УДК 534.222.2

О РОЛИ ЛОКАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В РАЗВИТИИ ГОРЕНИЯ

А. Д. Киверин, И. С. Яковенко

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, yakovenko.ivan@bk.ru

Представлены результаты исследования методами численного моделирования динамики фронта пламени в газообразной реагирующей смеси, в том числе в присутствии взвешенной фазы микрокапель жидкости. Показано, что локальное воздействие на фронт пламени является одним из ведущих факторов, определяющих развитие горения. Так, локальное динамическое воздействие относительно крупных капель на фронт пламени способствует его искривлению, что, в свою очередь, определяет соответствующее локальное ускорение отдельных участков фронта. Дальнейший неустойчивый рост такого рода возмущений ведет к интегральному ускорению пламени. В то же время в обедненных составах локальное растяжение потоком может привести к затуханию горения.

Ключевые слова: горение водорода, газовзвеси, турбулентное горение, численное моделирование, неустойчивость фронта пламени.

DOI 10.15372/FGV20220303

ВВЕДЕНИЕ

Современные вызовы в области энергетики, двигателестроения и обеспечения промышленной безопасности требуют всё более глубокого понимания особенностей сложных газодинамических процессов, сопровождающих горение газовых смесей и газовзвесей. В первую очередь это касается перспективных топливных систем, таких как газовые смеси на основе водорода [1], водонасыщенные газовзвеси и эмульсионные топлива [2–4]. Интерес к этим горючим системам обусловлен необходимостью разработки новых источников энергии, обеспечивающих повышение энергоэффективности и безопасности и снижение выбросов вредных веществ по сравнению с традиционными углеводородными топливами. При этом для разработки новых топлив и их широкого использования на практике необходимо тщательное исследование фундаментальных закономерностей горения, точное определение таких важных характеристик, как нормальная скорость распространения пламени, концентрационные пределы горения, способность к самопроизвольному переходу к детонации и самоподдерживаемому горению в зависимости от условий протекания процесса.

Одной из принципиальных особенностей перспективных топливных систем, включая многофазные топлива, в состав которых поми-

мо газовой фазы входят еще включения капель жидких топлив или воды, является нетривиальный характер развития фронта горения [5]. Главным образом данный аспект горения связан с развитием мелкомасштабной структуры фронта горения, обусловленным присутствием примесей, газодинамическими возмущениями или естественным развитием неустойчивости фронта горения. Так, экспериментально и теоретически показано, что наличие инертных микрочастиц [6] в горючей газовой смеси и микрокапель воды [7] или топлива [8, 9] может привести к существенной интенсификации горения. Механизм влияния примесей на структуру фронта горения во многом схож с тем, который определяет динамику горения перемешанных газовых смесей в турбулентном режиме. Мелкомасштабные вихри воздействуют на фронт горения, обеспечивая его локальную деформацию и растяжение в потоке, что способствует возмущению фронта пламени и общему усилению развития его многомерной структуры [10]. В случае относительно крупных капель и частиц, взвешенных в газовой смеси, их влияние выражается в локальных потерях импульса и энергии газодинамического потока, что также ведет к деформации фронта пламени и интегральному ускорению процесса горения. В предварительно перемешанной газовой смеси, в которой отсутствуют примеси и фоновые газодинамические течения, развитие фронта горения в первую очередь определяется

[©] Киверин А. Д., Яковенко И. С., 2022.

естественной неустойчивостью фронта пламени. Так, особенно интенсивный рост неустойчивости фронта пламени наблюдается, например, в водородно-воздушных смесях обедненного состава или при повышенном давлении [11]. С другой стороны, именно такие составы смесей на основе водорода и условия их сжигания наиболее перспективны в плане снижения эмиссии оксидов азота при использовании в реальных энергетических установках. Этим продиктовано особое внимание к изучению фундаментальных закономерностей горения таких составов. Развитие естественной неустойчивости фронта горения, наряду с внешними факторами, также является механизмом изменения скорости распространения пламени и может быть причиной возникновения неточностей при экспериментальном определении такой фундаментальной характеристики, как ламинарная скорость горения [12]. Таким образом, изучение локальных эффектов, определяющих эволюцию пространственной структуры фронта горения, и их влияния на интегральные характеристики горения газовых смесей и газовзвесей представляет большую важность как для фундаментальной науки, так и для практических задач разработки и эффективного использования новых видов топлива.

