

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

КЛАССИФИКАЦИЯ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ БЫСТРЫХ ВОЛН ГОРЕНИЯ И ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В КАНАЛАХ

© 2020 г. А. Д. Киверин^{1*}, А. Е. Смыгалина¹, И. С. Яковенко¹

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

*E-mail: alexeykiverin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2020;

после доработки 15.01.2020;

принята в печать 20.02.2020

В работе представлены обзор и классификация сценариев развития финальной стадии ускорения пламени в каналах и трубах, включая переход в детонацию на фронте пламени и формирование условий очагового воспламенения перед фронтом. На основе предложенной авторами классификации высокоскоростных режимов горения сформулирован подход к численной оценке детонационной способности горючих газообразных смесей и показана принципиальная возможность практического использования такого подхода. Представлены количественные оценки критических условий устойчивого формирования детонации в результате ускорения пламени и при перепуске детонационной волны, согласующиеся с доступными в литературе экспериментальными данными.

Ключевые слова: ускоренное пламя, переход в детонацию, детонационная способность, критические условия, водород, ацетилен.

DOI: 10.31857/S0207401X2008004X

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных подходов к энергоэффективному использованию горючих газообразных смесей является их сжигание в детонационном режиме. В настоящее время из разрабатываемых концепций прямоточных воздушно-реактивных двигателей можно выделить двигатели с непрерывным детонационным сжиганием в кольцевой камере сгорания [1]. К основным проблемам, связанным с разработкой такого рода технических систем, следует отнести управляемое надежное инициирование детонации и дальнейшую стабилизацию детонации в камере сгорания. Для решения обеих задач первостепенным является максимально точное определение пределов формирования детонации и ее устойчивости в заданных условиях. К факторам, определяющим критерии устойчивого формирования и развития детонации, в первую очередь следует отнести химический состав используемой смеси и ее термодинамическое состояние при ее подготовке и подаче в тракт камеры сгорания.

На данном этапе общепринятым способом инициирования детонации является ее формирование в результате ускорения пламени в отдельном канале (форкамере) и перепуск в основной тракт камеры сгорания [1, 2]. Форкамера, как правило, заполняется наиболее химически активной смесью, способной к детонации в реализуемых условиях. Процесс формирования детонации в результате ускорения

пламени, перехода к ней (ПГД) и процесс перепуска с последующим инициированием детонации в основном тракте определенным образом зависят от химического состава используемой смеси и ее термодинамического состояния. Как показывает практика [3] и детальный анализ возможных сценариев развития процесса формирования детонации [4], конкретный режим (с успешным формированием детонации или без) во многом определяется именно начальным состоянием горючей смеси. Важную роль также играет конкретная геометрическая конфигурация тракта, в котором создаются условия для формирования детонации.

Известны концепции [5], в которых отмечается, что турбулизация потока за счет усложнения геометрии канала способствует его ускорению, сокращению преддетонационного расстояния и тем самым организует процесс перехода к детонации даже в смесях, менее способных к детонации. Тем не менее, определение возможности реализации ПГД в зависимости от состава и термодинамического состояния смеси является первостепенным. Установлено, что сценарий ПГД в каналах сложной геометрии [6, 7] отличается от сценариев, реализуемых в гладких каналах, но условия реализации ПГД связаны с максимально достижимой скоростью потока, ускоряемого при распространении пламени в канале, а ее значение определяется составом смеси и ее начальным термодинамиче-

ским состоянием. Этот вопрос затронут в недавних работах [4, 8], в которых предложена методика определения возможности реализации ПГД в различных газообразных составах, апробированная на примере водородно-воздушных смесей. В частности было показано, что расчет максимально достижимой при ускорении пламени скорости потока и соответствующих параметров в области торможения потока позволяет достаточно точно оценить пределы ПГД в загроможденных каналах. Пределы ПГД в таких условиях исследуются экспериментально на протяжении многих лет [3, 9, 10] в связи с другой прикладной задачей определения критических условий формирования детонации для обеспечения взрывобезопасности промышленных объектов, работа которых связана с рисками накопления, аварийного выброса и воспламенения газовых смесей.

