

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКРУЧЕННОГО ПЛАМЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

А. И. Крикунова, Д. С. Лунин

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва
krikunovaa@gmail.com, lunin.ds@phystech.edu

Исследовалась устойчивость закрученного пламени предварительно перемешанной метановоздушной смеси при различных гравитационных условиях. Построены карты устойчивого горения при нормальной и обратной гравитации в координатах скорости потока и коэффициента избытка топлива. Показано, что при использовании завихрителя с центральным телом и без него пределы устойчивого горения не изменяются, но отличается геометрия факела. Выявлено незначительное влияние наличия завихрителей на условия срыва пламени, особенно в условиях нормальной гравитации. Показано, что завихритель позволяет получить богатое поднятое пламя в условиях нормальной гравитации и бедное поднятое пламя в условиях обратной гравитации. Обнаружено, что при разбавлении смеси горючим границы устойчивости в условиях обратной гравитации расширяются по сравнению с условиями нормальной гравитации.

Ключевые слова: метановоздушное пламя, закрученный поток, гравитация.

DOI 10.15372/FGV20230206

ВВЕДЕНИЕ

На практике наиболее распространенный способ стабилизации пламени предварительно смешанных газов представляет собой организацию в потоке крупномасштабных вихревых структур. Для этого применяется, например, закрутка потока [1]. Известно, что структура нереагирующих закрученных струй существенно зависит от степени закрутки потока и способа ее формирования [2]. При достаточно сильной закрутке в слое смешения усиливаются спиральные моды неустойчивости, возникает распад вихревого ядра и появляется рециркуляционная зона. При этом распад вихря происходит в различных формах: спиральная, пузырьковая и/или коническая. В случае реагирующих закрученных течений в дополнение ко всем вышеописанным эффектам добавляются эффекты термического расширения. На практике закрутку потока применяют как метод формирования крупномасштабных вихревых структур. В такой структуре формируется зона рециркуляции с интенсивным тепло-

массообменом вследствие прецессии вихревого ядра. Наличие такой зоны облегчает воспламенение свежей горючей смеси за счет прогрета при контакте с продуктами реакции. Наибольший эффект наблюдается в случае обедненных горючих смесей. Все это показывает необходимость изучения природы устойчивости реагирующих течений, содержащих крупномасштабные вихревые структуры.

Влияние гравитации на реагирующие течения проявляется в возникновении сил плавучести за счет разной плотности исходных продуктов, продуктов сгорания и окружающих газов. Возникающие силы начинают конкурировать с инерцией потока. Соответственно, наибольшее влияние плавучести наблюдается при малых скоростях потока, в том числе в рециркуляционных зонах. Таким образом, очевидно, что для предсказания переходных процессов такого пламени необходимо исследование внутренней структуры гравитационно возмущенных закрученных реагирующих течений.

Ранее уже проводились исследования влияния гравитации на процессы горения, в том числе авторами настоящей работы [3–7]. В 1956 г. впервые было проведено экспериментальное исследование воспламенения капель *n*-гептана и этилового спирта в условиях микрогравитации [8]. Было обнаружено, в частно-

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ (МК-3888.2021.4).

Доложено на II Международной научной конференции «Физика и химия горения и процессов в экстремальных условиях», 12–16 июля 2022, Самара.

© Крикунова А. И., Лунин Д. С., 2023.

сти, что с ростом ускорения свободного падения происходит уширение фронта пламени и зоны прогрева, при уменьшении ускорения скорость горения снижается, а в области малых ускорений данные параметры меняются скачкообразно. Первые экспериментальные исследования горения околопредельных бедных водородовоздушных и богатых пропановоздушных смесей в закрытом объеме были представлены в работе [9]. Впервые было показано, что в невесомости распространение пламени происходит в более широком диапазоне составов смесей, и наблюдалось замедление затухания пламени. Несколько позднее были исследованы процессы воспламенения метановоздушных смесей в камере сгорания на малом вакуумно-динамическом стенде (Drop Tower) в NASA [10, 11]. Было показано влияние гравитации на зависимость воспламенения метановоздушных смесей, а также распространения и погасания пламен от давления. В начале 1990-х годов стали проводиться эксперименты с открытым пламенем как в параболических полетах, так и на вакуумно-динамических стендах [12–18]. Наименее затратные исследования влияния гравитационных сил на характеристики пламени можно реализовывать в условиях земной гравитации, изменяя направление скорости распространения дефлаграционной волны относительно направления ускорения свободного падения и проводя сравнительный анализ процессов в условиях нормальной и обратной гравитации. Так, в работе [16] изучались пределы срыва и уноса конического и обратного конического пламен в условиях нормальной и обратной гравитации при использовании турбулизующей пластины и без нее. Показано, что наибольшее влияние на стабилизацию обратного конического ламинарного пламени оказывают силы плавучести. В условиях обратной гравитации границы стабильного горения пламени расширяются в области бедной смеси. Установлено, что для конического и обратного конического турбулизованного пламени границы горения незначительно отличаются в условиях нормальной и обратной гравитации. Следует отметить, что в работе [16] рассматривались пламена только бедной смеси и не описан процесс срыва.