Настоящая работа посвящена численному анализу особенностей развития структуры фронта пламени при распространении в изначально покоящихся газовых смесях и при наличии турбулентных течений, а также в газовзвесях на основе водорода с содержанием микрокапель воды. Полученные результаты позволяют в едином ключе обобщить закономерности влияния локальных эффектов на интегральные параметры горения, такие как скорость горения и нижний концентрационный предел распространения пламени.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основу настоящего исследования составили три серии расчетов, посвященных различным факторам развития локальной структуры фронта пламени в обедненных водородновоздушных газовых смесях и газовзвесях:

 – развитие естественной неустойчивости фронта пламени при распространении в открытом канале;

 – влияние микронных капель воды на форму и динамику фронта пламени; – влияние вихревых возмущений на форму и динамику фронта пламени.

Рассматриваемые водородно-воздушные смеси с содержанием водорода ниже стехиометрического характеризуются интенсивным развитием неустойчивости фронта горения. Рост возмущений на фронте пламени обусловлен здесь двумя основными механизмами [13]. Первый связан с газодинамической неустойчивостью фронта пламени, развитие которой происходит в соответствии с теорией Ландау — Дарье [14]. Второй механизм обусловлен конкуренцией диффузионных потоков компонентов смеси и потока тепла. Преобладание одних процессов переноса над другими может стать причиной как развития неустойчивости, так и стабилизации фронта горения в зависимости от числа Льюиса смеси [15]. В бедных водородно-воздушных смесях число Льюиса меньше единицы и диффузионный поток недостающего реагента в зону горения больше оттока тепла от зоны горения к свежей смеси. В результате фронт пламени становится подвержен дополнительному влиянию термодиффузионной неустойчивости. Неустойчивости газодинамической и термодиффузионной природы определяют в совокупности рост локальных деформаций фронта горения в ходе его естественного распространения.

Численное моделирование проводилось в двумерной постановке путем решения полной системы уравнений Навье — Стокса с учетом вязкости, теплопроводности, многокомпонентной диффузии и химических превращений [16]. Ввиду малой химической активности рассматриваемых обедненных составов и относительно слабой интенсивности процессов горения, для упрощения поиска решения было использовано приближение малой сжимаемости [17]. Для численного решения уравнений физико-математической модели применялся алгоритм, предложенный в работе [18]. Во всех рассматриваемых расчетах для моделирования химической кинетики была использована детальная схема окисления водорода, состоящая из 19 реакций между 8 химически активными компонентами [19], которая обеспечивала воспроизведение основных параметров горения водородно-воздушных смесей с высокой степенью точности в широком диапазоне составов, в том числе вблизи нижнего концентрационного предела [20]. В случае турбулентного течения для моделирования развитой изотропной турбулентности использовалась модель, предложенная в [21], в рамках которой в каждой расчетной ячейке задается развивающееся во времени стохастическое возмущение скорости газа, моделируемое как винеровский случайный процесс с единичной дисперсией и нулевым математическим ожиданием. Как показано в [21], данный подход обеспечивает корректный закон диффузии газодинамических возмущений. При наличии в потоке мелкодисперсных капель воды в несущей газовой фазе применялась лагранжева модель для описания динамики индивидуальных капель с учетом их нагрева, испарения и межфазного взаимодействия [18].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Развитие неустойчивости фронта пламени в открытом канале