В настоящей работе представлен обзор сценариев развития высокоскоростных волн горения на финальных стадиях ускоренного распространения пламени в канале. Классификация сценариев расширена по сравнению с предложенной в недавних работах [4, 8], а апробация предложенной методики для оценки критериев формирования детонации в газообразных смесях проведена для более широкого класса горючих составов, включая смеси на основе водорода и ацетилена.

ОБЗОР СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ БЫСТРОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В КАНАЛЕ

Анализ экспериментальных данных по ускорению пламени и переходу горения в детонацию в каналах указывает на несколько основных сценариев развития процесса. Впервые эти сценарии продемонстрированы в работе [11], где экспериментально исследовался ПГД в стехиометрической водород-кислородной смеси при нормальном давлении и в эквимольной водород-кислородной смеси при пониженном давлении (~0.1 атм). При этом в первом случае наблюдался сценарий с формированием детонации на фронте пламени, тогда как во втором случае обнаружено, что имеет место три различных режима: 1) формирование детонации на фронте; 2) формирование волны быстрого горения, распространяющейся вдоль пограничного слоя и формирующей детонацию при взаимодействии с ударной волной, бегущей на расстоянии перед фронтом пламени; 3) формирование очага воспламенения на контактном разрыве, возникающем в точке пересечения двух ударных волн.

Позднее, в работе [12], отдельно исследован режим воспламенения и формирования детонации в результате пересечения двух ударных волн в одномерном приближении, а в двухмерном обобщении [13] показано, что наиболее вероятным является формирование таких очагов в области пограничного слоя, где имеет место перераспреде-

ние тепла, связанное со структурой пограничного слоя [14]. В работе [15] продемонстрировано, что аналогичный сценарий формирования очагов воспламенения перед фронтом пламени наблюдается в углеводородно-воздушной смеси. Причем на стадии, предшествующей очаговому самовоспламенению и формированию детонации, наблюдалось квазистационарное распространение пламени со скоростью порядка скорости ведущей ударной волны.

В работах [3, 9, 10, 16], посвященных исследованию ускорения пламени в загроможденных каналах, также наблюдались режимы распространения пламени со сверхзвуковой по отношению к невозмущенной среде скоростью, получившие название “запертого” пламени (или “*choked flame*”) [16]. В недавней работе [17] методами численного моделирования исследована структура такого пламени с учетом предыстории формирования и распространения волн сжатия в процессе его ускорения [18, 19], а также их взаимодействия с фронтом пламени. Следует отметить, что режим распространения пламени на этой стадии соответствует режиму дефлаграции Чепмена–Жуге, критического режима распространения пламени. Таким образом, в отсутствие внешних факторов достигаемое на этой стадии значение скорости распространения пламени является максимально возможным. Анализ структуры фронта пламени [17] на этой стадии показал, что в зависимости от особенностей протекания кинетики горения на фоне непрерывно нарастающего на фронте пламени давления возможны два сценария развития процесса: процесс выходит на квазистационарный режим со скоростью пламени порядка скорости звука в продуктах горения или пламя ускоряется далее и формирование сильной ударной волны на фронте ведет к формированию детонации.

Необходимо добавить, что при рассмотрении менее активных реагирующих смесей, для которых свойственно формирование квазистационарного режима, условия, достигаемые в потоке в процессе ускорения пламени, соответствуют высоким степеням сжатия смеси перед фронтом пламени. В этом случае температура смеси перед фронтом пламени может достигать значений, соответствующих коротким задержкам воспламенения. Если характерная скорость распространения пламени относительно сжатой смеси (u_f) оказывается таковой, что $L_f/u_f > \tau$, где L_f – ширина фронта пламени, а τ – задержка воспламенения непосредственно перед фронтом пламени, то смесь в области перед фронтом может самовоспламениться и произойдет переход от дефлагационного горения к быстрой волне горения, распространяющейся по смеси, реагирующей при фоновой температуре [20]. Такой режим соответствует режиму 2 из работы [11] и также наблюдался в работе [21].

