

УДК 533.17, 544.45

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ВОДОРОДА С ВОЗДУХОМ И ЕГО ГОРЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЙ СТРУЙНОЙ ПОДАЧЕ В КАМЕРУ СГОРАНИЯ МАЛОГО ОБЪЕМА

© 2024 г. А. Е. Смыгалина*, А. Д. Киверин

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия***E-mail: smygalina-anna@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.11.2023 г.

После доработки 14.02.2024 г.

Принята к публикации 14.02.2024 г.

В работе проведено численное моделирование процесса перемешивания водорода с воздухом и последующее его горение при прямой струйной подаче водорода и его воспламенении от стороннего источника. Импульсное струйное течение моделируется с помощью камеры высокого давления, где водород хранится изначально при давлении до 700 атм. Истечение водорода реализуется через систему клапанов, количество которых варьируется от одного до шести. Время подачи водорода рассчитывается, исходя из оценки содержания водорода в камере сгорания, соответствующего стехиометрическому соотношению компонентов водородно-воздушной смеси. Размеры камеры сгорания выбраны соответствующими размерам камеры сгорания малогабаритного газопоршневого двигателя. Таким образом моделируется процесс прямой подачи водорода в камеру сгорания. В серии расчетов воспламенение осуществляется на разных стадиях перемешивания, что позволяет оценить эффективность работы системы прямой подачи водорода, включая полноту сгорания подаваемого в камеру сгорания топлива. Показано, что наиболее быстро перемешивание осуществляется при подаче водорода через систему из шести щелей, при этом время перемешивания составляет около 25 мс. Последующее воспламенение приводит к сгоранию водородно-воздушной смеси за время порядка 1 мс, степень недогорания водорода составляет 9.5%.

DOI: 10.31857/S0040364424020185

ВВЕДЕНИЕ

Использование водорода как газообразного топлива в настоящее время широко рассматривается в применении к двигателям различных типов, в частности, к двигателям внутреннего сгорания, работающим как на традиционных топливах с примесями водорода [1–3], так и на водороде как основном топливе [4–12]. При оптимизации работы двигателя необходимо учитывать все технологические процессы, такие как подача топлива (водорода), его перемешивание с окислителем (воздухом) [13, 14], воспламенение [15] и сгорание [16]. Основными целями оптимизации водородных двигателей являются обеспечение отсутствия нештатных режимов горения водорода, исключение из конструкции двигателя дополнительных устройств подачи топлива (в этом случае перспективной является прямая подача топлива [4–12]), как можно более совершенное перемешивание водородно-воздушной смеси и полное сгорание водорода [13].

Обзор литературы показывает, что в настоящее время активно разрабатываются устройства с прямой подачей газообразного водорода [4–12]. При

этом разработка таких устройств сопровождается оценкой перемешивания водорода с воздухом [4–8, 12]. В большинстве работ рассматриваются подходы по использованию бедных смесей водорода с воздухом для работы двигателя. В [4] в экспериментах и численном моделировании осуществлялась прямая подача газообразного водорода в цилиндр двигателя в процессе такта сжатия. Отмечается, что такой подход приводит к более высокому КПД двигателя и уменьшает риск обратной вспышки и предварительного воспламенения. При этом давление впрыска достигало 100 атм и впрыск происходил через форсунку с одним отверстием. Сравнивались расчетные и экспериментальные поля мольной доли водорода на разных этапах формирования горючей смеси. В [5] анализировался процесс впрыска водорода в судовом двигателе с искровым зажиганием с диаметром 390 мм и ходом поршня 550 мм. Давление впрыска варьировалось вплоть до 630 атм (при этом значении длительность впрыска соответствует 10° угла поворота коленчатого вала, а диаметр сопла впрыска составляет 2 мм). В работе сделан вывод о целесообразности использования

давления впрыска 300 атм, длительности впрыска, соответствующей 10° угла поворота коленчатого вала, и диаметра сопла впрыска 2.8 мм для обеспечения наибольшей степени гомогенности состава топливно-воздушной смеси непосредственно перед срабатыванием системы зажигания. Экспериментально-теоретическое исследование [6] посвящено подготовке смеси в двигателе с искровым зажиганием. Использовалась форсунка с одним отверстием, а давление впрыска составляло 100 атм. Диаметр цилиндра и ход поршня равны 92 и 85 мм соответственно. Получены поля мольной доли водорода в процессе впрыска и сжатия смеси. Проводится сопоставление расчетов с разной геометрией сопла.

В [7] представлен численный анализ формирования водородно-воздушной смеси в процессе впрыска и последующего горения смеси в двигателе с искровым зажиганием. Использовался цилиндр большого диаметра (137.2 мм) с ходом поршня 171.4 мм. Давление впрыска составляло 20 атм. Варьировались моменты времени начала впрыска и поджига. В результате отмечено, что время впрыска сильно влияет на степень однородности смеси: при запаздывающем впрыске имеет место большая неоднородность состава смеси в камере сгорания. В [8] представлены экспериментальные данные по горению водорода в двигателе большой мощности, а также результаты численного моделирования основных процессов в водородном двигателе: искрового поджига, распространения пламени, самовоспламенения и образования NO_x . Рассмотрены как прямая, так и распределенная подачи топлива. Сделан вывод о том, что для системы с прямой подачей топлива необходимо оптимизировать процесс формирования топливно-воздушной смеси и сократить теплотери в стенки камеры сгорания для повышения КПД.

В экспериментальной работе [9] водород впрыскивается под давлением 50 либо 70 атм в цилиндр в процессе такта сжатия. Исследуется влияние времени впрыска топлива и давления впрыска на эффективность работы двигателя. Получен максимальный крутящий момент 142.7 Нм для случая горения богатой смеси вблизи стехиометрического соотношения. В [10] экспериментально исследовано влияние угловой скорости вращения коленчатого вала, нагрузки двигателя, эквивалентного соотношения, угла опережения зажигания и времени начала впрыска на циклические колебания в процессе работы двигателя на водороде. Указано, что прямая подача топлива обеспечивает высокий термический КПД, а также ограничивает или сокращает появление нештатных режимов горения. В [11, 12] исследования проведены для режимов работы двигателя на бедных [11] и ультра-бедных [12] смесях водо-

рода с воздухом. При этом в экспериментах [11] и численных расчетах [12] используются близкие параметры: давление впрыска — 50–150 атм, впрыск через сопло с одним отверстием, диаметр цилиндра и ход поршня — 82 и 93.2 мм, 83 и 92 мм (значения диаметра и хода можно назвать типичными: во многих работах эти величины близки к указанным). В [12] получены поля мольной доли водорода при струйной подаче водорода и формировании его смеси с воздухом.