Рассмотрим особенности эволюции фронта пламени при распространении пламени в открытом канале с гладкими стенками при подаче свежей смеси через открытый конец канала навстречу движению фронта. Скорость потока свежей смеси u_{in} задавалась равной нормальной скорости горения смеси $S_{l,1D}$, определенной из предварительных расчетов динамики одномерного плоского пламени. Схема вычислительного эксперимента приведена на рис. 1. Для исследования особенностей развития структуры фронта зададим начальное возмущение фронта по гармоническому закону

$$x_f(y) = A_0 \cos\left(2\pi n\left(\frac{y}{H} - \frac{1}{2}\right)\right).$$



Гладкая адиабатическая стенка

Рис. 1. Постановка задачи о развитии естественной неустойчивости фронта горения обедненного водородно-воздушного пламени в открытом канале

Начальная стадия развития процесса в данной постановке характеризуется экспоненциальным ростом гармоник на фронте пламени. При этом существует критическая длина волны начального возмущения λ_{cr} , для которой инкремент нарастания амплитуды гармоники является максимальным. На рис. 2 представлена зависимость критической длины волны от состава смеси. Как видно из графика, с уменьшением количества топлива критическая длина волны убывает, что свидетельствует о преимущественной генерации мелкомасштабных возмущений на фронте горения при уменьшении содержания водорода в смеси. Важно отметить, что в дальнейшем динамика развития структуры фронта пламени переходит на нелинейную стадию, в ходе которой происходит взаимодействие возмущений, и на фронте могут возникать более крупные моды.

Важным аспектом динамики поверхности фронта горения является зависимость скорости распространения пламени от площади его поверхности. Путем варьирования ширины канала были получены кривые, описывающие зависимость скорости распространения пламени по отношению к свежей смеси $S_l = u_{f,l} + S_{l,1D}$ от площади его поверхности P_f (рис. 3) ($u_{f,l}$ скорость фронта горения в лабораторной системе отсчета). Под скоростью фронта горения имеется в виду производная от средней координаты фронта по времени: $u_{f,l} = \frac{d\langle x_f \rangle}{dt}$, где $\langle x_f \rangle$ определяется как сумма координат x_f точек фронта горения, осредненных по ширине



Рис. 2. Зависимость критической длины волны от молярной доли горючего в смеси



Рис. 3. Зависимость скорости распространения пламени S_l , отнесенной к нормальной скорости горения $S_{l,1D}$, от площади поверхности пламени P_f , нормированной на ширину канала H, в смеси 12 % H_2 + воздух

канала:
$$\langle x_f
angle = rac{1}{H} \int\limits_{H} x_f(y) dy = rac{1}{H} \sum\limits_{Ny} x_{f,j} \Delta y.$$

Из полученных результатов видно, что вблизи стехиометрического состава влияние развития поверхности фронта горения на скорость его распространения описывается зависимостью, близкой к линейной. В то же время при уменьшении содержания водорода в смеси данная зависимость имеет выраженный нелинейный характер в случае малых площадей поверхности. В результате для обедненных смесей даже при малом увеличении площади поверхности относительно площади плоского фронта наблюдается резкое увеличение скорости его распространения. Данные результаты имеют первостепенную важность для анализа процессов горения обедненных смесей в турбулентных потоках и могут быть использованы для разработки соответствующих подсеточных моделей горения.

2.2. Горение смесей водорода с воздухом в турбулентной среде

Развитие горения в турбулентных потоках представляет большой интерес для широкого круга прикладных задач использования газовых смесей в качестве топлива и обеспечения безопасности технологических процессов. В отличие от идеализированной постановки, рассмотренной выше, в ходе работы реальных технических систем горение развивается