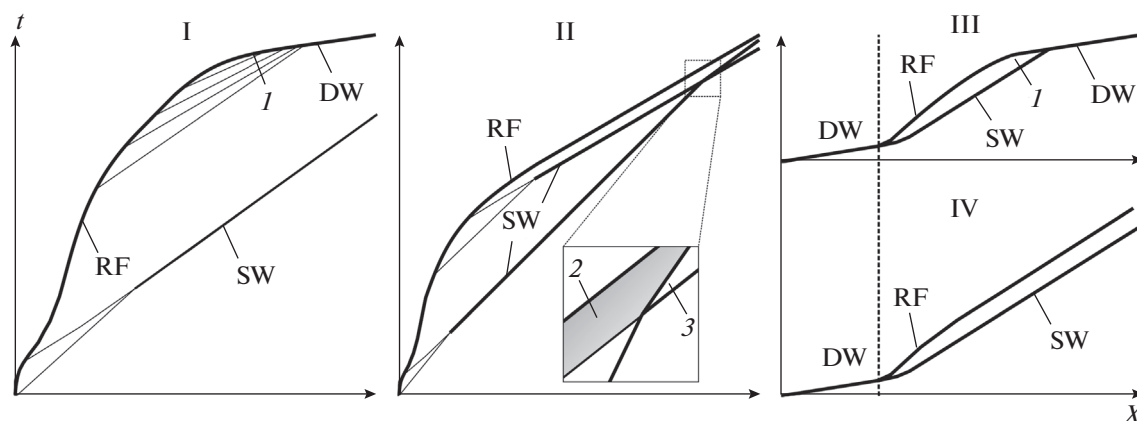


Рис. 1. Характерные пространственно-временные картины развития процесса ускорения пламени (режимы I и II) и перепуска детонации (режимы III и IV): RF — фронт реакции, SW — ударная волна, DW — детонационная волна; 1 — точка перехода к детонации на фронте пламени; 2 — область потенциально возможного независимого воспламенения смеси перед фронтом высокоскоростного пламени; 3 — контактный разрыв, формируемый в результате пересечения двух ударных волн — также область потенциального воспламенения; вертикальная штриховая линия — сечение распада детонации при ее перепуске в основной тракт.

Помимо описанных выше режимов с формированием детонации на фронте пламени и с самовоспламенением в области перед ним, в системе может быть реализован сценарий с самовоспламенением на расстоянии перед фронтом (режим 3 из работы [11]). Как правило, это связано с особенностями постановки задачи и развитием процесса на стадиях, предшествующих существенному ускорению пламени. Например, при инициировании горения точечным источником на оси канала вблизи одного из его торцов процесс ускорения пламени развивается в три стадии.

На первой стадии пламя распространяется от точечного источника, заполняет все сечение канала и распространяется вдоль стенок канала в форме так называемого *“finger flame”*. Эта стадия характеризуется экспоненциальным нарастанием скорости распространения [22]. Далее, пламя отходит на значительное расстояние от заднего торца канала, и важную роль в динамике потока, равно как и самого фронта пламени, начинает играть волна разрежения [23], которая тормозит распространение пламени. При этом формируется пламя тюльпанообразной формы (*“tulip flame”*). Формируемый перед фронтом пламени поток смеси, вытесняемой расширяющимися продуктами горения, эволюционирует и увлекает пламя в новую фазу ускорения. При этом чем больше скорость пламени, тем больше скорость потока и наоборот, что определяет положительную обратную связь и, соответственно, экспоненциальный характер ускорения пламени на этой стадии. Таким образом, в процессе ускорения пламени по описанному сценарию в области течения перед фронтом пламени формируются две ударные волны, соответствующие двум последовательным фазам экспоненци-

ального ускорения пламени, разделенным фазой его торможения. Эти волны можно отчетливо наблюдать в экспериментальных работах [11, 15], а в работе [15] зарегистрировано их взаимодействие и формирование очага воспламенения на контактном разрыве, образованном в результате такого взаимодействия.

