

УДК 534.222.2

ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ В СТОЛ ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО АППАРАТА

И. С. Батраев, Д. К. Рыбин, В. Ю. Ульяницкий

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, ibatraev@gmail.com

На детонационном комплексе CCDS2000 для ацетилен, этилена, пропилен и многокомпонентного топлива МАФ проведены эксперименты по измерению скорости детонации и регистрации ячейки детонационного фронта в трубе диаметром 26 мм длиной 2 м при атмосферном давлении в стехиометрических смесях, разбавляемых азотом до воздушных концентраций, и для топливовоздушных с вариацией содержания топлива в них. При проточной подаче компонентов взрывчатой смеси путем стратификации заряда взрывчатой смеси в зоне инициирования удалось добиться устойчивого возбуждения самоподдерживающейся детонации вплоть до предельных (спиновых) режимов. Определены концентрационные пределы существования детонации. В топливовоздушных смесях ацетилен и этилен при отходе от пределов наблюдается многофронтная детонация, а для пропилен и МАФ диаметр трубы 26 мм является околоритическим — во всем диапазоне существования реализуется лишь одно- и двухголовый спин. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом.

Ключевые слова: газовая детонация, параметры детонации, ячеистая структура фронта детонации, ацетилен, этилен, пропилен, метилацетилен-алленовая фракция (МАФ), газ МАРР.

DOI 10.15372/FGV20210103

ВВЕДЕНИЕ

Большинство известных экспериментальных данных по взрывам топливовоздушных газовых смесей получены в предварительно вакуумированных камерах, где в результате длительной выдержки (до нескольких десятков минут) происходит диффузионное смешение компонентов взрывчатой смеси до однородного состава (см., например, [1]). При этом газовая детонация, как наиболее разрушительная стадия газовых взрывов, изучалась для обеспечения необходимых мер взрывобезопасности. В настоящее время горючие газы широко используются в современной промышленности: в энергетике, на транспорте, в химической промышленности и т. д., причем все более востребованным становится применение управляемой газовой детонации. Это и традиционное детонационное напыление, и его новая модификация — суспензионное детонационное напыление [2], и получение наноразмерного углерода путем детонационного разложения ацетилен [3], и разработки перспективных двигателей с импульсной [4] либо непрерывной детонацией [5]. Как

правило, самопроизвольные взрывы топливовоздушных смесей или детонация в промышленных детонационных аппаратах и детонационных двигателях возникают в условиях кратковременного (в пределах долей секунды) взаимодействия компонентов смеси на стадии смешения потоков топлива и окислителя. При этом сложно говорить об однородности смеси, скорее, можно говорить о детонации в плохо перемешанной смеси. Следует заметить, что в литературе практически нет исследований детонации в такой постановке. Изложенные в данной статье результаты экспериментов выполнены на стенде с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси (созданном на базе промышленного ИГДА [6]) и позволяют воспроизвести детонацию в условиях более адекватных практическим задачам.

Из широкого спектра газовых топлив в детонационном напылении практически не используются труднодетонирующие метан и этан, ограниченно применяются водород [7] (из-за окислительного состава продуктов детонации (ПД)) и пропанобутановая смесь [8] (из-за затрудненного возбуждения детонации и относительно низкой температуры ПД), а наиболее востребованным является легкодетониру-

ший ацетилен, который для управления термическим воздействием на частицы напыляемого порошка разбавляется либо менее активными углеводородами (пропиленом, пропаном или бутаном) [9, 10], либо инертным азотом [11]. В широком спектре приложений хорошей заменой ацетилену оказался МАФ (метилацетилен-алленовая фракция) [12] и, как показано в [13], определенные достоинства имеют этилен и пропилен. Детонация их кислородных смесей возбуждается не хуже, чем в ацетиленокислородных, и температура ПД существенно превышает температуру ПД для смесей пропана или бутана.

Детонация при смешении потоков топлива и окислителя реализована в данной работе в импульсном газодетонационном аппарате (ИГДА), в котором смесь формируется за счет проточной подачи компонентов взрывчатого состава. Для изучения в качестве топлив для детонационного напыления выбраны наиболее пригодные — ацетилен, этилен, пропилен и МАФ.