на фоне сложных течений, в том числе турбулентных, характеризуемых широким спектром вихревых возмущений, существенным образом влияющих на топологию поверхности очага горения. Помимо развития естественной неустойчивости, фронт горения в данном случае подвержен воздействию мелкомасштабных газодинамических течений, оказывающих локальные растягивающие и деформирующие воздействия на поверхность фронта горения. Для анализа эволюции поверхности фронта горения в присутствии турбулентных возмущений примем следующую постановку задачи. Будем рассматривать развитие процесса горения в двумерной квадратной области, заполненной обедненной водородно-воздушной смесью, на фоне развитого турбулентного течения, искусственно генерируемого по модели, предложенной в работе [21] и использованной в работе [10]. Горение инициируется в центре области, после чего формируется расходящийся очаг пламени. Для нахождения турбулентной скорости распространения пламени uf отслеживалась динамика увеличения площади продуктов горения. На рис. 4 представлены хронограммы скорости горения в смесях 10 % Н₂ + воздух при развитии горения на фоне турбулентных течений с амплитудой пульсаций u', задаваемой в диапазоне $2 \div 12$ м/с. При $u' = 2 \div 9$ м/с пла-



Рис. 4. Хронограммы скорости роста очага горения в смеси 10 % H₂ + воздух:

I — пламя с сильно искривленным фронтом, u' = 4 м/c; II — режим с потерей связности фронта, u' = 9.7 м/c; III — режим с затуханием горения в турбулентном потоке, u' = 11.6 м/c; светлый кружок — момент времени полного сгорания смеси в расчетной области, темный — момент времени затухания очага

мя распространяется изотропно и со временем охватывает всю расчетную область (режим I на рис. 4). Ламинарная скорость горения смеси 10 % H₂ + воздух составляет ≈ 20 см/с, однако мелкомасштабные деформации, генерируемые на поверхности фронта горения, существенно увеличивают эффективную площадь очага и в результате интенсифицируют скорость его распространения, аналогично тому, как это происходит при развитии естественной неустойчивости фронта горения, рассмотренном выше. Топология поверхности фронта горения в этом случае может быть отнесена к сильно искривленному пламени в соответствии с диаграммой режимов турбулентного горения, предложенной в [22]. При этом, несмотря на то, что турбулентные пульсации существенно превышают ламинарную скорость горения смеси, локальные растяжения фронта горения не приводят к нарушению связности очага и его структура остается замкнутой.

В диапазоне $u' \leq 9 \div 10$ м/с реализуется режим горения с нарушением связности исходного очага и отрывом от него отдельных вторичных очагов (режим II на рис. 4). Здесь к нарушению связности очага приводят локальные растяжения фронта на фоне меньшей химической активности смеси и более низкой скорости горения. При этом, однако, горение продолжается в форме отдельных устойчивых очагов пламени. Стоит отметить, что в этом режиме разрыв очагов сопровождается скачками скорости, связанными с резким увеличением общей площади поверхности образующихся очагов.

Увеличение амплитуды пульсаций до u' =11 м/с и выше ведет к формированию режима с затуханием горения ввиду интенсивного распада очагов на более мелкие и неспособности данных вторичных очагов к самоподдерживаемому горению в условиях турбулентного течения (режим III на рис. 4). Важно отметить, что увеличение амплитуды пульсаций потока вплоть до критического значения, при котором происходит распад единого очага на несколько вторичных (режим II на рис. 4), ведет к ускорению процесса горения, как это было показано ранее в экспериментальной работе [23]. Таким образом, механизм интенсификации горения путем локального воздействия на поверхность фронта пламени ограничен лишь способностью фронта горения выдерживать соответствующие растяжения без нарушения связности его поверхности. Аналогичный механизм погасания пламени также наблюдается в случае развития горения составов вблизи концентрационного предела горения в условиях земной гравитации, где растяжение фронта пламени обусловлено формированием конвективных вихревых течений при подъеме очага под действием сил плавучести [24].