На рис. 1 схематически показаны основные сценарии формирования быстрых волн горения в каналах, включая сценарий ускорения пламени и формирования детонации на фронте (I) и установление квазистационарного режима (II). Также на рис. 1 представлены возможные сценарии, реализуемые при перепуске детонации (III и IV). В случае, если детонация оказывается неустойчивой, она распадается на убегающий вперед ударный фронт и фронт волны реакции, распространяющийся в потоке сжатой смеси. Такая картина развития процесса в некоторой степени подобна наблюдаемой в случае ускорения пламени, где быстрая волна горения распространяется в потоке предварительно сжатой смеси, как это описано выше. Можно предположить, что в случае перепуска детонации дальнейшее развитие процесса протекает согласно аналогичным сценариям за тем исключением, что предысторией процесса не предусмотрен сценарий с взаимодействием нескольких распространяющихся друг за другом ударных волн, что исключает самовоспламенение смеси на контактном разрыве, как в случае II (рис. 1). Таким образом, предложенная в работах [4, 8] методика оценки условий возникновения ПГД для данного случая должна однозначно предсказывать границу реализации режимов III и IV.

Однако при распаде детонационной волны в зависимости от того, каким образом организован этот распад (перепуск детонации из широкого ка-

нала в узкий [24, 25], перепуск через перфорированную перегородку [26], перепуск из более активной смеси в менее активную [27] и т.д.), дальнейшее развитие процесса может быть усложнено взаимодействием пламени с поперечными ударными волнами. Как показано в работе [17], поперечные волны препятствуют формированию устойчивой структуры “запертого” пламени, что может исказить условия ПГД. И если в рассмотренном в работе [17] случае загроможденного канала, независимо от этого ПГД реализуется в результате отражения ведущей ударной волны от препятствий по механизму, описанному в работах [6, 7], то в случае гладкого канала ПГД не произойдет вовсе. Таким образом, в действительности пределы реализации ПГД при перепуске детонации могут оказаться уже, чем рассчитанные согласно предложенной в работах [4, 8] методике.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с предложенной в работах [4, 8] методикой, сформулируем следующую постановку задачи. Проведем расчеты параметров горения (скорость горения, ширина фронта пламени, скорость звука в продуктах горения, время задержки воспламенения в сжатой смеси перед фронтом ускоренного пламени) различных горючих смесей в разных условиях, варьируемых вдоль ударных адиабат, построенных из начального состояния смеси и отражающих диапазон состояний газа как перед фронтом пламени на фазе его ускорения [28], так и за отошедшей ударной волной при распаде детонации в ходе ее перепуска. Ограничимся для определенности четырьмя стехиометрическими смесями: водород–кислород, водород–воздух, ацетилен–кислород и ацетилен–воздух, а начальную температуру зафиксируем на уровне комнатной (300 К). Начальное давление будем варьировать в диапазоне 0.01–1.0 атм. Расчеты будем проводить в одномерной постановке на основе уравнений газодинамики сжимаемого вязкого теплопроводного газа с учетом многокомпонентной диффузии и химических превращений, рассчитываемых согласно детальным кинетическим механизмам для окисления водорода [29] и ацетилена [30]. Согласно методике, предложенной в работах [4, 8], в качестве выходных данных будем регистрировать скорость горения и скорость звука в продуктах горения вдоль ударных адиабат. Расчет времени задержки воспламенения в сжатой смеси перед фронтом ускоренного пламени будем проводить в нульмерном приближении.