Отдельно следует отметить подход микроперемешивания при прямой подаче топлива в камеру сгорания [17]. В настоящее время этот подход в большей мере рассматривается применительно к газотурбинным энергетическим установкам [18, 19], но следует ожидать, что реализация такой системы может оказаться продуктивной и применительно к поршневым двигателям. Подход микроперемешивания заключается в том, что прямая подача топлива осуществляется через систему распределенных в пространстве форсунок. При реализации таких условий приготовление топливно-воздушной смеси происходит в области взаимодействующих друг с другом микроструй, что способствует улучшению степени гомогенности получаемой топливно-воздушной смеси. Осуществление многоканального впрыска газообразного топлива (водорода) в камеру сгорания может быть реализовано посредством аккумуляторной топливной системы [20]. При этом в качестве источника можно использовать современные баллоны для хранения сжатого водорода, давление в которых на сегодняшний день достигает 700 атм [21]. Описанная здесь система прямой подачи водорода в камеру сгорания представляется весьма перспективной, и с учетом этого основной целью настоящего исследования ставится изучение особенностей процессов перемешивания и сгорания водорода в воздухе при прямой его подаче в камеру сгорания посредством серии разнесенных в пространстве импульсных струй.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Методами численного моделирования исследуется впрыск топлива непосредственно из камеры высокого давления, где хранится газообразный водород под давлением 700 атм, через систему клапанов в камеру сгорания, размеры которой соответствуют камере малогабаритного поршневого двигателя. Численное моделирование проводится в двумерной постановке в декартовых координатах. В камеру поступает количество водорода, необходимое для образования стехиометрической смеси с содержащимся в камере воздухом. Для разных конфигураций клапанов время поступления водорода в камеру

различно. Размеры камеры не изменяются в ходе расчетов, так как предполагается, что впуск происходит в момент достижения поршнем верхней мертвой точки, т.е. именно в камеру сгорания.

Решение данной задачи проводится с помощью математической модели, которая представляет собой систему уравнений газодинамики Навье—Стокса с учетом процессов молекулярного переноса: вязкости, теплопроводности, диффузии. Кроме того, в модели учитывается процесс химического превращения, согласно детальному механизму окисления водорода [22], в котором принимают участие восемь химических компонентов: H_2 , O_2 , H_2O , H , O , OH , HO_2 , H_2O_2 . Окисление азота воздуха не рассматривается, N_2 учитывается лишь как третий компонент в трехчастичных реакциях. Система уравнений газодинамики с учетом указанных процессов записывается в традиционном виде и представлена в [23].

Численное решение системы уравнений газодинамики проводится модифицированным методом “крупных частиц” второго порядка точности по пространству и первого порядка точности по времени, описанным в [24] и успешно применяемым авторами для решения различных задач газодинамики горения водорода: от моделирования горения в двигателе с искровым зажиганием [25, 26] до перехода горения в детонацию [27] и самовоспламенения водорода при его струйном истечении в воздух [23, 28, 29]. Отметим, что используемая модель и реализующий ее численный метод воспроизводят все особенности эволюции течения без введения дополнительных подсеточных моделей турбулентности. Так, в работе [30], где с применением используемой в настоящей работе модели и вычислительного метода анализировалась эволюция пульсаций скорости в двухмерном расчете сжатия газа под поршнем, расчеты показали удовлетворительное согласие с экспериментом [31], в том числе в отношении неочевидных особенностей в эволюции пульсаций скорости. Также следует отметить, что особенностью постановки задачи, рассматриваемой в настоящей работе, является использование подробных расчетных сеток, позволяющих разрешать мелкомасштабные структуры порядка ширины фронта пламени. В связи с этим для разрешения мелкомасштабной структуры течения не требуется использование подсеточных моделей турбулентности.

Основной задачей настоящего исследования ставилось изучение на качественном уровне особенностей эволюции течения в камере сгорания при прямой подаче водорода и последующем его воспламенении. При этом решено ограничиться плоской двумерной постановкой задачи в декартовых координатах (x, z) . В рамках исследования рассмотрено несколько конфигураций, отличающихся друг от друга количеством, размером

и расположением щелей, через которые поступает водород. При этом в плоской двумерной постановке задачи отношение ширины щелей соответствует отношению их площадей, что значительно упрощает параметрический анализ решения. Все четыре варианта расчетных областей представлены на рис. 1. Во всех случаях расчетная область разделена жесткой перфорированной стенкой толщиной 1 мм на камеру высокого давления (КВД) и камеру сгорания (КС). В начальный момент времени КВД заполнена неподвижным водородом под давлением 700 атм при температуре 300 К, а камера сгорания — неподвижным воздухом при нормальных условиях (1 атм, 300 К). При условии неизменных размеров расчетной области моделируются следующие процессы: 1) истечение водорода из КВД в КС при открытых щелях; 2) перемешивание водорода в КС при закрытых щелях; 3) поджиг смеси в КС и ее сгорание также при закрытых щелях. Предполагается, что процесс перемешивания, а также сгорание происходят достаточно быстро, так что истечение осуществляется в камеру сгорания, имеющую малые и не изменяющиеся в ходе всех процессов размеры (ширина — 50.0, высота — 20.0 мм). Нижняя граница расчетной области соответствует плоскости симметрии. С учетом этого рассматривались следующие конфигурации щелей, выполняющих функции клапанов: одна щель, расположенная посередине стенки, полушириной 0.5 мм (рис. 1а); две щели по 1 мм шириной, расположенные симметрично относительно плоскости симметрии (рис. 1б); три щели шириной 0.7, 0.6, 0.7 мм (рис. 1в); шесть щелей по 0.3 мм шириной (рис. 1г). Таким образом, суммарная ширина щелей составляет 1.0 для варианта на рис. 1а и около 2.0 мм для вариантов на рис. 1б—1г. Размеры и расстояние между щелями выбирались такими, чтобы при впуске водорода под высоким давлением в воздух не происходило самовоспламенения. При моделировании в качестве ориентира использовалась работа [28], однако в настоящем исследовании истечение осуществляется за малый отрезок времени, так что параметры из [28] заведомо обеспечивают отсутствие самовоспламенения, тогда как в [28] истечение происходило неограниченное время и такие условия создавались.

