
25. **Thomas G.** Some observations on the initiation and onset of detonation // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* — 2012. — V. 370, N 1960. — DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0368>.
26. **Lee J. H. S., Knystautas R., Freiman A.** High-speed turbulent deflagrations and transition to detonation in H<sub>2</sub> — air mixtures // *Combust. Flame.* — 1984. — V. 56. — P. 227–239.
27. **Sujatmiko W., Dipojono H. K., Nugroho Soelami F. X., Soegijanto.** Performance-based fire safety evacuation in high-rise building flats in Indonesia — a case study in Bandung // *Procedia Environ. Sci.* — 2014. — V. 20. — P. 116–125. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.016>.
28. **Peters N.** Laminar flamelet concepts in turbulent combustion // *Symp. (Int.) Combust.* — 1986. — V. 21, N 1. — P. 1231–1250. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80355-2](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80355-2).
29. **Kagan L., Sivashinsky G.** The transition from deflagration to detonation in thin channels // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 134, N 4. — P. 389–397. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(03\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(03)00138-X).
30. **Kessler D. A., Gamezo V. N., Oran E.** Simulations of flame acceleration and deflagration-to-detonation transitions in methane-air systems // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 11. — P. 2063–2077. — DOI: [10.1016/j.combustflame.2010.04.011](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.04.011).
31. **Gamezo V. N., Khokhlov A. M., Oran E. S.** The influence of shock bifurcations on shock-flame interactions and DDT // *Combust. Flame.* — 2001. — V. 126. — P. 1810–1826.
32. **Lee T. W., Lee S. J.** Direct comparison of turbulent burning velocity and flame surface properties in turbulent premixed flames // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 132, N 3. — P. 492–502. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00495-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00495-9).
33. **Васильев А. А., Звегинцев В. И., Наливайченко Д. Г.** Детонационные волны в сверхзвуковом потоке реагирующей смеси // *Физика горения и взрыва.* — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 85–100.
34. **Khokhlov A. M., Oran E. S.** Numerical simulation of detonation initiation in a flame brush: the role of hot spots // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 119. — P. 400–416. — DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00058-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00058-9).
35. **Aldo A. C., Argrow B. M.** Dense gas flow in minimum length nozzle // *J. Fluids Eng.* — 1995. — V. 117, N 2. — P. 270–276. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2817140>.

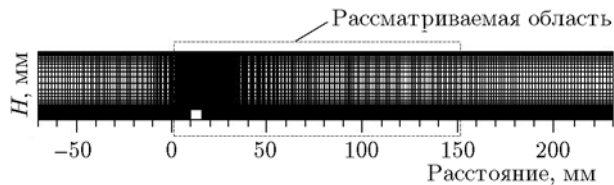


Рис. 19. Вычислительная сетка

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Для сравнения маломасштабной и полномасштабной геометрии был проведен двумерный численный анализ. Размер вычислительного домена составлял 300 × 36 мм, сетка показана на рис. 19. При анализе использовался коммерческий код ANSYS Fluent. Уравнения сохранения массы, момента, энергии сжимаемого потока и уравнение состояния решаются методом конечных объемов с использованием встроенного решателя (Гаусса — Зайделя) в сочетании с алгебраическим многосеточным методом. Определяли плотность, давление, скорость (число Маха) и внутреннюю энергию. Пристеночные граничные условия считали адиабатическими без скольжения. Шероховатость стенки принимали равной 0.5. В точке напуска использовалось давление торможения 3.5 бар, полученное в экспериментах с применением зонда торможения. На выходе давление в окружающей среде принималось равным 1.01 бар. Статическая температура воздуха на входе составляла 300 К.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (1)$$

Уравнение момента

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}). \quad (2)$$

Уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot \{ \vec{v} (\rho E + p) \} = \\ = -\nabla \cdot \left( \sum_j h_j J_j \right), \quad (3) \end{aligned}$$

$$e = \frac{RT}{\gamma - 1}. \quad (4)$$

Уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{RT}. \quad (5)$$

Модель турбулентности: SST  $k$ - $\omega$ .

Вязкость вихря

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\omega}. \quad (6)$$

Кинетическая энергия турбулентности ( $k$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k. \end{aligned} \quad (7)$$

Удельная скорость диссипации ( $\omega$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $G_{k,\omega}$  — генерация  $k$  и  $\omega$ ,  $\Gamma_{k,\omega}$  — эффективный коэффициент диффузии для  $k$  и  $\omega$ ,  $Y_{k,\omega}$  — диссипация  $k$  и  $\omega$  из-за турбулентности.

Поле потока позади препятствий характеризуется высокими значениями числа Маха (среднее значение 0.9) и имеет скачки давления. На входе поток является турбулентным, как показывают эксперименты. Поэтому выбрана турбулентная модель сдвиг — сжатие — перенос (SST)  $k$ - $\omega$ , которая, как было показано, является подходящей для поля потока с околозвуковыми скачками давления. В модели SST  $k$ - $\omega$  на основании предположения Буссинеска о вихревой вязкости предполагается изотропная турбулентность. Уравнения турбулентной модели (5)–(7) решаются одновременно.

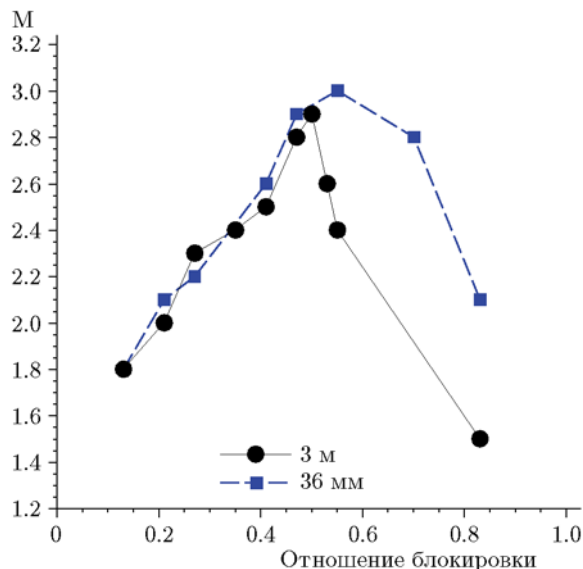


Рис. 20. Максимальное число Маха в потоке для маломасштабной (квадраты) и крупномасштабной (кружки) моделей

Поскольку ударная волна зависит от числа Маха в направлении потока, проведено сравнение профилей числа Маха в миниатюрной модели высотой 36 мм и в модели помещения высотой 3 м. Максимальные значения числа Маха для обеих геометрий построены при различных загромождениях потока препятствиями (BR) и представлены на рис. 20. Профиль значений числа Маха свидетельствует о сходных тенденциях в обоих масштабах для отношения загромождения сечения менее 0.5. При значениях более 0.5 тенденция сохраняется, но углы наклона отличаются. Сравнение показало, что эксперименты по ускорению пламен в камерах малого размера позволяют получить выводы, справедливые и для больших помещений.

Поступила в редакцию 14.04.2020.

После доработки 25.06.2020.

Принята к публикации 13.07.2020.