

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 544.45

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ИСТЕЧЕНИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ В КАНАЛ, ЗАПОЛНЕННЫЙ КИСЛОРОДОМ С НЕЙТРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ

© 2021 г. А. Е. Смыгалина^{1*}, А. Д. Киверин¹

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: smygalina-anna@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020;

после доработки 19.01.2021;

принята в печать 20.01.2021

Работа посвящена анализу методами численного моделирования процесса истечения водорода под давлением в 60 атм через раскрывающуюся диафрагму в канал, заполненный кислородом с добавками нейтральных с химической точки зрения веществ: азота, водяного пара, углекислого газа, гелия. Показано, что при определенном содержании добавок самовоспламенение водорода при истечении отсутствует. Получены качественные закономерности, показывающие, что в случае добавления в атмосферу кислорода водяного пара эффект замедления и в конечном счете подавления самовоспламенения наиболее выражен по сравнению с действием других добавок, перечисленных далее в порядке снижения эффекта: гелий, углекислый газ, азот. Продемонстрированы и описаны два сценария развития горения в канале. В обоих вариантах самовоспламенение возникает у боковой стенки канала, а далее интенсивное горение развивается либо во всем поперечном сечении канала, либо внутри очага, локализованного у стенки канала и распространяющегося в потоке в направлении выхода из канала.

Ключевые слова: водород, кислород, нейтральные добавки, самовоспламенение, предварительно не перемешанное горение, численное моделирование.

DOI: 10.31857/S0207401X21080124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным сценарием при оценке рисков возникновения пожаров и взрывов на промышленных объектах, работа которых связана либо с использованием водорода в качестве топлива [1–3], либо с рисками его накопления в ограниченном объеме [4], является самовоспламенение водорода при его истечении в атмосферу [5–7]. Здесь целесообразно отметить, что в рамках перспективного направления использования водорода в энергетике возникает необходимость хранения больших объемов водорода под высоким давлением. Разгерметизация резервуара высокого давления определяет высокоскоростное струйное истечение сильно сжатого водорода в атмосферу [6]. Формируемая при этом ударная волна нагревает атмосферу и входящий в ее состав кислород, тогда как струйный характер истечения водорода определяет интенсивное перемешивание водорода с нагретым кислородом и самовоспламенение, характеризуемое предельно короткими временными масштабами [8]. Такой сценарий самовоспламенения истекающего в атмосферу водорода представляется наиболее опасным с точки зрения водородной безопасно-

сти и, несмотря на простоту общих представлений о его развитии, на сегодняшний день не получил полного исчерпывающего описания, что необходимо для разработки систем его предупреждения и/или подавления. В рамках современных исследований предлагаются различные методы подавления самовоспламенения водорода при его истечении под давлением в окружающую среду, включая использование отводных трубок [9, 10] и разбавление водорода менее энергетическим топливом метаном [11] или химически нейтральными компонентами, например азотом [12]. Важно отметить, что наравне с практической важностью решения задачи о самовоспламенении водорода сложный газодинамический процесс истечения водорода, сопровождающийся процессами молекулярного переноса и химического превращения и приводящий к самовоспламенению, представляет интерес для фундаментального исследования процессов воспламенения и горения предварительно не перемешанных горючих систем. Здесь следует выделить работы, посвященные детальному исследованию механизма самовоспламенения [13–15]. Отметим также, что конкретные

механизмы воспламенения остаются не до конца исследованными даже для случая предварительно перемешанных систем [16, 17], при этом вопросы воспламенения в предварительно не перемешанных системах представляются куда более важными с практической точки зрения.