Что касается закрученных реагирующих потоков, проведено сравнительно мало исследований влияния плавучести на динамику богатого пламени предварительно перемешанной

смеси, среди них работы [19, 20]. Позднее этими же авторами было выполнено экспериментальное исследование влияния плавучести на динамику и устойчивость закрученного пламени вблизи пределов срыва в условиях нормальной и обратной гравитации [21, 22]. Было показано, что при нормальной и обратной гравитации закрученные пламена принимают различную форму. Например, в некоторой области значений коэффициента избытка топлива и степени закрутки потока существует такое сочетание условий, которое приводит к циклическим переходам между конической и плоской формами фронта пламени. Следует отметить, что в цитируемых работах слабо представлена общая картина динамики такого типа пламен, не изучены закономерности перехода от одной формы к другой, данные приведены для узкого диапазона параметров реагирующей смеси. Эти аспекты, однако, имеют существенное значение при конструировании горелочных устройств и требуют исследования для использования закрученных пламен на практике.

Цель настоящей работы — определить пределы устойчивого горения метановоздушного пламени при использовании завихрителей различных типов и вариации гравитационных условий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Измерения проводились на стенде, состоящем из системы подачи рабочих газов, камеры предварительного смешения горючего и окислителя, горелки, внутри которой могут размещаться завихрители. В качестве горючего использовался метан, в качестве окислителя — воздух. Ошибка показаний массового расхода расходомеров не превышает 0.2 %. Горелка представляет собой профилированное сопло Витошинского с входным диаметром 30 мм, выходным — 15 мм и длиной 28 мм. Горелка присоединена к смесителю длиной 1300 мм и диаметром 30 мм, который позволяет получить достаточно однородную горючую смесь. Важно отметить, что во время эксперимента температура сопла поддерживалась постоянной, так как сопло, особенно в условиях обратной гравитации, сильно нагревается продуктами сгорания.

Лопастной завихритель представляет собой набор плоских пластин, закрепленных под

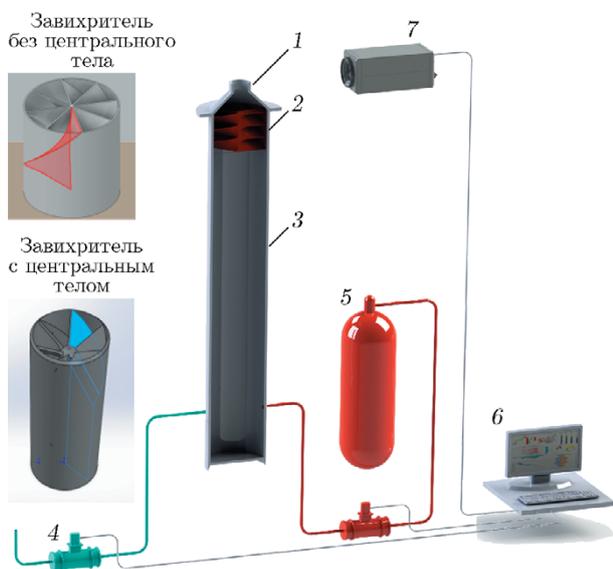


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 1 — профилированное сопло, 2 — завихритель,
 3 — камера смешения, 4 — система подачи окислителя, 5 — система подачи горючего, 6 — блок управления, 7 — высокоскоростная камера