2.3. Горение обедненной смеси водорода с воздухом в присутствии микрокапель воды

В рассмотренных выше сценариях развития горения первоочередную роль играют механизмы, обеспечивающие увеличение поверхности фронта горения. Аналогичный сценарий интенсификации сгорания смеси может быть продемонстрирован на примере горения газовзвесей с содержанием взвешенных микрокапель или микрочастиц. Рассмотрим следующую постановку задачи. В центре замкнутой двумерной области в форме круга, заполненной обедненной водородно-воздушной смесью с содержанием водорода 15 %, инициировано воспламенение. В начальный момент времени в области задано распределение микрокапель воды в виде регулярного массива, характеризуемого расстоянием D между соседними каплями. Будем рассматривать капли диаметром $50 \div 200$ мкм, начальное расстояние между ними $D = 600 \div 3\,000$ мкм. По мере развития расходящегося пламени фронт горения взаимодействует с каплями воды, тем самым осуществляется локальное воздействие капель на поверхность пламени. Капли при этом играют роль препятствий, отбирающих импульс потока и энергию на испарение. На рис. 5 представлены хронограммы изменения площади продуктов горения S_{pr} и давления p в зависимости от размера капель. Интенсивность горения усиливается в случае присутствия в смеси капель воды во всем рассмотренном диапазоне их размеров. При этом наиболее сильный эффект оказывают капли большего размера. Это связано с механизмом локального влияния капель на структуру фронта горения. Крупные капли характеризуются большой инерцией, что определяет более высокие потери импульса газодинамического потока, формируемого перед фронтом расходящегося пламени. При этом крупные капли не успевают испариться в масштабах зоны энерговыделения, и эффекты, связанные с потерями энергии на испарение и разбавление смеси инертными парами воды, проявляются



Рис. 5. Временные зависимости площади продуктов горения (*a*) и давления (*б*) в камере, заполненной смесью 15 % H_2 + воздух с микрокаплями воды разного диаметра при начальном расстоянии между каплями D =1 250 мкм:

 $1-d_p=50$ мкм, 2-100мкм, 3-200мкм, 4-данные для чистой смеси водорода с воздухом

в основном в области продуктов горения. Таким образом, фронт пламени огибает крупные капли, что ведет к его локальной деформации, по аналогии с влиянием неподвижных препятствий [25]. При уменьшении размеров капель роль эффектов, связанных с потерями импульса, снижается, в то время как скорость испарения увеличивается. В результате более мелкие капли уже не оказывают интенсифицирующего влияния на горение и при дальнейшем уменьшении размеров при фиксированной массе распыленной жидкости становятся причиной разбавления смеси и теплопотерь в масштабах фронта горения, что в конечном итоге определяет ингибирующий эффект присутствия капель воды в смеси. Исходя из представ-



Рис. 6. Временные зависимости площади продуктов горения (*a*) и давления (*б*) в камере, заполненной смесью 15 % H_2 + воздух с микрокаплями воды диаметром $d_p = 200$ мкм при разных начальных расстояниях между каплями:

1 - D = 600 мкм, 2 - 800 мкм, 3 - 1250 мкм, 4 -данные для чистой смеси водорода с воздухом

ленных результатов присутствие капель оказывает двоякое влияние на процесс горения. С одной стороны, в случае крупных размеров капли определяют локальные деформации поверхности фронта горения, что ведет к увеличению общей площади и интегральному ускорению горения смеси по рассмотренным выше механизмам. С другой стороны, мелкие капли за счет потерь тепла на испарение и разбавление свежей смеси водяным паром оказывают ингибирующее воздействие и могут быть причиной локального или полного погасания пламени.