Остановимся далее на вопросах самовоспламенения водорода в присутствии добавок. В этом направлении можно выделить целый класс работ, посвященных исследованию составов как горючего, так и окислителя, отличных от чистого водорода и воздуха. Так, уже в пионерской работе [5] наравне с процессом истечения водорода в воздух был рассмотрен случай истечения в чистый кислород, при этом в качестве горючего наравне с чистым водородом использовался синтез-газ (смесь водорода с монооксидом углерода). В работе [18] также анализировался сценарий истечения водорода в чистый кислород. В рамках исследования, проведенного в работе [19], водород истекал в воздух с добавками водорода, а в [20] – в воздух с добавками диоксида углерода. Среди работ, в которых варьировался состав горючего, наряду с упомянутой работой [5], стоит отметить из работы [11, 12, 21–23]. Так, в экспериментах из работ [11, 21–23] к водороду добавлялся метан, а в [12] водород разбавлялся азотом. Отметим, что в качестве наиболее перспективной меры предотвращения самовоспламенения водорода при его истечении под давлением, по всей видимости, следует рассматривать добавление ингибирующих добавок в окружающую атмосферу, а не внутрь резервуара. Более того, инертизация атмосферы представляется (в рамках водородной безопасности АЭС) одним из перспективных подходов к ингибированию взрыва водорода при его нештатном накоплении в реакторной зоне АЭС и дальнейшем выбросе в объем под контейнментом [4, 24].

Настоящая работа посвящена исследованию процесса самовоспламенения водорода при его истечении под давлением в отводной канал в атмосферу различного состава. Исследование выполнено методами численного моделирования. В рамках исследования проведен анализ истечения чистого водорода в атмосферу кислорода с добавлением варьируемого количества различных нейтральных с точки зрения их участия в химическом превращении добавок. В качестве таких добавок рассмотрены: азот, диоксид углерода, водяной пар и гелий. При этом диоксид углерода уже рассматривался ранее [20]. Азот целесообразно рассматривать как естественный компонент атмосферного воздуха. Водяной пар был выбран как продукт горения водорода, а значит, как потенциально доступное вещество в перспективных системах, использующих водород в качестве топлива. Более того, водяной пар является неотъемлемой составляющей атмосферы внутри помещений АЭС при развитии аварийной ситуации, что

также определяет актуальность его рассмотрения в качестве составляющей атмосферы. Гелий рассмотрен как вариант использования инертного газа для подавления самовоспламенения водорода.

Цель настоящей работы – показать в первую очередь на качественном уровне, как химический состав атмосферы влияет на задержку самовоспламенения и его пределы и, в частности, какая из добавок наиболее эффективным образом подавляет самовоспламенение. Настоящая работа является продолжением исследования авторов [25], в котором детально рассматривался механизм самовоспламенения на примере истечения водорода в воздух.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Численное моделирование процесса истечения водорода под высоким давлением в канал проводилось на основе математической модели газодинамики сжимаемой среды, включающей в себя систему уравнений Навье–Стокса с учетом процессов молекулярного переноса (вязкости, теплопроводности, диффузии) и процессов химического превращения. Численное решение системы уравнений газодинамики проводилось с использованием модифицированного метода “крупных частиц” [26], имеющего первый порядок точности по времени и второй порядок точности по пространству. В предыдущих работах авторов продемонстрировано, что используемый численный алгоритм позволяет получать достоверные на качественном и количественном уровне результаты при моделировании разных режимов горения в различных конфигурациях, включая ускорение пламени и переход к детонации в каналах и трубах [27, 28], горение в двигателе с искровым зажиганием [3], а также воспламенение струи водорода, что продемонстрировано в [6] и в работе [25], использующей близкую к настоящему исследованию постановку.

Моделирование химического превращения проводилось с использованием детального механизма химической кинетики, описывающего окисление водорода и состоящего из 21 двусторонней реакции между восемью компонентами [29]. При этом предполагалось, что добавки к окислителю: азот N_2 , диоксид углерода CO_2 , гелий He, не принимают участия в химических реакциях, выступая исключительно как третье тело в трехчастичных взаимодействиях. Водяной пар входит в механизм [29] как основной компонент, однако как продукт окисления водорода он не является промежуточным звеном в цепной реакции, поэтому его также можно рассматривать как нейтральную добавку. Расчет коэффициентов переноса для многокомпонентной смеси проводился с использованием традиционных эмпирических моделей [30].