углом к продольной оси в кольцевом промежутке между внешней и внутренней втулками. Завихритель вмонтирован в тракт подачи горючей смеси непосредственно перед соплом. Коэффициент закрутки определяется следующим образом: $S = (2/3)\operatorname{tg}\alpha$, где α — угол установки лопаток относительно направления потока [1]. Для классического лопастного завихрителя $S = 1.0$. Поток в кольцевом зазоре приобретает угловую составляющую скорости, которая за счет инерционных сил в среде сохраняется в промежутке от выхода из завихрителя до выхода из сопла и далее в свободном потоке до разрушения затопленной струи. Однако такие завихрители при необходимости последующего перехода потока из кольцевого канала в трубу сплошного сечения приводят к возникновению на оси течения тангенциального разрыва. Для безотрывного перехода применяются сглаживающие устройства — центральные тела конусообразной формы, обеспечивающие плавный сход потока с центральной втулки и его последующее смыкание. В большей степени применение таких завихрителей обусловлено технологической простотой их изготовления на общемашиностроительной технологической базе. Однако даже при этом затруднительно изготовить завихритель с большой степе-

нью закрутки с лопастным участком длиной более двух диаметров и количеством лопастей больше шести. В работе проведен сравнительный анализ устойчивости пламени в случае использования завихрителя с центральным телом (классической лопастной конструкции) и без него. Завихритель без центральной втулки со сложной конфигурацией формировался на основе винта Архимеда. Строился плоский контур, представляющий собой «колесо» с радиальными «спицами», пересекающимися на оси «колеса». Толщина и «колеса», и «спиц» составляет 1 мм. Далее производилось непрерывное трансляционное перемещение контура в пространстве вдоль оси «колеса» с одновременным поворотом вокруг этой оси. Точки в пространстве, попадающие внутрь контура на каждом этапе движения, принимались принадлежащими твердому телу. Таким образом, «колесо» контура формирует внешнюю стенку завихрителя, а «спицы» — лопатки. При этом внешняя стенка представляет собой цилиндр, а лопасти — сложную спиральную поверхность. Варьируя количество поворотов при перемещении на заданное расстояние можно изменять угол наклона лопастей относительно продольной оси. Следует отметить, что при таком построении угол установки лопасти изменяется вдоль радиуса от 90° в центре до значения, определяемого построением, на окружности. Для такого завихрителя в эксперименте $S = 1.15$.

Параметры потока определялись на основе выходного диаметра сопла, свойств и объемного расхода воздуха. В эксперименте скорость потока варьировалась от 0.5 до 13 м/с. Коэффициент избытка горючего, определяемый как отношение молярной доли горючего в эксперименте к его молярной доле в стехиометрической смеси, варьировался в пределах $\phi = 0.75 \div 3.0$. Эксперименты проводились при комнатной температуре и нормальном давлении. Направление распространения фронта пламени в экспериментах совпадало с направлением вектора силы тяжести (условия нормальной гравитации) либо было противоположно направлено (условия обратной гравитации).

Видеосъемка хемолуминесценции пламени выполнялась с помощью высокоскоростной камеры Photron FASTCAM SA4. Размер матрицы камеры составлял $1\,024 \times 1\,024$ пкс, размер области съемки — 56×56 мм, частота регистрации кадров — 1 000 кадр/с.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Значения скорости потока, при которых происходят отрыв пламени от кромки сопла и стабилизация его на некотором расстоянии от кромки сопла в условиях постоянства коэффициента избытка топлива, будем называть границей поднятия пламени, отрыв от кромки с последующим уносом пламени (погасанием) — границей срыва пламени, обратное присоединение пламени к кромке сопла при снижении скорости потока — границей обратного присоединения. Регистрация таких процессов проводилась следующим образом. Для нахождения границы отрыва поджигалось заведомо присоединенное пламя с требуемым коэффициентом избытка топлива, после чего с шагом 0.01 м/с повышалась скорость потока до момента отрыва — фиксировались условия поднятия. Далее скорость повышалась до момента полного уноса пламени — фиксировались условия срыва. Для определения условий присоединения пламени поджигалось заведомо поднятое пламя с заданным коэффициентом избытка топлива, после чего скорость потока понижалась с шагом 0.01 м/с до присоединения фронта пламени к кромке сопла. Данные для каждого из режимов осреднялись по трем измеренным значениям. Погрешность измерений на приведенных ниже рисунках меньше изображений экспериментальных точек. Ошибка при определении коэффициента избытка топлива определялась погрешностью расходомеров. Ошибка при оценке скорости потока определялась с точностью до 0.01 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований получена карта режимов устойчивого горения в условиях нормальной гравитации при закрутке потока с центральным телом и без него. Результаты представлены на рис. 2 в координатах скорость потока — коэффициент избытка топлива. Из сравнения скоростей потока u и составов горючей смеси, соответствующих условиям переходов режимов горения (поднятие, обратное присоединение, полный срыв) для двух вариантов завихрителей, видно, что они идентичны. Однако кадры скоростной видеосъемки с конфигурацией пламени двух типов завихрителей и анализ динамики этих пламен показывают существенные различия в конфигурации