Расчеты выполнялись в следующей последовательности. После впуска водорода в количестве, необходимом для образования стехиометрической смеси его с находящимся в КС воздухом, щели мгновенно закрывались. Далее происходило перемешивание. После этого осуществлялся искровой поджиг в различные моменты времени, т.е. на разных стадиях перемешивания. Такая постановка задачи представляет в первую очередь

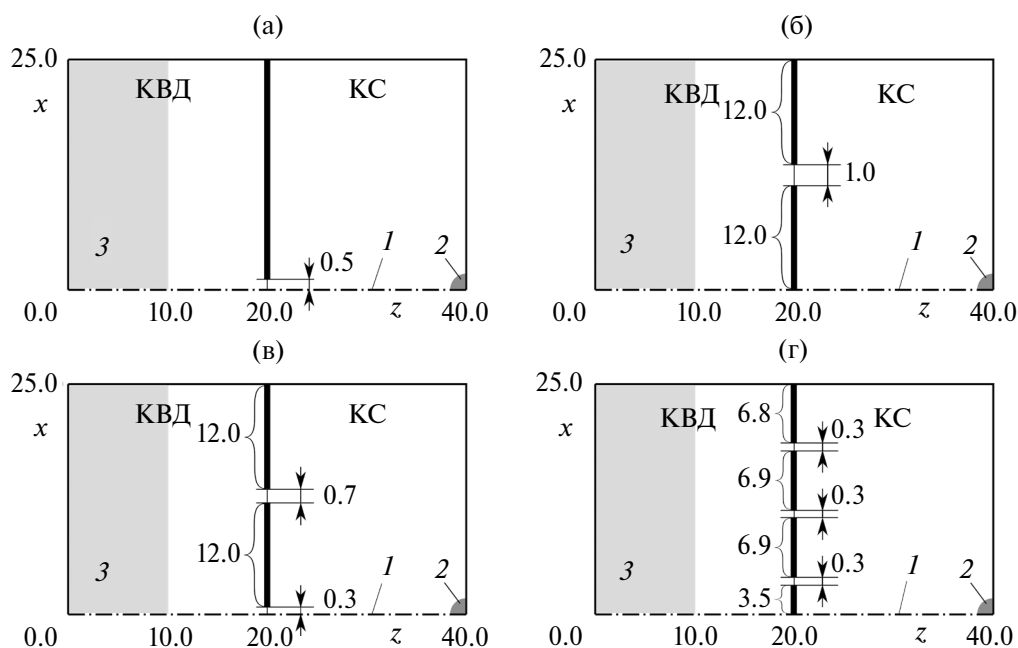


Рис. 1. Расчетная область, разделенная стенкой с щелями на КВД и КС; 1 – плоскость симметрии, 2 – положение искры, 3 – область с грубой сеткой.

интерес для анализа степени недогорания при сжигании горючих смесей разной степени перемешанности. Искровой поджиг моделировался как вклад в течение 12 мкс дополнительной энергии, составляющей 23 Дж/м, в малой области в форме четверти круга радиусом 4.0 мм, располагающейся в центре стенки, противоположной стенке с щелями (рис. 1). Основным критерием выбора параметров модельного источника зажигания являлось устойчивое воспламенение смеси и дальнейшее распространение горения в объеме камеры сгорания. При этом интенсивность источника воспламенения и суммарная вложенная энергия заведомо превышают критические значения, необходимые для инициирования горения в стехиометрической водородно-воздушной смеси. Это, однако, оправдано в виду целесообразности использования единой модели источника для инициирования горения во всех рассмотренных случаях, включая случаи существенно неоднородного распределения водорода в объеме камеры сгорания, когда срабатывание искры может происходить в области обедненной смеси. Принятая модель зажигания с заданными параметрами использовалась ранее и хорошо зарекомендовала себя в работах авторов по моделированию горения околостехиометрических смесей водорода с воздухом в двигателе с искровым зажиганием.

Крайне важно оценить, допустимо ли для описания исследуемых процессов впрыска и сгорания водорода использовать выбранный механизм химической кинетики [22]. В рамках принятой постановки задачи избыточное давление внутри камеры сгорания при подаче заданной массы

водорода меняется в пределах 40% от нормального, что лежит в диапазоне верификации кинетической модели [22]. Ранее в [25] проводилось моделирование горения в двигателе с искровым зажиганием водородно-воздушных смесей с использованием механизма [22]. Удовлетворительное согласие рассчитанных и экспериментально полученных индикаторных диаграмм позволяет допустить уместность использования этого механизма и при решении поставленной здесь задачи.

Вся расчетная область для каждой конфигурации щелей (рис. 1) разделена на область с грубой сеткой – 200 мкм (серые области на рис. 1), и область с мелкой сеткой – 100 мкм (белые области на рис. 1). Наибольший интерес представляют процессы, протекающие в камере сгорания, поэтому в левой части КВД задана грубая сетка. Полагается, что размер сетки 100 мкм является достаточным для получения достоверных результатов при моделировании впуска водорода под высоким давлением в КС, его перемешивания и сгорания при искровом поджиге. Ранее в [26] шаг 100 мкм был использован при моделировании горения околостехиометрических составов водорода с воздухом в цилиндре двигателя с искровым зажиганием. Аналогично [26] в данном исследовании используется такой же шаг расчетной сетки. Кроме того, дополнительно проведены тест на сходимость решения по шагу расчетной сетки при расчете перемешивания и анализ скорости горения при использовании выбранного шага. Результаты этих тестов представлены в Приложении. Выбор расчетного шага по времени производился согласно критерию Куранта–Фридрихса–Леви. Решение

уравнений химической кинетики в каждой расчетной ячейке осуществлялось методом Гира. Полученное решение являлось устойчивым во всем рассмотренном диапазоне изменения температуры, давления и локального состава смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Впрыск и перемешивание водорода. Впрыск водорода осуществляется через систему клапанов из КВД непосредственно в камеру сгорания (рис. 1). При этом определяется доля водорода во всей камере сгорания, изначально заполненной воздухом при давлении 1 атм. Доля водорода рассчитывается как отношение суммарной концентрации водорода в камере сгорания к концентрации водорода и воздуха. На рис. 2 представлена эволюция доли водорода $Y(H_2)$ в камере сгорания для разных конфигураций клапанов. Предполагается, что выпуск происходит до тех пор, пока мольная доля водорода в камере сгорания не составит величину 0.3, т.е. количество, необходимое для образования стехиометрической смеси с воздухом. Видно, что наиболее долгим оказы-