Несмотря на то, что работа носит исключительно теоретический характер, численное моделирование проводится в постановке с соблюдением параметров экспериментального исследования [31]. Отметим, что такая же постановка (с незначительным отличием от используемой здесь) применялась ранее авторами в работе [25]. Для случая истечения водорода в воздух проводится сравнение по времени задержки воспламенения с экспериментальными данными [20, 31]. При обсуждении результатов проводится сопоставление расчетных данных по предельному содержанию CO_2 в смеси с воздухом, обеспечивающему самовоспламенение, а также по задержке и месту воспламенения с результатами работы [20].

Приведем здесь параметры постановки задачи численного моделирования, воспроизводящей натурный эксперимент на реальном экспериментальном стенде. Расчетная область представляет собой цилиндрическую трубу, изображенную схематично на рис. 1. Диафрагма 5 разделяет камеру высокого давления (КВД, слева от диафрагмы) и камеру низкого давления (КНД). Торец 1 КВД закрыт. Торец 3 КНД открыт. Цифрой 2 обозначена боковая стенка трубы, 4 – ось симметрии. Диаметр трубы постоянен и составляет 18 мм, длины КВД и КНД одинаковы и равны 80 мм, что отмечено на рис. 1. Здесь КВД короче, чем в эксперименте [31] или расчете [25], однако выбранной длины КВД оказывается вполне достаточно для того, чтобы отраженная от ее торца волна разрежения не оказывала влияние на истечение водорода внутрь КНД. В начальный момент времени КВД была заполнена водородом при 60 атм и 300 К, КНД – кислородом в смеси с добавкой (N_2 , CO_2 , H_2O или He) при 1 атм и 300 К. Содержание добавок варьировалось в серии расчетов и в дальнейшем указано в процентах по объему. Диафрагма в начальный момент времени была полностью закрытой и далее раскрывалась в течение 30 мкс. При этом предполагалось, что скорость раскрытия, определяемая как изменение во времени радиуса открытой части диафрагмы, неизменна. Толщина диафрагмы составляла 0.2 мм. Время раскрытия было выбрано на основе экспериментальных данных [31]. Отметим, что время раскрытия связано с начальным давлением сжатого водорода и толщиной диафрагмы. На границах 1 и 2 (на стенке канала) задавалось условие прилипания. Расчеты проводились в приближении аксиальной симметрии, что позволило ограничиться двумерной записью основных уравнений в цилиндрических координатах. Расчетная область была разделена на два блока с разной по пространству расчетной сеткой. Область 6, выделенная на рис. 1 темным цветом, имела однородную сетку размером 200 мкм, вся остальная расчетная область – 50 мкм. Такое закругление сетки (в 4 раза по линейному размеру) в области 6, не представляющей интерес с точки

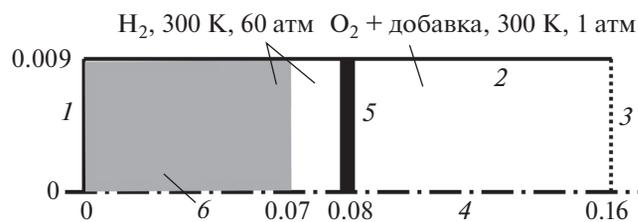


Рис. 1. Схематичное изображение расчетной области: 1 и 2 – жесткие стенки, 3 – открытый конец канала, 4 – ось симметрии, 5 – диафрагма, 6 – область с грубой сеткой.