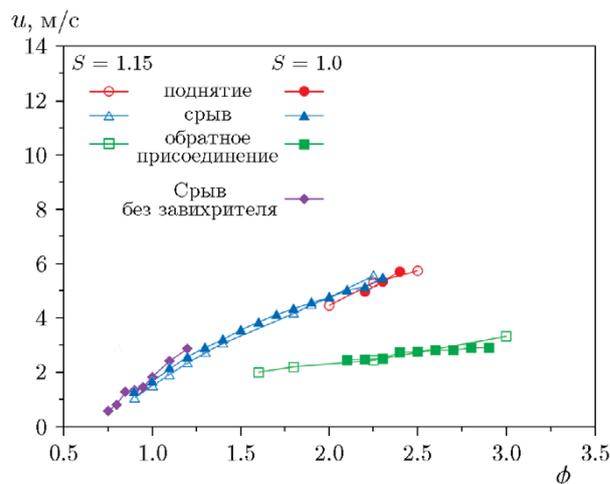


Рис. 2. Карта режимов устойчивого горения при использовании завихрителя с центральным телом и без него. Условия нормальной гравитации

пламен (рис. 3,а). Завихритель без центрального тела при нормальной гравитации формирует присоединенное пламя с конусообразным фронтом горения, стабилизированным на острой кромке сопла. Завихритель с центральным телом при нормальной гравитации формирует присоединенное пламя с фронтом горения расходящейся «многолепестковой» формы, стабилизированной на острой кромке сопла, при этом «лепестки» могут синхронно вращаться вокруг оси сопла. Такое различие конфигураций пламен может быть объяснено различной пространственной структурой поля скоростей, формируемой завихрителями. Поле скоростей в случае завихрителя без центрального тела характеризуется максимальной тангенциальной составляющей вектора скорости вблизи внешней кромки сопла и практически отсутствием ее вблизи оси сопла, в то время как поле скоростей, формируемое классическим завихрителем, имеет тангенциальную составляющую, не зависящую от радиального положения.

Эксперименты по определению режимов устойчивого горения при нормальной и обратной гравитации проводились с использованием завихрителя классической формы (с центральным телом). Данные представлены на рис. 3. Анализ карт режимов устойчивого горения позволяет сделать следующие заключения. В случае нормальной гравитации при коэффициенте избытка топлива $\phi > 2.1$ выявлено существование широкой (по скорости потока) зоны, в ко-