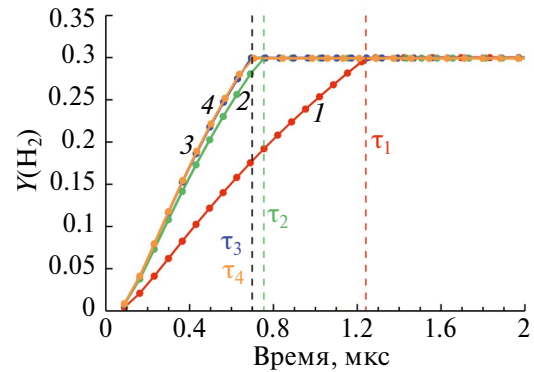


Рис. 2. Изменение во времени мольной доли водорода в КС для вариантов с истечением через одну (1), две (2), три (3), шесть (4) щелей; τ — время впуска водорода в КС до достижения в КС $Y(H_2) = 0.3$.

вается выпуск водорода через одну щель шириной 1.0 мм, тогда как время впуска водорода через две, три или шесть щелей суммарной шириной около 2.0 мм является примерно одинаковым и находится в диапазоне 0.7–0.75 мкс. Время истечения через одну щель составило 1.23 мкс.

На рис. 3 показано, как для разных конфигураций щелей впуска осуществляется перемешивание

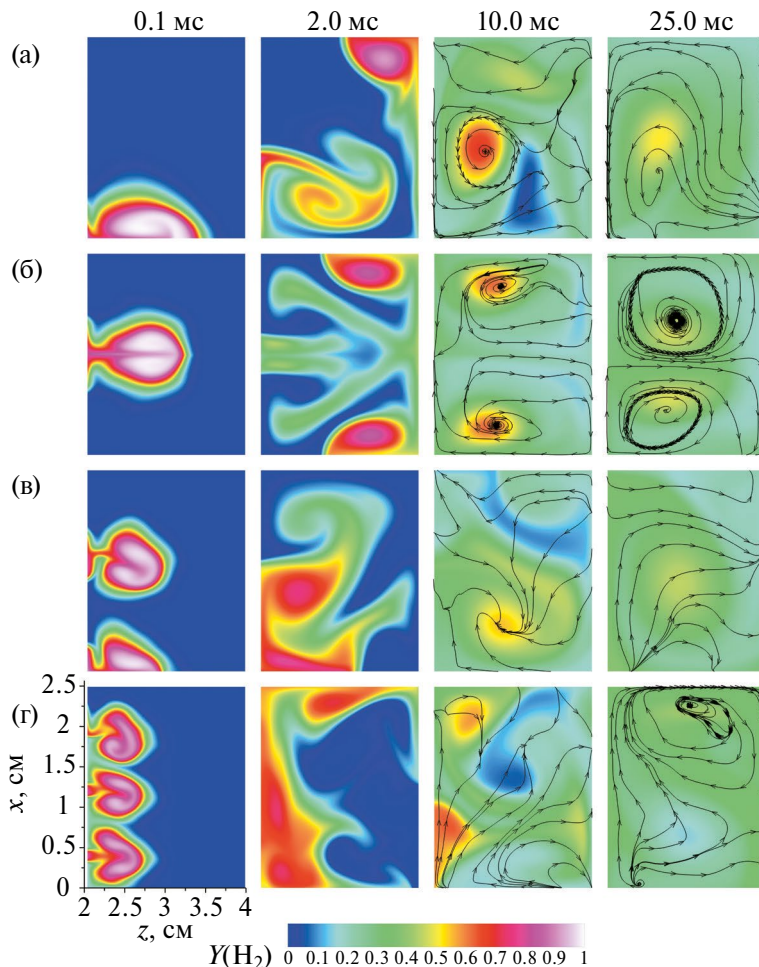


Рис. 3. Поля мольной доли водорода в КС в четыре момента времени для вариантов с истечением через одну (а), две (б), три (в), шесть (г) щелей; для моментов времени 10.0 и 25.0 мс даны также линии тока.

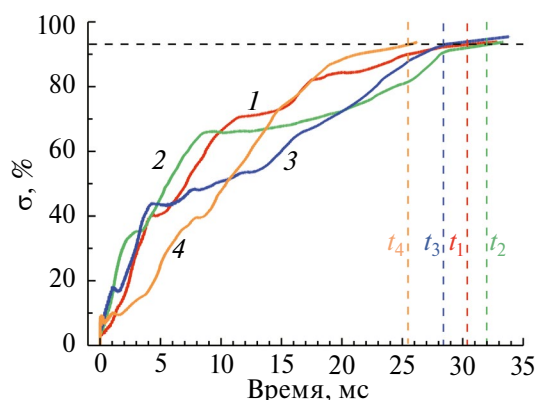


Рис. 4. Эволюция во времени доли площади расчетной области, относящейся к КС, занятой смесью водород–воздух с $Y(\text{H}_2) = 0.2\text{--}0.4$ для вариантов с истечением через одну (1), две (2), три (3), шесть (4) щелей; t – время окончания перемешивания, соответствующее достижению степени однородности 93%.

водорода. На момент времени 0.1 мс среда внутри КС еще не перемешана. Весь водород сосредоточен в областях струйного течения, и перемешивание с воздухом происходит лишь на границах струй. На момент времени 2.0 мс наблюдается все еще низкая степень однородности смеси. Струйное течение формирует в объеме КС крупные вихревые структуры, в которых и происходит перемешивание водорода с воздухом. При этом все четыре рассматриваемые конфигурации характеризуются различными структурами течения, определяемыми в первую очередь количеством струй и их взаимодействием. Интересно отметить, что на данный отдельно взятый момент времени количественная оценка степени однородности в случае впрыска водорода двумя струями оказывается больше, чем в случае большего количества струй (рис. 4).