зрения исследования процесса самовоспламенения, происходящего в оставшейся части области, позволило ускорить выполнение отдельного расчета на 30%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представим результаты расчетов для различных составов, наполняющих КНД. На рис. 2 приведены зависимости задержки самовоспламенения (τ) от содержания различных инертных добавок к кислороду в процентах по объему. Задержка самовоспламенения определялась по хронограмме максимальной температуры как момент времени, соответствующий резкому росту температуры, определяемому формированием очага воспламенения. Анализ расчетов показывает, что в зависимости от состава смеси, наполняющей КНД, возможны два различных сценария развития горения: при малом содержании инертных добавок горение развивается во всем поперечном сечении канала, при большом содержании добавок очаг горения локализован у боковой стенки канала и в ядро потока не распространяется. В обоих случаях, т.е. при любом содержании добавок, в выбранной постановке задачи (давление 60 атм) самовоспламенение происходит вблизи стенки канала. Крупные символы на рис. 2 соответствуют случаю горения во всем поперечном сечении канала, мелкие – случаю локализации очага горения у боковой поверхности ударной трубы. Светлые символы соответствуют режиму со срывом горения; в этом случае локализованный вблизи боковой стенки, очаг горения затухает со временем и не доходит до выхода из канала. Отсутствие самовоспламенения наблюдалось в следующих составах: $(4.5 \pm 0.5)\% \text{H}_2\text{O}$, $(8.5 \pm 1.5)\% \text{He}$, $(52.5 \pm 2.5)\% \text{CO}_2$, $(88.5 \pm 1.5)\% \text{N}_2$.

Наименьшая задержка самовоспламенения в 43.0 мкс достигается при истечении водорода в чистый кислород. На рис. 2 точечная линия соответствует этой минимальной величине. Таким образом, все рассматриваемые добавки способствуют только замедлению самовоспламенения или его предотвращению.

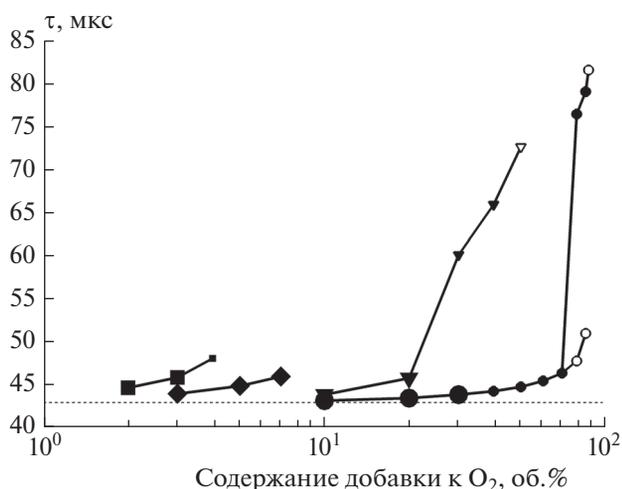


Рис. 2. Зависимость задержки самовоспламенения от процентного (по объему) содержания инертной добавки к кислороду: H₂O (■), He (◆), CO₂ (▼), N₂ (●). Символы большого размера указывают на развитие горения во всем поперечном сечении канала, малого размера — на развитие горения только у стенки; незакрашенные символы указывают на возникновение затухающего очага.