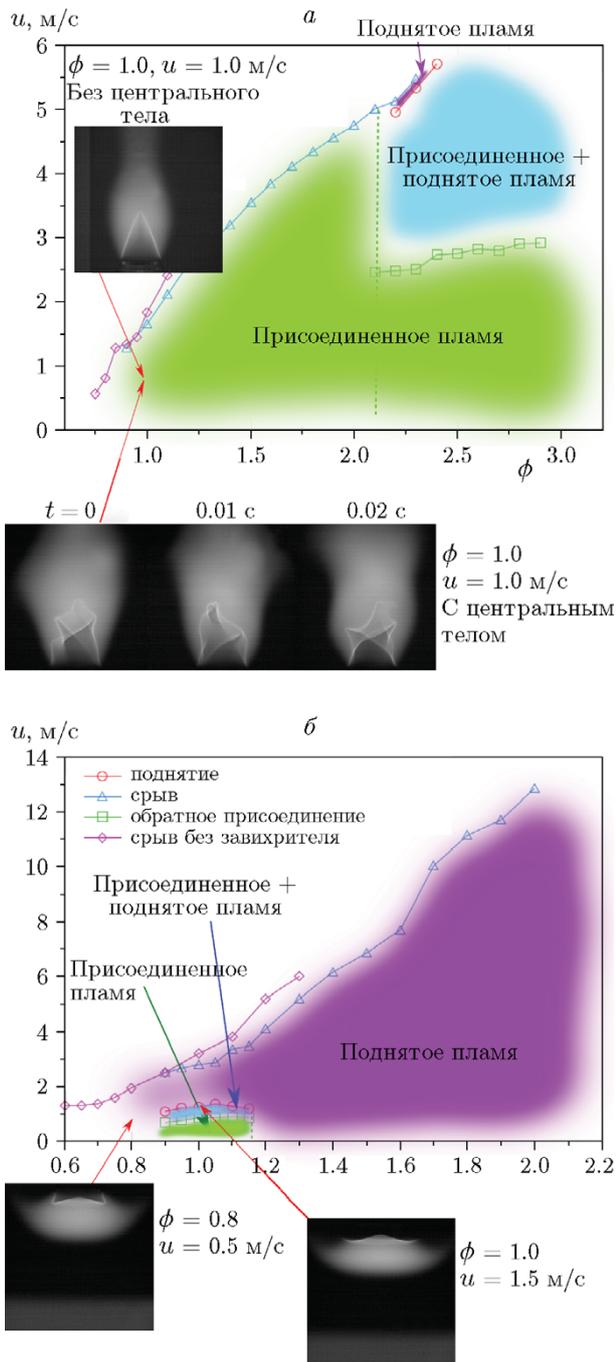


Рис. 3. Карта режимов устойчивого горения при использовании завихрителя с центральным телом в условиях нормальной (а) и обратной (б) гравитации: обозначение экспериментальных точек на части а рисунка те же, что на части б

торой реализуется устойчивое горение как присоединенного, так и поднятого пламени. При этом данная зона фактически является зоной

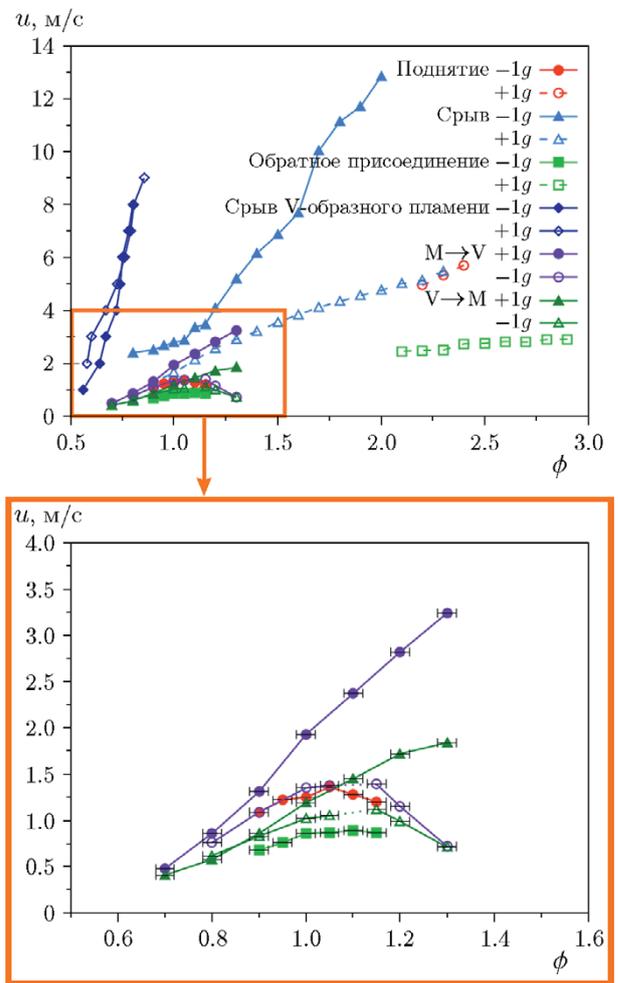


Рис. 4. Карта режимов устойчивого горения: сравнение закрученного и обратного конического пламен

гистерезиса, так как реализация конкретного режима горения в ней зависит от предыдущей конфигурации пламени. То есть при поджиге пламени со скоростными характеристиками, соответствующими положению на карте горения вне данной зоны, например присоединенному пламени, и при последующем повышении скорости и попадании характеристик в данную зону пламя остается присоединенным. При дальнейшем росте скорости происходят отсоединение фронта пламени от края горелки, его поднятие и существование в свободном потоке. При этом зона существования поднятого пламени является достаточно узкой по скорости потока. При дальнейшем увеличении скорости потока наблюдается срыв пламени путем его уноса. Однако, если из режима поднятого пламени начать понижать скорость потока, пламя