К моменту времени 10 мс достигается стадия, характеризующаяся уже достаточно высокой степенью однородности. Линии тока на рис. 3 показывают, что в случае одной щели имеет место один интенсивный вихрь в объеме КС, в случае двух щелей – два вихря, симметрично расположенных

относительно плоскости, проходящей через середину КС параллельно плоскости симметрии. Для вариантов с тремя и шестью щелями имеет место более сложная картина течения, крупные вихри видны менее отчетливо. Это говорит о том, что энергия в этих двух случаях распределена изначально в более мелкомасштабных структурах. Это обусловлено структурой потока на начальной стадии подачи водорода в КС. Наличие более мелкомасштабных вихревых течений приводит к более интенсивному перемешиванию на рассматриваемый момент времени, и перемешивание в случае большого числа струй развивается быстрее (рис. 4), чем в случае одной или двух струй. На рис. 4 показана эволюция во времени доли площади σ (далее степень однородности смеси) расчетной области, занимаемой КС, где содержание водорода составляет 0.2–0.4 мол. доли, т.е. состав водородно-воздушной смеси близок к стехиометрическому. Представленные на рис. 3 поля течений на момент времени 25 мс соответствуют стадии достаточно полного перемешивания (рис. 4).

Принимая условно достижение максимальной степени однородности как заполнение 93% от всей площади расчетной области, занимаемой КС, смесью водорода с воздухом околостехиометрического состава (0.2–0.4 мол. доли водорода), можно определить по рис. 4, что наиболее быстро максимальное перемешивание достигается для варианта впрыска водорода через шесть щелей (25.49 мс). Далее в порядке увеличения времени перемешивания: для трех щелей – 28.44, одной щели – 30.28, двух щелей – 32.04 мс. Отметим, что, согласно рис. 4, перемешивание в случаях различных конфигураций щелей развивается по-разному. Так, в случае впрыска водорода через шесть щелей степень однородности вначале (примерно до 10 мс) растет медленнее остальных, однако далее процесс ускоряется и максимальная степень однородности в этом случае достигается раньше всех. Вариант с двумя щелями, напротив, примерно до 10 мс демонстрирует наиболее высокую скорость роста степени однородности.

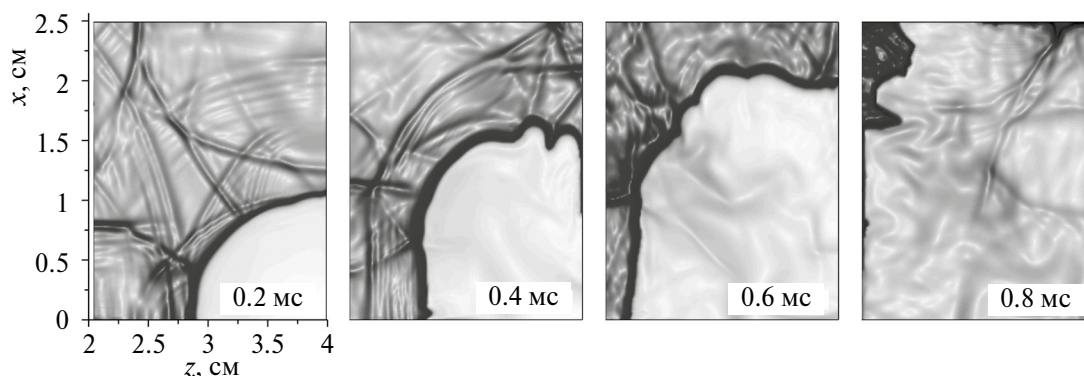


Рис. 5. Теневые картины при развитии горения в смеси со степенью однородности 93.3%; 0 мс соответствует искровому поджигу.

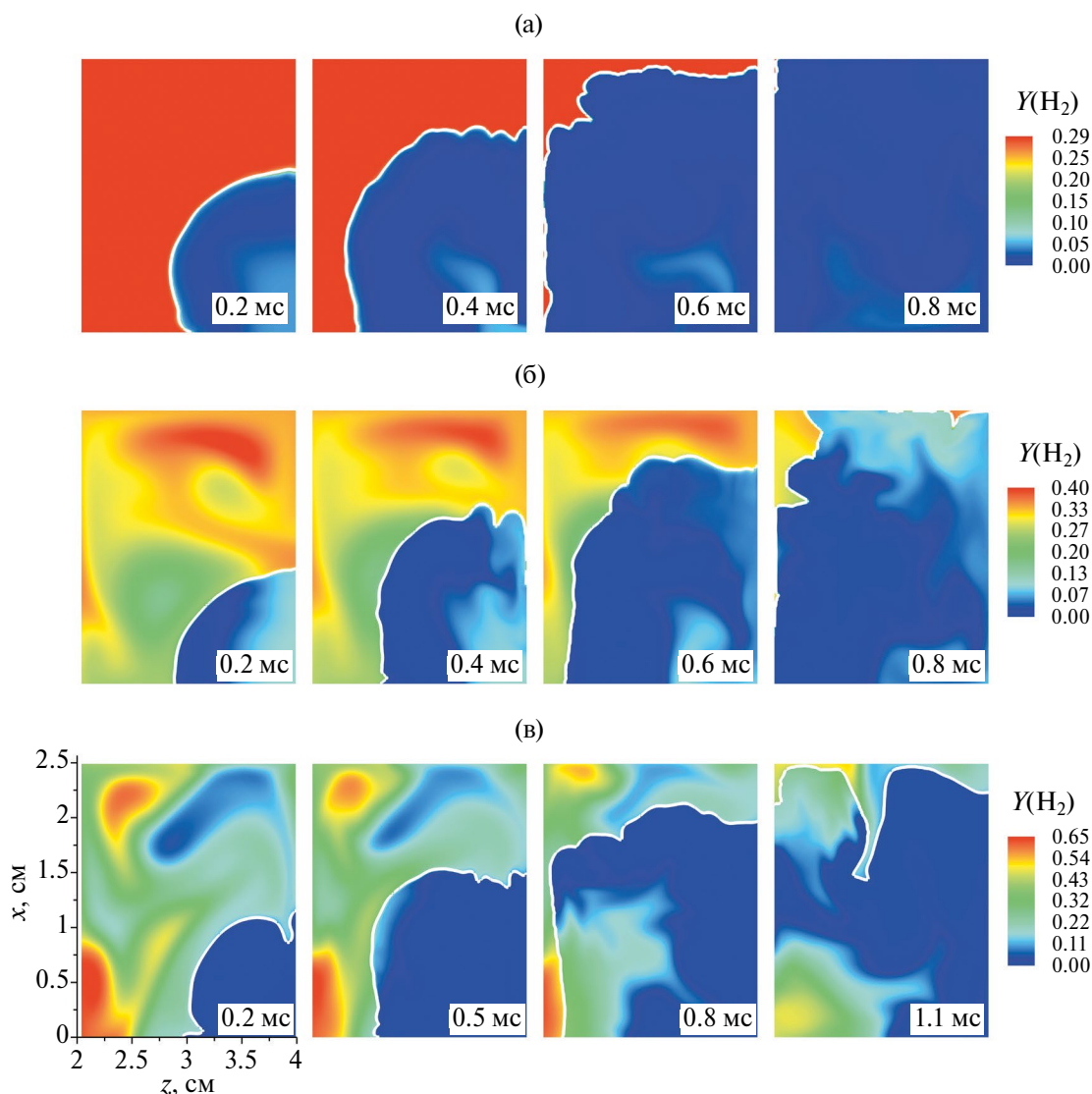


Рис. 6. Поля мольной доли водорода при развитии горения в смеси с воздухом со степенью однородности 100% (а), 93.3% (б), 38.6% (в); 0 мс соответствует искровому поджигу; белые кривые – изолинии температуры 1000 К.