На основе массива полученных расчетных данных определим три базовых критерия: газодинамический критерий формирования “запертого” пламени ($u = a_b$ — скорость потока перед фронтом пламени u равна скорости звука в продуктах горе-

ния a_b); критерий устойчивости “запертого” пламени ($\delta u_f > \delta a_b$ — изменение скорости горения при дополнительном сжатии происходит интенсивнее соответствующего роста скорости звука в продуктах); критерий независимого самовоспламенения в области перед фронтом пламени ($\tau < L_f/u_f$). Все три критерия, рассчитанные для четырех смесей, показаны на рис. 2. Из полученных данных определим критерии реализации трех принципиально различных сценариев: А — переход в детонацию, В — формирование квазистационарной быстрой волны горения, С — самовоспламенение непосредственно перед фронтом быстрой волны горения. Последний сценарий может также в ряде случаев стать причиной формирования детонации, равно как и очаговое самовоспламенение, реализуемое перед фронтом пламени на контактном разрыве 3 (рис. 1, II).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опишем подробно алгоритм получения данных, представленных на рис. 2, и проведем их анализ. Как показывает анализ экспериментальных [28] и расчетных данных [4, 8, 17], в процессе ускорения пламени состояние смеси перед фронтом пламени меняется вдоль ударной адиабаты, построенной для ее начального состояния. Таким образом, для всех стадий развития процесса на преддетонационной стадии характеристики горения могут быть определены из серии расчетов вдоль ударной адиабаты. Определив в серии расчетов параметры вдоль семейства ударных адиабат, построенных для различных начальных условий, получаем три множества точек, в которых выполняются обсуждаемые выше критерии: $u = a_b$, $\delta u_f = \delta a_b$ и $\tau < L_f/u_f$. Если в ходе развития процесса (в ходе изменения параметров вдоль отдельно взятой ударной адиабаты) первым достигается состояние, при котором $u = a_b$, то при соответствующих начальных условиях (составе смеси и ее термодинамическом состоянии) в результате ускорения пламени реализуется квазистационарный режим высокоскоростного распространения пламени (область 3 на рис. 2). Если же первым достигается критерий $\delta u_f = \delta a_b$, то имеет место ПГД на фронте пламени (область 1 на рис. 2). Случай, в котором в первую очередь реализуется критерий $\tau < L_f/u_f$, соответствует режимам с высокой степенью сжатия смеси перед фронтом ускоряющегося пламени, где реализуется переход от дефлаграционного горения к горению в среде, реагирующей при фоновой температуре (область 2 на рис. 2).

Отметим, что в отдельных случаях может иметь место пересечение областей 1 и 2 (рис. 2а). В таком случае равновероятно (в пределах погрешности определения начальных условий) могут реализоваться различные режимы, что наблюдалось, на-