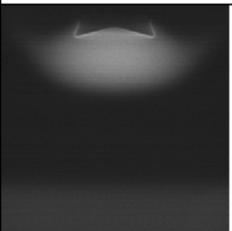
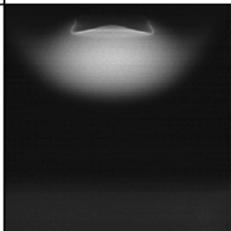
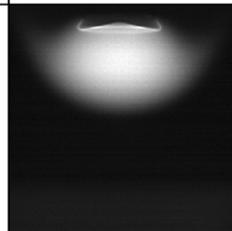
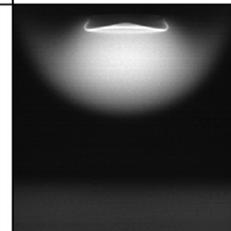
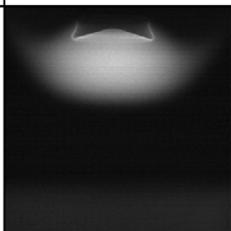
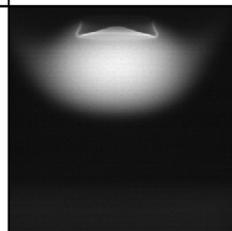
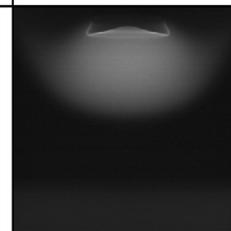
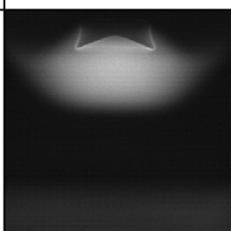
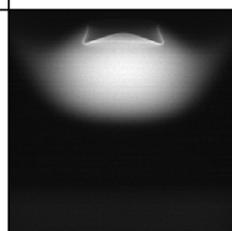
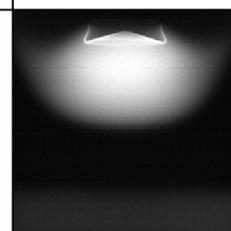
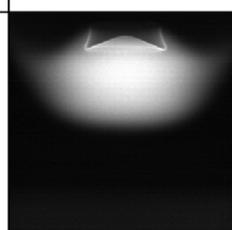
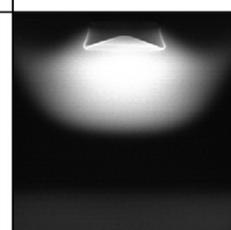
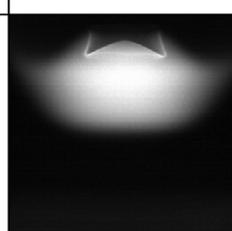
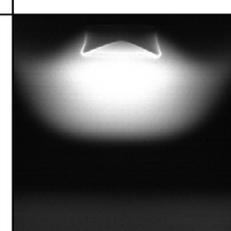
u , м/с	ϕ			
	0.85	0.9	1.0	1.1
0.8				
0.9				
1.0				
1.1				
1.2				

Рис. 5. Кадры скоростной видеосъемки пламени в условиях обратной гравитации

сохранит свою конфигурацию (режим поднятого горения) вплоть до границы рассматриваемой зоны, а по ее достижении происходит переход в режим присоединенного горения. Таким образом, использование завихрителя при нормальной гравитации формирует сравнительно широкую зону устойчивого горения присоединенного и поднятого пламен и сравнительно уз-

кую зону устойчивого горения поднятого пламени.

В случае обратной гравитации использование завихрителя приводит к возникновению аналогичной по характеру переходов зоны гистерезиса — существования как присоединенного, так и поднятого пламени. Следует отметить, что использование завихрителя в слу-

чае обратной гравитации формирует зону существования поднятого пламени в области бедных смесей, и практически не расширяет зону существования присоединенного пламени. Зона совместного существования поднятого и присоединенного пламен является сравнительно узкой как по скорости потока, так и по коэффициенту избытка горючего по сравнению с нормальной гравитацией.

Анализ показал, что динамика закрученного пламени частично схожа с динамикой пламени, стабилизированного поперечным цилиндрическим стабилизатором (обратного конического пламени) [7]. Это видно на рис. 4. В случае обратного конического пламени скорости потока при срыве пламени не зависят от направления вектора силы тяжести и практически совпадают. При наличии же завихрителя кривая зависимости скорости потока при срыве от коэффициента избытка горючего имеет для обратной гравитации больший наклон в сторону роста скорости, чем при нормальной гравитации. Другими словами, границы устойчивости закрученного пламени в условиях обратной гравитации расширяются по сравнению с условиями нормальной гравитации.

В случае нормальной гравитации при использовании завихрителя зона гистерезиса имеет тенденцию к расширению по скорости при росте коэффициента избытка топлива. Аналогичная тенденция расширения зоны гистерезиса с увеличением концентрации горючего наблюдается для переходов $M-V-M$ обратного конического пламени [7]. В обратной гравитации с использованием завихрителя зона гистерезиса, также аналогично характеру переходов $M-V-M$, расширяется по диапазону скоростей с ростом коэффициента избытка топлива до достижения стехиометрического состава, а при дальнейшем росте избытка топлива редуцируется. В отличие от обратного конического пламени, в области стехиометрии наблюдается устойчивое горение закрученного пламени.