Тем не менее этот вариант приводит к наиболее медленному достижению степени однородности в 93%.

Горение водорода. Рассмотрим задачу об иницировании и развитии горения в объеме КС на примере конфигурации с шестью щелями. Для анализа влияния степени однородности смеси на процесс горения варьируется момент срабатывания искры зажигания. Поджиг осуществляется в моменты времени 25.9, 21.0, 14.1, 7.6 мс, соответствующие степеням однородности 93.3, 89.7, 69.1, 38.6%. На рис. 5–7 начала отсчета времени сдвинуты: нулевой момент времени соответствует моменту времени срабатывания искры зажигания.

Из представленных на рис. 5 теневых картин, полученных в последовательные моменты времени после иницирования горения в 25.9 мс, видно, что процесс распространения пламени и расширения продуктов горения сопровождается

генерацией сильных волн сжатия, которые отражаются от стенок КС и воздействуют на фронт пламени, приводя к дополнительному искривлению фронта пламени. Очевидно, что неровности фронта пламени возникают также ввиду неоднородности распределения горючего и окислителя (степень однородности составляет 93.3%).

На рис. 6 представлены поля мольной доли водорода в различные последовательные моменты времени после иницирования поджига. Наиболее быстро горение происходит в полностью однородной смеси. В случаях плохо перемешанной смеси наблюдается неоднородность распределения водорода как в области несгоревшей смеси, так и в продуктах горения. Последнее указывает на неполноту сгорания водорода в процессе горения. В случае, когда степень однородности составляет 38.6%, это приводит к большому уровню недогорания водорода.

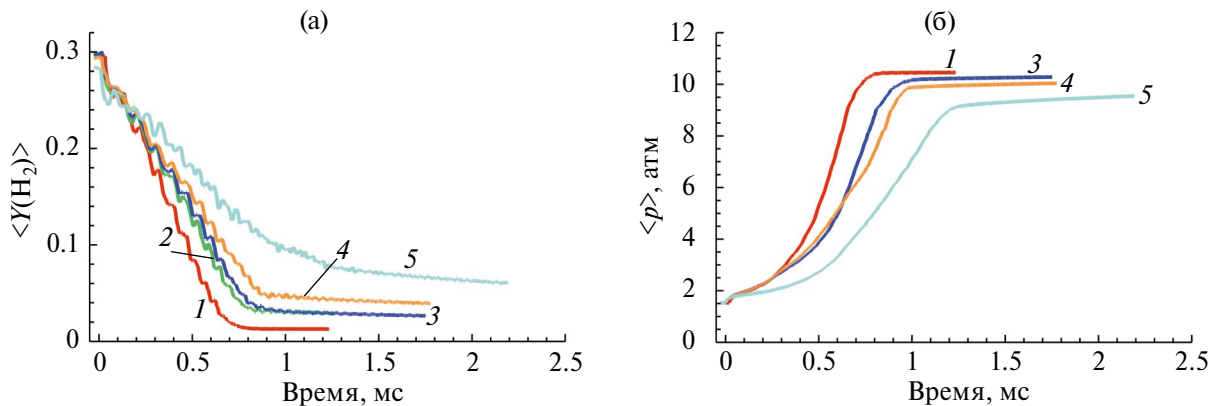


Рис. 7. Эволюция средней по площади расчетной области, занимаемой КС, мольной доли водорода (а) и среднего давления (б) при поджиге на разных стадиях перемешивания; 1 – 100% однородности, 2 – 93.3%, 3 – 89.7%, 4 – 69.1%, 5 – 38.6%.

Оценим степень неполноты сгорания водорода. На рис. 7а приведены хронограммы средней по площади расчетной области, занимаемой КС, мольной доли водорода в случаях поджиге на разных стадиях перемешивания. Степень неполноты сгорания оценивалась на момент времени, когда пламя достигало стенок камеры сгорания (а временные зависимости на рис. 7а меняли тренд на более пологий). Наиболее низкое значение неполноты сгорания водорода имеет место для идеального случая – предварительно полностью перемешанной смеси. Уже для степеней однородности 93.3 и 89.7% уровень неполноты сгорания водорода заметно отличается от идеального случая: 0.028 (9.5%) несгоревшего водорода против 0.013 (4.4%). Для степени однородности 69.1% средняя мольная доля несгоревшего водорода составляет 0.041, а для 38.6% – 0.060, что соответствует степени недогорания 13.9 и 21.2%.

Приведем, до каких значений происходит рост давления при сгорании смесей разной степени однородности. На рис. 7б показаны изменения среднего в КС давления. Неполнота сгорания отражается на графиках в соответствующем падении достигаемого в процессе горения давления.

Наконец, степени недогорания водорода в зависимости от разных степеней однородности смеси, по достижении которых организуется ис-

кровой поджиг, представлены на рис. 8. Наименьшее значение доли несгоревшего водорода достигается лишь при полностью однородной смеси водорода с воздухом. Однако и в этом случае оно составляет 4.4%, т.е. даже в идеальном случае полного сгорания не происходит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование показало, что принципиально возможно осуществить прямую подачу водорода в камеру сгорания двигателя под давлением 700 атм при отсутствии самовоспламенения водорода. Ввиду того, что на сегодняшний день давление в 700 атм является характерным для систем хранения водорода, можно заключить, что, по крайней мере, в лабораторных условиях возможно организовать процесс непосредственного впрыска водорода в камеру сгорания из баллона, в котором водород хранится, для оптимизации организации работы двигателя. В работе предложены конкретные времена подачи водорода и размеры клапанов впуска.