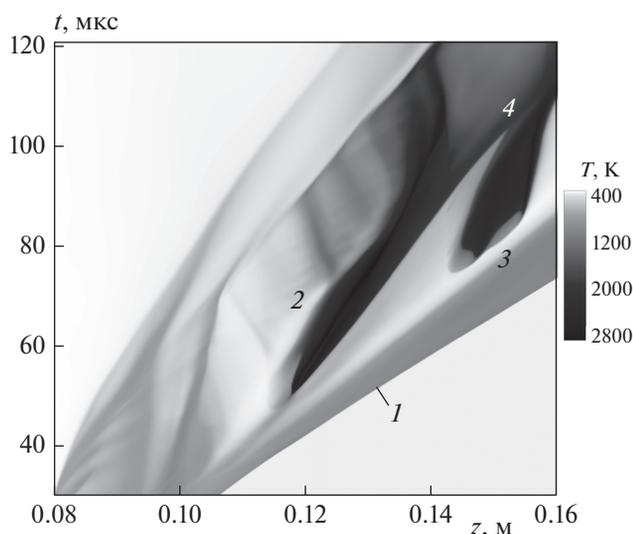


Рис. 3. $x-t$ -Диаграмма при истечении водорода в кислород с 70%-ной добавкой азота. Цифрами обозначены: 1 — фронт ударной волны, 2 — ранний очаг, 3 — поздний очаг, 4 — объединение очагов.

При разбавлении азотом, начиная с 40%-ного его содержания в смеси, включительно, наблюдается возникновение двух независимых очагов, которые характеризуются разным временем возникновения, поэтому в дальнейшем будем обозначать эти очаги как “ранний” и “поздний”. При содержании N₂ 40–70% в смеси время возникновения раннего очага составляет около 45–

50 мкс, позднего — около 75–80 мкс. Эволюция обоих очагов достаточно сложная, но в некоторый момент времени происходит их объединение, что можно видеть из анализа пространственно-временной развертки процесса ($x-t$ -диаграммы, рис. 3), представляющей эволюцию температуры для слоя газа, отстоящего от боковой стенки канала на расстоянии 50 мкм. На рис. 3 $x-t$ -диаграмма приведена для 70%-ного содержания N₂ в смеси с кислородом. Отметим, что точное время возникновения второго очага для случая 40–70% N₂ по зависимости от времени максимальной температуры в канале определить невозможно, так как в нем уже развивается первый очаг, поэтому на рис. 2 в указанном диапазоне содержаний добавки N₂ в смеси отмечены только времена возникновения первого очага. Для воздуха (79% N₂) и смесей с большим (до 85%) содержанием N₂ первый очаг затухает до возникновения второго, поэтому на рис. 2 показаны два времени возникновения очагов. При содержании N₂ 87% ранний очаг отсутствует и имеет место только очаг, возникающий в момент времени 81.5 мкс, который тем не менее затухает и не доходит до выхода из канала.

Процесс возникновения очагов самовоспламенения при истечении водорода, сжатого до давления в 60 атм, в газовую смесь любого состава одинаков: самовоспламенение возникает вблизи поверхности боковой стенки канала. В работе [25] подробно описан механизм возникновения очага самовоспламенения для схожих с рассматриваемыми в настоящей работе условий (в [25] в качестве окислителя использовался воздух). При истечении в чистый кислород или при малом содержании инертных добавок, как упоминалось выше, горение развивается во всем поперечном сечении канала. Сформировавшись вблизи боковой стенки канала в области пограничного слоя и повышенной за счет вязкого трения температуры, очаг воспламенения распространяется внутри области перемешивания водорода с окислительной средой. Как показывает анализ картины течения, перемешивание существенно интенсифицируется за счет вихревых структур, возникающих на боковой поверхности струи водорода по механизму сдвиговой неустойчивости. Картина течения представлена на рис. 4, где для иллюстрации в разные моменты времени приведены теневые картины (или поля градиента температуры), поля давления и изолинии концентраций H₂, H₂O при истечении водорода в чистый кислород. В расчетах наблюдалось развитие горения вдоль контактной границы водорода с кислородом, причем в той ее области (или слое), где водород находится в избытке. Очаг развивается довольно интенсивно и к моменту выхода из канала занимает уже все сечение последнего.