Также в ходе исследования был проведен анализ параметров фронта пламени, формируемого завихрителем при обратной гравитации, с использованием результатов высокоскоростной видеосъемки. На кадрах рис. 5 видно, что как в обедненной, так и в обогащенной смеси в свободном потоке формируется устойчивая биконическая форма фронта присоединенного пламени. Возникновение такой фор-

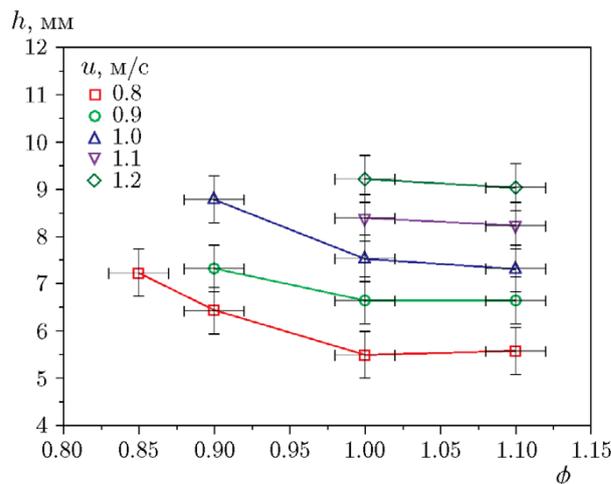


Рис. 6. Зависимость высоты фронта пламени от коэффициента избытка топлива при вариации скорости потока в условиях обратной гравитации

мы обусловлено взаимодействием трех разнонаправленных сил, действующих на продукты сгорания — силы Архимеда, силы инерции и центробежной силы. Анализ кадров позволил получить данные о геометрии фронта пламени при вариации скорости потока и коэффициента избытка топлива (рис. 6). Ошибка оценки положения фронта пламени составляла порядка 1 мм. С повышением скорости потока высота h такого пламени растет, что объясняется увеличением вклада сил инерции в формирование структуры течения в зоне фронта пламени. Однако можно предположить, что при увеличении коэффициента закрутки потока в завихрителе данная тенденция может иметь нелинейный характер, за счет интенсификации центробежных сил. При росте содержания горючего в топливной смеси высота такого пламени снижается. Данные зависимости аналогичны зависимостям, наблюдающимся при изменении параметров обратного конического пламени без использования завихрителя.

ВЫВОДЫ

В работе экспериментально исследована устойчивость закрученного метановоздушного пламени в зависимости от направления воздействия гравитационных сил. Определены границы срыва пламени, а также границы переходов от одной формы пламени к другой. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. При закрутке потока завихрителем с центральным телом и без него пределы устойчивого горения не отличаются, но различная геометрия завихрителей приводит к различной геометрии факела.

2. Использование завихрителя не изменяет условия срыва пламени, однако позволяет получить режимы поднятого пламени в области богатых смесей в условиях нормальной гравитации и в областях бедных смесей в условиях обратной гравитации.

3. При обогащении смеси горючим границы устойчивости закрученного пламени в условиях обратной гравитации расширяются по сравнению с условиями нормальной гравитации.