Показано, что для осуществления важной для перехода на водородное топливо цели – отсутствия недогорания водорода – необходимо, чтобы в камере сгорания образовалась смесь водорода с воздухом, наиболее приближенная, во-первых, к стехиометрической и, во-вторых, к однородной. Первое осуществляется в результате задания определенного момента времени закрытия клапанов впуска водорода. Второе – за счет выдержки времени перемешивания. В работе проведена оценка времени перемешивания и времени сгорания, которые можно использовать при постановке натурных экспериментов и в дальнейших работах, направленных на разработку новых систем подачи топлива в водородные двигатели. Так, получено, что характерное время перемешивания для разных конфигураций клапанов лежит в диапазоне 25–30 мс, и наиболее быстрое

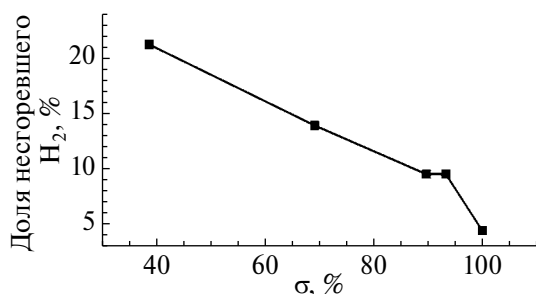


Рис. 8. Зависимость доли несгоревшего водорода от степени однородности смеси водорода с воздухом на момент поджига.

перемешивание реализуется в системе с шестью клапанами. Расчет горения при искровом поджиге смесей разной степени однородности для данной конфигурации показал, что характерное время сгорания составляет около 1 мс. При этом доля несгоревшего водорода изменяется почти линейно от 4.4 до 21.2% при поджиге смесей со степенями однородности от 100 до 38.6%.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ключевыми процессами, рассматриваемыми в настоящей работе, являются перемешивание водорода с воздухом при импульсном истечении водорода в камеру сгорания и горение водородно-воздушной смеси разной степени однородности. Приведем анализ выбора шага расчетной сетки, подходящего для моделирования обоих процессов.

Рассмотрим процесс истечения водорода в камеру сгорания через две щели по 1.0 мм шириной, расположенные симметрично относительно плоскости симметрии (см. рис. 16). Проведем расчеты в данной постановке с использованием шагов расчетной сетки 200, 100, 50 мкм. В настоящей работе оценка степени однородности смеси водорода с воздухом проводится при отслеживании эволюции особой величины: доли площади камеры сгорания, куда истекает водород, в которой мольная доля водорода составляет 0.2–0.4 (см. рис. 4). Проведем сопоставление временных зависимостей описанной величины для расчетов в указанной выше постановке, выполненных на разных расчетных сетках. Результат представлен на рис. 9. Видно, что для крупной сетки (200 мкм) максимальная степень однородности (100%) достигается довольно быстро — примерно через 11 мс после начала впуска водорода. Однако результат, полученный с использованием настолько грубой сетки, количественно существенно отли-

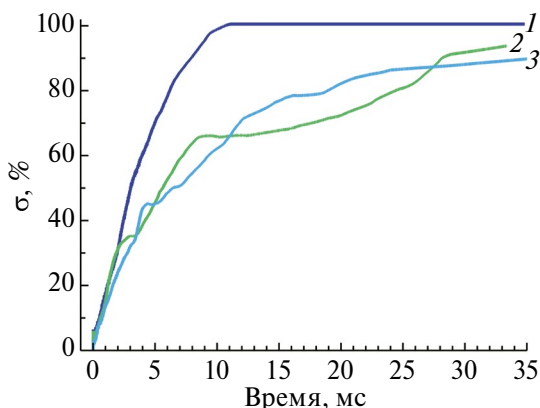


Рис. 9. Эволюция во времени доли площади КС, занятой смесью водород–воздух с мольной долей водорода от 0.2 до 0.4, в расчетах с использованием шагов сетки 200 (1), 100 (2), 50 мкм (3).

чается от результатов на более мелких сетках. Для сеток 100 и 50 мкм видно близкое в количественном отношении значение указанной характерной величины для отдельных моментов времени, что можно трактовать как наличие сходимости решения. Таким образом, проведенный тест показывает уместность использования шага 100 мкм для расчетов перемешивания, поскольку вдвое меньший шаг приводит к близкому значению степени однородности на протяжении рассматриваемого промежутка времени, т.е. до достижения ~90% степени однородности.

Для подтверждения правомерности использования шага сетки 100 мкм и получения достоверных результатов расчета горения проведен одномерный расчет ламинарной скорости пламени. При использовании кинетического механизма [22] для стехиометрической смеси водород–воздух расчетное значение ламинарной скорости составило 2.5 м/с. Сравнение с данными [32, 33] показывает, что ошибка составляет 4–24%, поскольку разброс экспериментальных данных для ламинарной скорости пламени в стехиометрической смеси охватывает диапазон 1.9–2.4 м/с. Ранее рассмотрение вопроса сходимости решения задачи о ламинарном распространении пламени проводилось в работе [34], где были сделаны схожие выводы о выборе параметров расчетной сетки при использовании численного метода [24] для решения задач горения водорода.

Таким образом, шаг 100 мкм является приемлемым для расчетов перемешивания и горения в двумерной постановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X., Srna A., Yip H.L., Kook S., Chan Q.N., Hawkes E.R. Performance and Emissions of Hydrogen-diesel Dual Direct Injection (H2DDI) in a Single-cylinder Compression-ignition Engine // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. V. 46. № 1. P. 1302.
2. Rorimpandey P., Yip H.L., Srna A., Zhai G., Wehrfritz A., Kook S., Hawkes E.R., Chan Q.N. Hydrogen-diesel Dual-fuel Direct-injection (H2DDI) Combustion Under Compression-ignition Engine Conditions // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. V. 48. № 2. P. 766.
3. Zareei J., Ghadamkheir K., Farkhondeh S.A., Abed A.M., Opulencia M.J.C., Alvarez J.R.N. Numerical Investigation of Hydrogen Enriched Natural Gas Effects on Different Characteristics of a SI Engine with Modified Injection Mechanism from Port to Direct Injection // *Energy*. 2022. V. 255. 124445.
4. Wu B., Torelli R., Pei Y. Numerical Modeling of Hydrogen Mixing in a Direct-injection Engine Fueled with Gaseous Hydrogen // *Fuel*. 2023. V. 341. 127725.
5. Qu W., Fang Y., Wang Z., Sun H., Feng L. Optimization of Injection System for a Medium-speed Four-stroke Spark-ignition Marine Hydrogen Engine // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. № 44. P. 19289.