В соответствии с механизмом интенсификации горения путем насыщения фронта пламени локальными деформациями, влияние капель должно меняться с изменением начального расстояния между ними. На рис. 6 представлены кривые роста площади продуктов горения и давления в камере со временем в зависимости от начального расстояния D между крупными каплями диаметром $d_p = 200$ мкм. Из анализа данных временных зависимостей можно отметить, что наиболее сильно горение интенсифицируется при начальном расстоянии между каплями D = 800 мкм. Этот эффект обусловлен тем, что при данном начальном расстоянии между каплями локальное воздействие капель на фронт горения преимущественно возбуждает гармонику наиболее быстро растущей моды естественной неустойчивости поверхности фронта пламени. В результате развитие поверхности фронта происходит существенно быстрее, чем при других значениях начального расстояния между каплями, что в конечном итоге определяет общую интенсификацию горения. Выявленные закономерности горения газовзвесей играют первостепенную роль как для решения задач обеспечения пожарной безопасности, так и для выявления механизмов горения водонасыщенных и эмульсионных топлив. Так, именно локальное воздействие капель воды и топлива на фронт горения обусловливает нестационарный характер высокоскоростного горения таких перспективных видов топлива, как вспененные эмульсии [26] и микропены на водной основе [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с общих позиций рассмотрены и систематизированы проявления локальных эффектов при развитии процесса горения покоящихся и турбулентных газовых смесей и газовзвесей на основе водорода. Показано, что во всех рассмотренных сценариях развития горения, независимо от природы воздействия, локальные деформации поверхности фронта горения могут стать причиной более быстрого сгорания смеси. Влияние деформаций поверхности фронта пламени не является одинаковым и наиболее ярко выражено для водородновоздушных смесей с малым содержанием горючего. При этом, однако, у данного механизма существуют ограничения, обусловленные особенностями протекания процесса. Так, газодинамическое воздействие высокой интенсивности может служить причиной потери связанности очага горения и его последующего погасания, в то время как локальное влияние мик-

рокапель существенно зависит от их размера: присутствие в смеси относительно крупных капель оказывает интенсифицирующий эффект, в то время как более мелкие могут способствовать ингибированию горения. Представленные результаты имеют первостепенную важность для широкого круга фундаментальных и прикладных задач, в том числе задач определения нормальной скорости горения, разработки перспективных топлив и выявления механизмов их горения, создания надежных систем пожаротушения. При формулировании математических моделей и постановок задач для решения конкретных вопросов в области энергетики и безопасности следует явным образом учитывать особенности локального поведения фронта пламени, связанные с описанными в работе механизмами. При этом используемые в настоящей работе подходы к прямому численному моделированию горения могут быть использованы для определения конкретного вида элементов модели в полномасштабных расчетах. В отличие от существующих интегральных моделей, такой подход, учитывающий детали нестационарного развития горения, обеспечит более высокую степень точности расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Васильев А. А., Васильев В. А. Многотопливные системы: метан — водород — водяной пар // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 1. — С. 17–26. — DOI: 10.15372/FGV20210102.
- Простов В. Н., Яковлев А. В., Гладких В. А. Воспламенение водно-топливных эмульсий // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 5. — С. 9–14.
- Pinchuk V. A., Sharabura T. A., Kuzmin A. V. The effect of water phase content in coal-water fuel on regularities of the fuel ignition and combustion // Fuel Process. Technol. — 2019. — V. 191. — P. 129–137. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.04.011.
- Egorov R. I., Antonov D. V., Valiullin T. R., Strizhak P. A. The ignition dynamics of the water-filled fuel compositions // Fuel Process. Technol. — 2018. — V. 174. — P. 26–32. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.02.003.
- Hayashi S., Kumagai S., Sakai T. Propagation velocity and structure of flames in dropletvapor-air mixtures // Combust. Sci. Technol. — 1977. — V. 15, N 5-6. — P. 169–177. — DOI: 10.1080/00102207708946782.
- 6. Gieras M. Flame acceleration due to water droplets action // J. Loss Prev. Process Ind. —

2008. — V. 21, N 4. — P. 472–477. — DOI: 10.1016/j.jlp.2008.03.004.