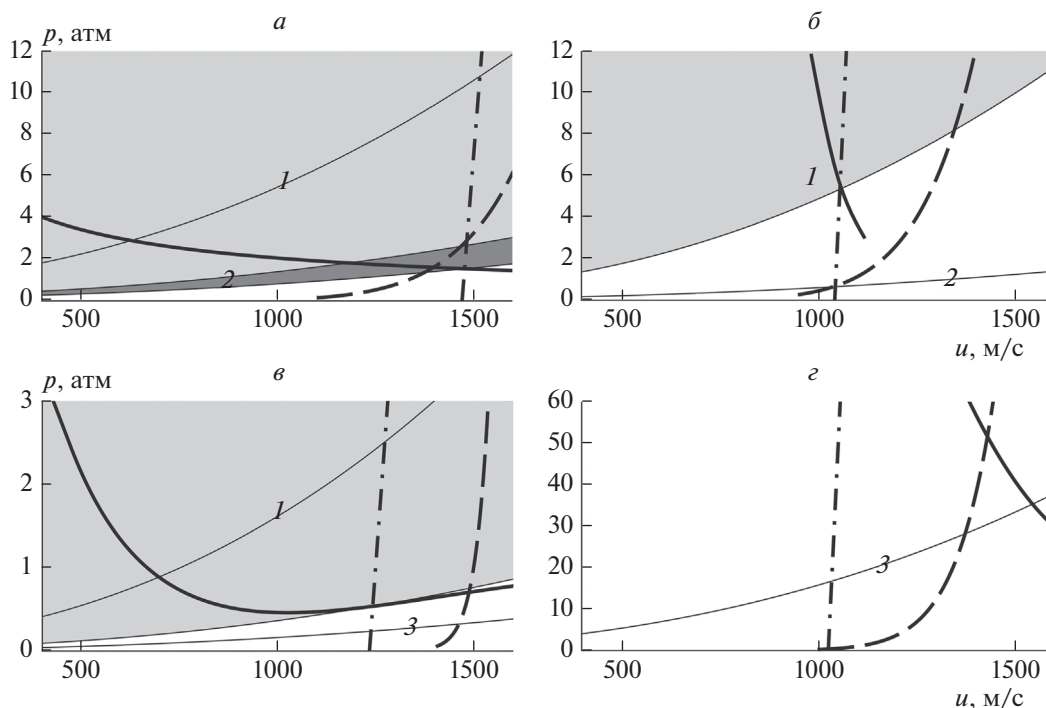


Рис. 2. Диаграмма критериев — $u = a_b$ (штрих-пунктирные линии), $\delta u_f = \delta a_b$ (жирные сплошные линии) и $\tau = L_f/u_f$ (штриховые линии) в зависимости от параметров смеси перед фронтом пламени (p — давление, u — скорость потока): a — водородно-кислородная смесь, $б$ — водородно-воздушная смесь, $в$ — ацетилен-кислородная смесь, $г$ — ацетилен-воздушная смесь. Тонкими линиями показаны адиабаты Гюгонио для свежей смеси, построенные для различных начальных условий: a — $p_0 = 0.105, 0.180, 1.0$ атм (снизу вверх); $б$ — $0.05, 0.4$ атм; $в$ — $0.01, 0.025, 0.1$ атм; $г$ — 1.0 атм. 1 — область, где развитие высокоскоростного горения приводит к формированию детонации на фронте пламени (серая область); 2 — область, где становится возможным независимое воспламенение смеси перед фронтом высокоскоростного пламени; 3 — область, где высокоскоростная волна горения распространяется в квазистационарном режиме со скоростью порядка скорости звука в продуктах горения.

пример, в работе [11] в эквимольной водород-кислородной смеси при пониженном начальном давлении ($p_0 \sim 0.1$ атм). Ранее, в работе [4] было установлено, что в эквимольной смеси диаграмма, показанная на рис. 2, подобна той, что представлена здесь для стехиометрической смеси, и в области начальных давлений $p_0 \sim 0.1$ атм имеет место равновесная реализация различных сценариев развития быстрой волны горения.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными по критическим начальным давлениям смесей, при которых становится возможным формирование устойчивой детонации в результате ускорения пламени [31] и перепуска детонации [24, 25]. В работе [31] показано, что формирование детонации в водородно-воздушной смеси становится возможным только при начальном давлении смеси порядка 0.42 атм, тогда как при более низких давлениях переход в детонацию не наблюдается. Расчет согласно предложенной методике дает оценку 0.4 атм (рис. 2б). Анализ результатов работ по перепуску детонации ацетилена из широкого канала в узкий [24, 25] показывает, что реиницирование детонационной волны

происходит только в ацетилен-кислородной смеси при давлениях выше ~ 0.028 и ~ 0.015 атм соответственно, что хорошо согласуется с значением критического начального давления ~ 0.022 атм (рис. 2в), полученным в результате расчетов.