6. *Addipalli S.K., Pei Y., Zhang Y., Scarcelli R.* Multi-dimensional Modeling of Mixture Preparation in a Direct Injection Engine Fueled with Gaseous Hydrogen // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. № 67. P. 29085.
7. *Yosri M., Palulli R., Talei M., Mortimer J., Poursadegh F., Yang Y., Brear M.* Numerical Investigation of a Large Bore, Direct Injection, Spark Ignition, Hydrogen-fuelled Engine // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. V. 48. № 46. P. 17689.
8. *Maio G., Boberic A., Giarracca L., Aubagnac-Karkar D., Colin O., Duffour F., Deppenkemper K., Virnich L., Pischinger S.* Experimental and Numerical Investigation of a Direct Injection Spark Ignition Hydrogen Engine for Heavy-duty Applications // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. № 67. P. 29069.
9. *Park C., Kim Y., Oh S., Oh J., Choi Y., Baek H., Lee S.W., Lee K.* Effect of Fuel Injection Timing and Injection Pressure on Performance in a Hydrogen Direct Injection Engine // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. № 50. P. 21552.
10. *Li X., Sun B., Zhang D., Wang X., Bao L., Luo Q.* Experimental Study on the Cycle Variation Characteristics of Direct Injection Hydrogen Engine // *Energy Convers. Manag.* X. 2022. V. 15. P. 100260.
11. *Wei H., Hu Z., Ma J., Ma W., Yuan S., Hu Y., Hu K., Zhou L., Wei H.* Experimental Study of Thermal Efficiency and NO_x Emission of Turbocharged Direct Injection Hydrogen Engine Based on a High Injection Pressure // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. V. 48. № 34. P. 12905.
12. *Fu Z., Gao W., Li Y., Hua X., Zou J., Li Y.* Numerical Simulation of the Mixture Distribution and Its Influence on the Performance of a Hydrogen Direct Injection Engine under an Ultra-lean Mixture Condition // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. V. 48. № 51. P. 19700.
13. *Счастливцев А.И., Дуников Д.О., Борзенко В.И., Шматов Д.П.* Водородно-кислородные установки для энергетики // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 5. С. 809.
14. *Арефьев К.Ю., Абрамов М.А., Воронецкий А.В., Сон Э.Е.* Оптимизация инъекции двухфазных продуктов газификации энергетических конденсированных составов в модельную камеру сгорания малого удлинения // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 1. С. 94.
15. *Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е.* Горение водородно-воздушных смесей в канале при кольцевом воспламенении // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 6. С. 957.
16. *Киверин А.Д., Яковенко И.С.* Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации // *ТВТ*. 2020. Т. 58. № 4. С. 707.
17. *Coogan S., Brun K., Teraji D.* Micromix Combustor for High Temperature Hybrid Gas Turbine Concentrated Solar Power Systems // *Energy Procedia*. 2014. V. 49. P. 1298.
18. *Funke H.H.-W., Dickhoff J., Keinz J., Haj Ayed A., Parente A., Hendrick P.* Experimental and Numerical Study of the Micromix Combustion Principle Applied for Hydrogen and Hydrogen-rich Syngas as Fuel with Increased Energy Density for Industrial Gas Turbine Applications // *Energy Procedia*. 2014. V. 61. P. 1736.
19. *Ghali P.F., Khandelwal B.* Design and Simulation of a Hydrogen Micromix Combustor // *AIAA Scitech Forum*. 2021. P. 1984.
20. *Sanli A., Yilmaz I.T., Gümüş M.* Assessment of Combustion and Exhaust Emissions in a Common-rail Diesel Engine Fueled with Methane and Hydrogen/Methane Mixtures under Different Compression Ratio // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. № 4. P. 3263.
21. *Shentsov V., Cirrone D., Makarov D.* Effect of TPRD Diameter and Direction of Release on Hydrogen Dispersion and Jet Fires in Underground Parking // *J. Energy Storage*. 2023. V. 68. 107771.
22. *O'Conaire M., Curran H.J., Simmie J.M., Pitz W.J., Westbrook C.K.* A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation // *Int. J. Chem. Kinet.* 2004. V. 36. № 11. P. 603.
23. *Смыгалина А.Е., Киверин А.Д.* О критериях самовоспламенения водорода при его истечении из баллона под высоким давлением // *Горение и взрыв*. 2023. Т. 16. № 3. С. 3.
24. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.
25. *Зайченко В.М., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Цыплаков А.И.* Горение обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием // *Изв. РАН. Энергетика*. 2018. № 4. С. 87.
26. *Киверин А.Д., Смыгалина А.Е.* Механизмы развития интенсивных динамических процессов при сжигании водорода в камерах сгорания ДВС // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 1. С. 103.
27. *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Liberman M.A.* Hydrogen–Oxygen Flame Acceleration and Deflagration-to-detonation Transition in Three-dimensional Rectangular Channels with No-slip Walls // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2013. V. 38. № 36. P. 16427.
28. *Smygalina A.E., Kiverin A.D.* Self-ignition of Hydrogen Released under High Pressure Through Two Slits // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2023. V. 17. № 4. P. 907.
29. *Smygalina A.E., Kiverin A.D.* Limits of Self-ignition in the Process of Hydrogen–Methane Mixtures Release under High Pressure into Unconfined Space // *J. Energy Storage*. 2023. V. 73. 108911.
30. *Иванов Е.Н., Иванов М.Ф.* Определение статистических характеристик течений газа в камере под движущимся поршнем методом численного моделирования // *Матем. моделирование*. 2010. Т. 22. № 12. С. 33.
31. *Breuer S., Oberlack M., Peters N.* Non-isotropic Length Scales During the Compression Stroke of a Motored Piston Engine // *Flow, Turbul. Combust.* 2005. V. 74. № 2. P. 145.
32. *Tse S.D., Zhu D.L., Law C.K.* Morphology and Burning Rates of Expanding Spherical Flames in H₂/O₂/Inert Mixtures up to 60 Atmospheres // *Proc. Combust. Inst.* 2000. V. 28. P. 1793.
33. *Iijima T., Takeno T.* Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity // *Combust. Flame*. 1986. V. 65. P. 35.
34. *Bykov V., Kiverin A., Koksharov A., Yakovenko I.* Analysis of Transient Combustion with the Use of Contemporary CFD Techniques // *Comput. Fluids*. 2019. V. 194. 104310.