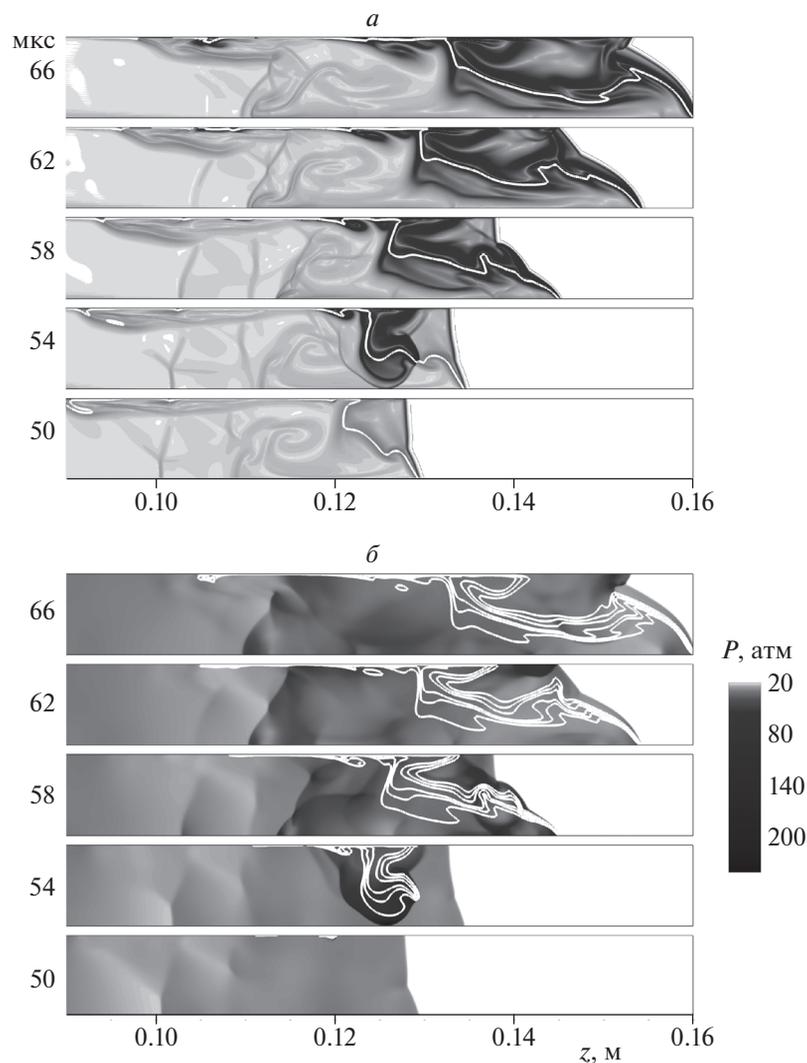


Рис. 4. *a* – Поля градиента температуры и контактная граница, показанная изолинией концентрации водорода в 0.5 моль (белая линия); *б* – поля давления (в атм) и изолинии мольной доли водяного пара (белые линии) при истечении водорода в кислород без добавок. Для каждого отсчета времени нижняя граница области – ось симметрии, верхняя – стенка.

Сравнение характера влияния различных добавок к кислороду на время самовоспламенения (рис. 2) показывает, что по эффективности замедления и подавления процесса самовоспламенения исследуемые добавки можно расположить в порядке убывания следующим образом: водяной пар, гелий, диоксид углерода, азот. Под эффективностью в данном случае следует понимать то, что одно и то же увеличение задержки самовоспламенения достигается при меньшей добавке данного вещества по сравнению с добавкой другого вещества.

Результаты и выводы настоящей работы построены полностью на анализе результатов проведенных расчетов. Сопоставим некоторые результаты с экспериментальными данными из литературы. В

работе [31, рис. 5*b*], из которой были взяты параметры экспериментальной установки для настоящей работы, время самовоспламенения при истечении водорода в воздух при начальном давлении водорода в 60 атм и времени раскрытия диафрагмы в 30 мкс составило около 75–80 мкс, что согласуется с временем формирования устойчивого второго очага в представленных выше расчетах.