- Yakovenko I. S., Kiverin A. D. Intensification mechanisms of the lean hydrogen—air combustion via addition of suspended microdroplets of water // Int. J. Hydrogen Energy. — 2021. — V. 46, N 1. — P. 1259–1272. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.234.
- Nomura H., Kawasumi I., Ujiie Y., Sato J. Effects of pressure on flame propagation in a premixture containing fine fuel droplets // Proc. Combust. Inst. — 2007. — V. 31, N 2. — P. 2133– 2140. — DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.036.
- 9. Nicoli C., Haldenwang P., Denet B. Darrieus–Landau instability of premixed flames enhanced by fuel droplets // Combust. Theory Model. — 2017. — V. 21, N 4. — P. 630–645. — DOI: 10.1080/13647830.2017.1279756.
- Бетев А. С., Киверин А. Д., Медведев С. П., Яковенко И. С. Численное моделирование турбулентных режимов горения водорода вблизи обедненного предела // Хим. физика. — 2020. — Т. 39, № 12. — С. 17–23. — DOI: 10.31857/S0207401X2012002X.
- Sun Z-Y., Liu F-S., Bao X-C., Liu X-H. Research on cellular instabilities in outwardly propagating spherical hydrogen-air flames // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37, N 9. P. 7889–7899. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.011.
- Bradley D., Lawes M., Liu K., Verhelst S., Woolley R. Laminar burning velocities of lean hydrogen air mixtures at pressures up to 1.0 MPa // Combust. Flame. 2007. V. 149, N 1-2. P. 162–172. DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.12.002.
- 13. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2007. — V. 39. — P. 163–191. — DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092153.
- Ландау Л. Д. К теории медленного горения // ЖЭТФ. — 1944. — Т. 14. — С. 240; Аста Phys.-Chim. URSS. — 1944. — V. 19, iss. 1. — Р. 77–85.
- 15. Баренблатт Г. И., Зельдович Я. Б., Истратов А. Г. О диффузионно-тепловой устойчивости ламинарного пламени // ПМТФ. — 1962. — №. 4. — С. 21–26.
- Kuo K. Principles of Combustion. Hoboken; New Jersey: Wiley InterScience, 2005.
- 17. Yakovenko I. S., Ivanov M. F., Kiverin A. D., Melnikova K. S. Large-scale flame structures in ultra-lean hydrogen-air mixtures // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43, N 3. P. 1894–1901. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.138.
- 18. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., Vanella M. Fire Dynamics Simulator

Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model // Tech. Rep. NIST Special Publ. 1018-1. — U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2013. — DOI: 10.6028/NIST.SP.1018.

- Kéromnès A., Metcalfe W. K., Heufer K. A., et al. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures // Combust. Flame. 2013. V. 160, N 6. P. 995–1011. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.01.001.
- Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Melnikova K. S. On the structure and stability of ultra-lean flames // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — V. 1147. — 012048. — DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012048.
- Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Шевелкина Е. Д. Эволюция вихревых возмущений на различных стадиях турбулентных течений // Инж. журн.: наука и инновация. 2013. Т. 8, № 20. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-8-870.
- Borghi R. On the structure and morphology of turbulent premixed flames // Recent Advances in the Aerospace Sciences / C. Casci, C. Bruno (Eds). — Boston, MA: Springer, 1985. — P. 117– 138.
- Карпов В. П., Соколик А. С. Пределы воспламенения в турбулизированных газовых смесях // Докл. АН СССР. 1961. Т. 141, № 2. С. 393–396.
- 24. Yakovenko I., Kiverin A., Melnikova K. Ultra-lean gaseous flames in terrestrial gravity conditions // Fluids. — 2021. — V. 6, N 1. — P. 1–21. — DOI: 10.3390/fluids6010021.
- 25. Ogawa T., Gamezo V. N., Oran E. S. Flame acceleration and transition to detonation in an array of square obstacles // J. Loss Prev. Process Ind. — 2013. — V. 26, N 2. — P. 355–362. — DOI: 10.1016/j.jlp.2011.12.009.
- Kichatov B., Korshunov A., Gubernov V., Kiverin A., Yakovenko I. Combustion of heptane-in-water emulsion foamed with hydrogen-oxygen mixture // Fuel Process Technol. — 2020. — V. 198. — 106230. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106230.
- Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Combustion of hydrogen-oxygen microfoam on the water base // Int. J. Hydrogen Energy. — 2017. — V. 42, N 26. — P. 16866–16876. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.141.

Поступила в редакцию 14.01.2022. Принята к публикации 28.02.2022.