В случае более низких давлений базовым является режим квазистационарного распространения пламени со скоростью порядка скорости звука в продуктах горения (режимы II и IV, рис. 1). При этом выравнивание давления и температуры перед фронтом волнами сжатия может обеспечить условия воспламенения в области 2 на расстоянии L перед фронтом при выполнении условия $\tau < L/u_f$. Как показывает анализ доступных в литературе экспериментальных данных, воспламенение обычно связано с пересечением двух ударных волн перед фронтом пламени (на контактном разрыве 3, рис. 1). В случае перепуска детонации определяющим процессом является распад детонации на границе между форкамерой и основным трактом. Вперед выходит одна ударная волна, за которой следом распространяется волна горения, сформированная на контактном разрыве между сжатой смесью и истекающими в основной тракт продуктами

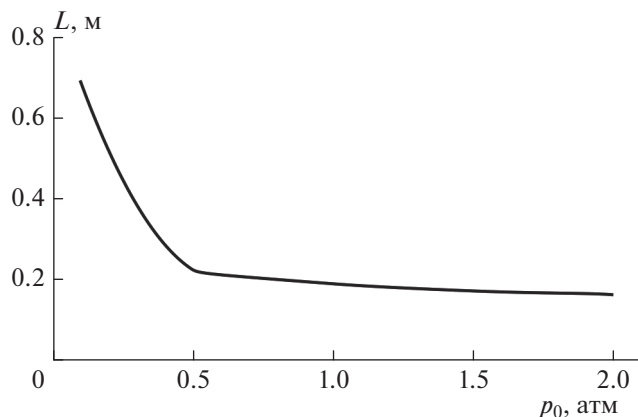


Рис. 3. Зависимость расстояния, на котором может произойти воспламенение смеси непосредственно перед фронтом высокоскоростного пламени (рис. 1, режим II), от начального давления стехиометрической ацетилен-воздушной смеси.

детонации (рис. 1, режимы III и IV). Сформированный квазистационарный комплекс, состоящий из ударной волны и высокоскоростного фронта пламени, характеризуется небольшой протяженностью. В то же время, согласно расчетам (рис. 3), расстояние от фронта пламени L , на котором достигается критерий $\tau < L/u_f$, должно быть довольно большим. В результате воспламенение перед фронтом пламени в случае перепуска детонации не происходит.

С учетом результатов проведенного параметрического исследования (рис. 2, 3) и классификации возможных режимов развития горения при ускорении пламени и при перепуске детонации можно сделать следующие выводы. Ускорение пламени в канале в широком диапазоне параметров обеспечивает условия для формирования самоподдерживаемых высокоскоростных режимов горения. Как правило, развитие горения в этих режимах ведет к реализации перехода к детонации или к независимому воспламенению смеси перед фронтом пламени. Последнее также может способствовать формированию детонации с вероятностью, определяемой конкретными условиями, включая геометрию канала и устройство системы зажигания.

При перепуске детонации критерий перехода к детонации на фронте является еще более принципиальным, если цель — в получении на выходе именно детонационного режима горения. Согласно проведенным расчетам, в области низких давлений (ниже 0.1 атм) формирование детонации в результате ускорения пламени и ее устойчивое реиницирование в результате перепуска возможно только при использовании наиболее химически активных смесей, водородно-кислородной или ацетилен-кислородной. При умеренно пониженных