В экспериментальной работе [20] показано, что при истечении водорода при начальном давлении 60 атм в воздух уже добавление 15% CO_2 приводит к отсутствию самовоспламенения. В настоящей работе соответствующая предельная добавка CO_2 к кислороду составляет 55%, однако ниже приведены также результаты дополнительных расчетов при добавлении CO_2 к воздуху, что

позволило оценить предельную величину содержания добавки, обеспечивающую отсутствие воспламенения водорода при истечении в воздух. Стоит отметить, что отличие от постановки эксперимента в работе [20] состоит в разной геометрии канала: в [20] длина канала КНД составляла 360 мм, диаметр — 15 мм, в настоящей работе — 80 и 18 мм соответственно. Различие может также иметь место для времени раскрытия диафрагмы (в [20] величина времени раскрытия не указана), и это может существенно сказаться на результатах, что продемонстрировано в работах [25, 31].

Дополнительно проведенные расчеты при добавлении CO_2 к воздуху в КНД в принятой постановке задачи (длина КНД — 80 мм, время раскрытия диафрагмы — 30 мкс), показали, что в случае содержания CO_2 в его смеси с воздухом, составляющего 5, 10 и 15 об.%, имеет место нестабильный очаг у боковой стенки, возникающий при ~50 мкс, который уже через ~20 мкс полностью затухает и не доходит до выхода из канала. При 30%-ном содержании CO_2 в воздухе очагов не наблюдается. При 2%-ном содержании процесс протекает аналогично случаю с истечением в воздух: при ~50 мкс имеет место затухающий очаг, а при ~80 мкс — стабильный очаг, достигающий выхода из канала. Таким образом, в расчетах получено, что при длине КНД 80 мм предельное содержание CO_2 , при котором происходит стабильное самовоспламенение водорода, составляет 2–5%.

Стоит отметить, что, согласно [20], при длине канала 360 мм предельное содержание CO_2 составляет 15%. Однако, как показывают работы по исследованию влияния длины канала на самовоспламенение [9, 10], при использовании более протяженных каналов самовоспламенение происходит при меньших интенсивностях истечения и меньших интенсивностях химического превращения. Таким образом, напротив, в более коротком канале (длиной в 80 мм) следует ожидать существенное уменьшение предельного содержания CO_2 по сравнению с 15%, и полученные здесь результаты отражают эту закономерность.

Сравнивая предельные составы для случаев добавления CO_2 к воздуху и кислороду, можно сделать вывод, что их различие оказывается существенным, поскольку воздух без каких-либо добавок уже приводит к достаточно сильному замедлению воспламенения, как видно из рис. 2. При отсутствии добавки CO_2 , т.е. при истечении водорода в воздух, время самовоспламенения по данным работы [20] составило около 70 мкс, что согласуется с результатом настоящей работы. При этом в [20] очаг самовоспламенения зарождался на расстоянии от 90 до 180 мм от диафрагмы. В настоящей работе для соответствующей величины было получено значение, равное 65.5 мм.