4. Высота фронта закрученного пламени растет с повышением скорости потока и снижается с разбавлением смеси горючим компонентом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гупта А. К., Лилли Д. Д., Сайред Н.** Закрученные потоки. — М.: Мир, 1987.
2. **Liang H., Maxworthy T.** An experimental investigation of swirling jets // *J. Fluid Mech.* — 2005. — V. 525. — P. 115–159. — DOI: 10.1017/S0022112004002629.
3. **Krikunova A. I.** Premixed methane-air flame under alternate gravity // *Acta Astronaut.* — 2020. — V. 175. — P. 627–634. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.04.054.
4. **Krikunova A. I.** M-shaped flame dynamics // *Phys. Fluids.* — 2019. — V. 31, N 12. — P. 123607. — DOI: 10.1063/1.5129250.
5. **Krikunova A. I.** Effects of gravity on plane-symmetric rod-stabilized flame stabilization // *High Temp.* — 2019. — V. 57, N 3. — P. 430–437. — DOI: 10.1134/S0018151X1903009X.
6. **Krikunova A. I., Son E. E.** Premixed flames under microgravity and normal gravity conditions // *Microgravity Sci. Technol.* — 2018. — V. 30, N 4. — P. 377–382. — DOI: 10.1007/s12217-018-9607-8.
7. **Krikunova A. I., Son E. E.** Gravity impact on inverted conical flame stability and dynamics // *Phys. Fluids.* — 2021. — V. 33, N 12. — P. 123603. — DOI: 10.1063/5.0068660.
8. **Kumagai S., Isoda H.** Combustion of fuel droplets in a falling chamber // *Symp. (Int.) Combust.* — 1957. — V. 6, N 1. — P. 726–731. — DOI: 10.1016/S0082-0784(57)80100-3.
9. **Кривулин В. Н., Кудрявцев Е. А., Баратов А. Н., Павлова В. Л., Федосов Л. Н., Лужецкий В. К., Шленов В. М., Бабкин В. С.** Исследование горения околопредельных газовых смесей в невесомости // *Докл. АН СССР.* — 1979. — Т. 247. — С. 1184–1186.
10. **Ronney P. D., Wachman H. Y.** Effect of gravity on laminar premixed gas combustion I: Flammability limits and burning velocities // *Combust. Flame.* — 1985. — V. 62, N 2. — P. 107–119. — DOI: 10.1016/0010-2180(85)90139-7.
11. **Ronney P. D.** Effect of gravity on laminar premixed gas combustion II: Ignition and extinction phenomena // *Combust. Flame.* — 1985. — V. 62, N 2. — P. 121–133. — DOI: 10.1016/0010-2180(85)90140-3.
12. **Durox D., Baillot F., Scoufflaire P., Prud'homme R.** Some effects of gravity on the behaviour of premixed flames // *Combust. Flame.* — 1990. — V. 82, N 1. — P. 66–74. — DOI: 10.1016/0010-2180(90)90078-6.
13. **Kostiuk L. W., Bray K. N. C., Cheng R. K.** Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams. Part II — Reacting flow field and extinction // *Combust. Flame.* — 1993. — V. 92, N 4. — P. 396–409. — DOI: 10.1016/0010-2180(93)90151-R.
14. **Kostiuk L. W., Cheng R. K.** Imaging of premixed flames in microgravity // *Exp. Fluids.* — 1994. — V. 18, N 1. — P. 59–68. — DOI: 10.1007/BF00209361.
15. **Kostiuk L. W., Cheng R. K.** The coupling of conical wrinkled laminar flames with gravity // *Combust. Flame.* — 1995. — V. 103, N 1-2. — P. 27–40. — DOI: 10.1016/0010-2180(95)00076-I.
16. **Bédard B., Cheng R. K.** Effects of buoyancy on premixed flame stabilization // *Combust. Flame.* — 1996. — V. 107, N 1-2. — P. 13–26. — DOI: 10.1016/0010-2180(96)00050-8.
17. **Cheng R. K., Bédard B., Kostiuk L. W.** Effects of buoyancy on lean premixed V-flames. Part I: Laminar and turbulent flame structures // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 116, N 3. — P. 360–375. — DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00063-7.
18. **Hegde Nyma U., Zhou L., Bahadori M. Y.** The transition to turbulence of microgravity gas jet diffusion flames // *Combust. Sci. Technol.* — 1994. — V. 102, N 1-6. — P. 95–113. — DOI: 10.1080/00102209408935471.
19. **Gotoda H., Maeda K., Ueda T., Cheng R. K.** Periodic motion of a Bunsen flame tip with burner rotation // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 134, N 1-2. — P. 67–79. — DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00082-8.
20. **Gotoda H., Ueda T., Cheng R. K.** Dynamic motion of rotating Bunsen flame tip in microgravity // *AIAA J.* — 2004. — V. 42, N 7. — P. 1485–1489. — DOI: 10.2514/1.2502.
21. **Gotoda H., Shepherd I. G.** Effects of buoyancy on lean premixed flame on a rotating bunsen burner // *Proc. 21st. Int. Colloquium*

- on the Dynamics of Explosions Relative Systems, Poitiers, France, 23–27 July, 2007. — P. 1–4.
22. **Gotoda H., Miyano T., Shepherd I. G.** Dynamic properties of unstable motion of swirling premixed flames generated by a change in gravitational orientation // Phys. Rev. E. — 2010. — V. 81, N 2. — 026211. — DOI: 10.1103/PhysRevE.81.026211.

*Поступила в редакцию 07.11.2022.
Принята к публикации 09.11.2022.*