давлениях и в области нормального давления можно также использовать водородно-воздушную смесь. В углеводородно-воздушных смесях устойчивое формирование детонации возможно только в случае повышенного давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе детального анализа имеющихся в литературе экспериментальных и расчетных данных предложена классификация сценариев развития быстрых волн горения в каналах и трубах, включая сценарии с переходом в детонацию и независимым самовоспламенением на расстоянии перед фронтом пламени. Предложена концепция расчета пределов устойчивого инициирования и перепуска детонации на основе метода параметрического анализа. Проведенные расчеты для четырех референтных смесей хорошо согласуются по критерию устойчивого перехода к детонации с доступными в литературе экспериментальными данными. В технических решениях для разработки детонационных энергоустановок предлагается использовать наиболее жесткий критерий, заведомо определяющий устойчивый переход в детонацию. При решении задач взрывобезопасности необходимо также учитывать особенности развития течений в условиях реального объема, в котором развивается взрыв газообразной смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frolov S.M., Zvegintsev V.I., Ivanov V.S. et al. // Intern. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. P. 7515.
2. Zhang H., Liu W., Liu S. // Ibid. 2017. V. 42. № 5. P. 3363.
3. Lee J., Knystautas R., Chan C. // Proc. 20th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1985. P. 1663.
4. Kiverin A., Yakovenko I. // Combust. Sci. Technol. 2020. V. 192. № 1. P. 112.
5. Фролов С.М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31.
6. Медведев С.П., Поленов А.Н., Хомик С.В., Гельфанд Б.Е. // Хим. физика. 2010. Т. 4. № 1. С. 70.
7. Kellenberger M., Ciccarelli G. // Proc. Combust. Inst. 2015. V. 35. P. 2109.
8. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. // Math. Model. Nat. Phenom. 2018. V. 13. P. 54.
9. Peraldi O., Knystautas R., Lee J. // Proc. 21st Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst. 1988. P. 1629.
10. Cross M., Ciccarelli G. // J. Loss Prev. Process Ind. 2015. V. 36. P. 380.
11. Urtiew P.A., Oppenheim A.K. // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1966. V. 295. P. 13.
12. Taki S., Fujiwara T. // Proc. 13th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1971. P. 1119.

13. *Dzieminska E., Hayashi A.K.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38. P. 4185.
14. *Kiverin, A.D., Yakovenko, I.S.* // Phys. Rev. Fluids. 2018. V. 3. P. 053201.
15. *Smirnov N.N., Tyurnikov M.V.* // Combust. and Flame. 1996. V. 100. P. 661.
16. *Alekseev V.I., Kuznetsov M.S., Yankin Yu.G., Dorofeev S.B.* // J. Loss Prev. Process Ind. 2001. V. 14. P. 591.
17. *Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Ivanov M.F.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. P. 22465.
18. *Kurylo J., Dwyer H.A., Oppenheim A.K.* // AIAA J. 1980. V. 18. P. 302.
19. *Deshaies B., Joulin G.* // Combust. and Flame. 1989. V. 77. P. 201.
20. *Zeldovich Y.* // Ibid. 1980. V. 39. P. 219.
21. *Kuznetsov M., Yanez J., Grune J.* // Proc. 30th Intern. Sympos. on Shock Waves. V. 1 New York, CA: Springer, 2017. P. 385;
https://doi.org/10.1007/978-3-319-46213-4_65
22. *Liberman M.A., Ivanov M.F., Kiverin A.D. et al.* // Acta Astronaut. 2010. V. 67. P. 688.
23. *Adams G.K., Pack D.C.* // Proc. 7th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1958. P. 812.
24. *Манжале́й В.И.* // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28. № 3. С. 93.
25. *Wu Y., Zheng Q., Weng C.* // Energy. 2018. V. 143. P. 554.
26. *Khomik S., Veyssiere B., Medvedev S. et al.* // Shock Waves. 2012. V. 22.
27. *Li J., Lai W.H., Chung K., Lu F.K.* // Combust. and Flame. 2008. V. 154. P. 331.
28. *Silvestrini M., Genova B., Parisi G. et al.* // J. Loss Prev. Process Ind. 2008. V. 21. P. 555.
29. *Keromnes A., Metcalfe W.K., Heufer K.A. et al.* // Combust. and Flame. 2013. V. 160. P. 995.
30. *Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M. et al.:* http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
31. *Васильев А.А.* // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 3. С. 25.