ПАРАМЕТРЫ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ТОПЛИВОКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ, РАЗБАВЛЕННЫХ АЗОТОМ

Для нанесения функциональных покрытий методом детонационного напыления преимущественно используют взрывчатые смеси в диапазоне составов от эквимолярного до стехиометрического, где динамический напор ПД достигает наибольших значений, обеспечивая максимальное ускорение напыляемых частиц, что является определяющим для достижения наибольшей плотности, необходимой для высокого качества покрытия. Требуемый в зависимости от температуры плавления порошка нагрев достигается за счет разбавления выбранной топливокислородной смеси менее активным топливом или азотом. В представляемом исследовании в качестве базового выбран стехиометрический состав смесей ацетилена, этилена, пропилена и многокомпонентного топлива МАФ. Параметры детонации исследуемых смесей рассчитаны с помощью программного кода Deton, созданного на основе модели детонации с мгновенной химической реакцией на фронте [14].

Как отмечалось в [12], состав МАФ точно не регламентируется. При (60 ÷ 70)%-м содержании метилацетилена и аллена оставшаяся часть (30 ÷ 40 %) может включать в себя

Параметры детонации стехиометрических составов исследуемых топливных смесей

| Стехиометрический состав смеси | D , м/с | T , К | G , МПа |
|--------------------------------|-----------|---------|-----------|
| $C_2H_2 + 2.5O_2$ | 2 424 | 4 215 | 1.38 |
| $C_2H_4 + 3O_2$ | 2 374 | 3 938 | 1.38 |
| $C_3H_6 + 4.5O_2$ | 2 354 | 3 915 | 1.49 |
| МАФ + $4.2O_2$ | 2 368 | 4 000 | 1.5 |
| МАРР + $4.8O_2$ | 2 362 | 3 959 | 1.51 |

различные менее активные углеводороды: пропилен, пропан или бутан в произвольном соотношении между собой. Для сравнения расчеты выполнены для состава, аналогичного [12] МАФ ($C_3H_{4.9}$) и принятого в зарубежной литературе [15] МАРР ($C_{3.3}H_{5.8}$).

Параметры детонации стехиометрических составов исследуемых топлив представлены в таблице.

В первую очередь анализировались температура ПД (T) и динамический напор ПД (G) — определяющие параметры детонационного напыления. Влияние разбавления азотом исследуемых смесей иллюстрирует рис. 1.

Расчеты показывают, что с увеличением содержания азота во взрывчатой смеси значения параметров детонации монотонно снижаются для всех топлив. В стехиометрических топливоздушных смесях температура ПД примерно на 25 % (рис. 1,а), а динамический напор — вдвое (рис. 1,б) ниже соответствующих значений для неразбавленных смесей. В смесях ацетилена температура ПД в среднем на 7 % выше, чем в смесях этилена, пропилена и МАФ. Иной характер носит зависимость динамического напора ПД. В начале разбавления динамический напор ПД на 6 ÷ 7 % выше в смесях пропилена и МАФ относительно смесей ацетилена и этилена. По мере разбавления различие уменьшается и практически исчезает при концентрациях азота, близких к соотношению $N_2/O_2 \approx 78/21$ в топливоздушной смеси. Различия расчетных параметров для МАФ и МАРР во всем диапазоне не превышает 1 %.

ПАРАМЕТРЫ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Поскольку пакет Deton не работает с появлением свободного углерода в ПД, т. е. ограни-

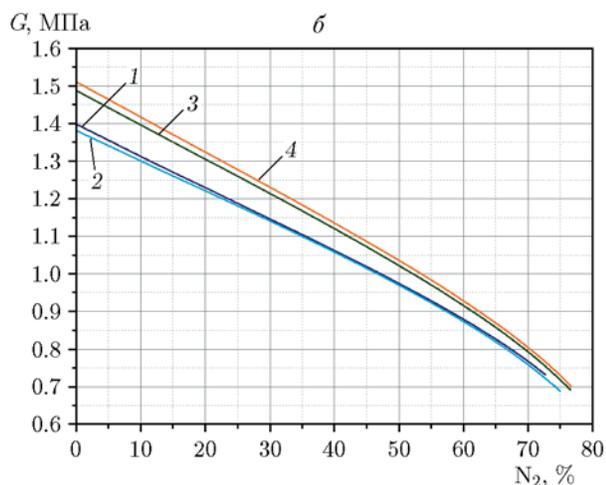
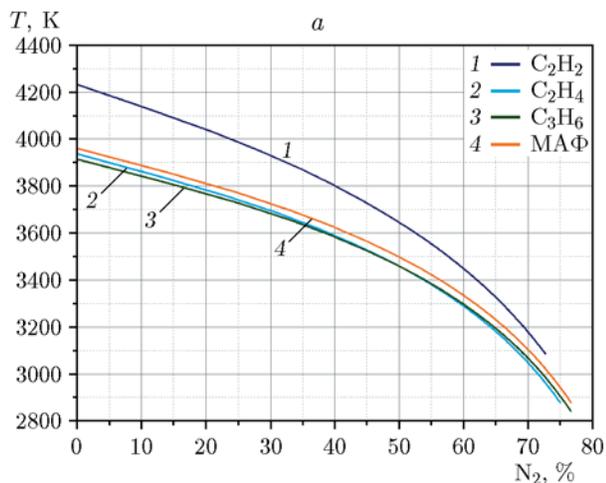