В завершении раздела укажем, что выбранный размер расчетной ячейки для основной части расчетной области, составляющий 50 мкм, представляется достаточным для исследования процесса и получения основных зависимостей, поскольку такое разрешение позволяет иметь качественно одинаковую картину течения, что и при более детальном разрешении, а также удовлетворительное согласие с экспериментами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методами численного моделирования получены зависимости времени самовоспламенения водорода при его истечении под давлением в 60 атм в канал, заполненный смесью кислорода с различными инертными добавками. Показано, что наиболее эффективно замедляет и подавляет самовоспламенение добавление в кислород паров H_2O ; далее в порядке снижения эффективности следуют He, CO_2 , N_2 . Во всех рассмотренных случаях самовоспламенение зарождается вблизи боковой стенки канала. При истечении водорода в чистый кислород и при малых содержаниях добавок очаг горения развивается в поперечном направлении и охватывает все сечение канала. При больших содержаниях добавок очаг локализуется у боковой стенки канала во время всего процесса его распространения вместе со струей водорода к выходу из канала. Отметим, что основную ценность работы представляют указанные качественные зависимости, поскольку, во-первых, численные результаты (в первую очередь время самовоспламенения) не имеют точного количественного совпадения с экспериментальными данными, во-вторых, количественные результаты имеют большую чувствительность к таким параметрам задачи, как геометрические характеристики канала (его длина, диаметр), начальное давление водорода, время раскрытия диафрагмы и ее толщина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verhelst S., Wallner T. // Prog. Energy Combust. Sci. 2009. V. 35. Issue 6. P. 490.
2. Фролов С.М., Дубровский А.В., Иванов В.С. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 2. С. 56.
3. Зайченко В.М., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Цып-лаков А.И. // Изв. РАН. Энергетика. 2018. № 4. С. 87.
4. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1661. Vienna: IAEA, 2011.
5. Wolanski P., Wojcicki S. // Proc. 14th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Institute, 1973. P. 1217.
6. Баженова Т.В., Брагин М.В., Голуб В.В., Иванов М.Ф. // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 5. С. 733.

7. *Медведев С.П., Хомик С.В., Максимова О.Г. и др.* // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 6(64). С. 38; <http://ipb.mos.ru/ttb>
8. *Головастов С.В., Бакланов Д.И., Володин В.В. и др.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 5. С. 19.
9. *Duan Q.L., Xiao H.H., Gong L. et al.* // Fire Safety J. 2018. V. 97. P. 44.
10. *Wang Z.L., Pan X.H., Jiang Y.M. et al.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45. Issue 35. P. 18042.
11. *Zeng Q., Duan Q.L., Li P. et al.* // Ibid. Issue 4. P. 3381.
12. *Rudy W., Teodorczyk A., Wen J.* // Ibid. 2017. V. 42. Issue 11. P. 7340.
13. *Zhong C., Gou X.L.* // Fuel. 2020. V. 282. 118838.
14. *Gong L., Li Z.S., Jin K.Y. et al.* // Saf. Sci. 2020. V. 129. 104807.
15. *Баженова Т.В., Головастов С.В., Голуб В.В. и др.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 11. С. 38.
16. *Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 6. С. 35.
17. *Medvedev S.P., Agafonov G.L., Khomik S.V., Gelfand B.E.* // Combust. and Flame. 2010. V. 157. P. 1436.
18. *Maxwell B.M., Tawagi P., Radulescu M.I.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38. Issue 6. P. 2908.
19. *Gong L., Duan Q.L., Liu J.L. et al.* // Ibid. 2018. V. 43. Issue 52. P. 23558.
20. *Gong L., Duan Q.L., Liu J.L. et al.* // Ibid. 2019. V. 44. Issue 13. P. 7041.
21. *Zeng Q., Duan Q.L., Sun D.X. et al.* // Fuel. 2020. V. 277. 118217.
22. *Golovastov S.V., Bocharnikov V.M., Samoilova A.A.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. Issue 30. P. 13322.
23. *Rudy W., Dabkowski A., Teodorczyk A.* // Ibid. 2014. V. 39. Issue 35. P. 20388.
24. *Fernandez-Cosials K., Jimenez G., Serrano C., Peinado A., Ibañez L.* // J. Nucl. Eng. Radiat. Sci. 2018. V. 4. № 3. 031016; <https://doi.org/10.1115/1.4038595>
25. *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Smygalina A.E. et al.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. Issue 16. P. 11902.
26. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.
27. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Гальбурт В.А.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 5. С. 35.
28. *Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Яковенко И.С.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 9.
29. *O Conaire M., Curran H.J., Simmie J.M. et al.* // Intern. J. Chem. Kinet. 2004. V. 36. № 11. P. 603.
30. *Варнац Ю., Маас У., Диббл Р.* Горение. М.: Физматлит, 2006.
31. *Golovastov S., Bocharnikov V.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. Issue 14. P. 10956.