Рис. 1. Зависимости температуры (а) и динамического напора (б) ПД от содержания азота в стехиометрической смеси

чением является кислородоуглеродный баланс исходной смеси $O/C < 1$, то расчеты для топливовоздушных смесей на верхнем пределе ограничены содержанием ацетилена и этилена в смеси 17.3 %, пропилена и МАФ — 12.2 %, нижние границы выбраны в соответствии с концентрационными пределами, полученными в эксперименте.

Результаты расчетов для топливовоздушных смесей представлены на рис. 2. Стехиометрическим составам соответствует содержание топлива $C_{fuel} = 7.7, 6.5, 4.5$ и 4.7 % для ацетилена, этилена, пропилена и МАФ соответственно.

Как показывают расчеты, для смесей ацетилена и этилена значения температуры и динамического напора ПД в области бедных смесей практически не отличаются. Аналогичное

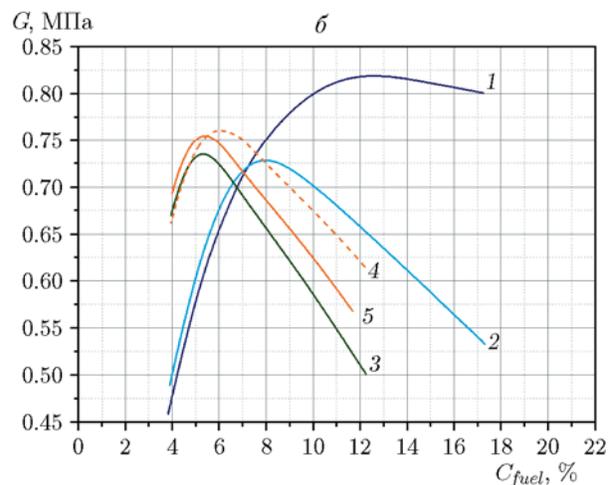
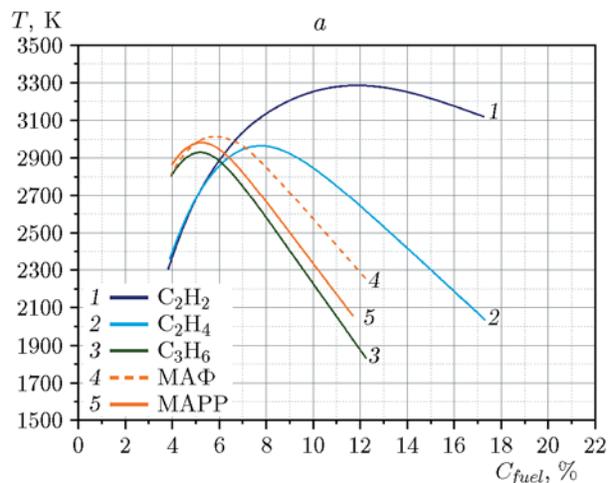


Рис. 2. Зависимости температуры (а) и динамического напора (б) ПД от содержания топлива в топливовоздушной смеси

соотношение у смесей пропилена и МАФ, при этом их различие с этиленовыми и ацетиленовыми смесями по обоим параметрам около 8 %. В богатых смесях параметры ПД для ацетилена заметно выше параметров смесей остальных топлив с промежуточным их расположением для этилена. Ранее отмеченное несущественное различие для стехиометрических составов МАФ и МАРР заметно меняется как при обогащении (с превышением параметров МАФ над МАРР), так и при обеднении смеси (с превышением параметров МАРР над МАФ).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТОМ

Схема экспериментального стенда для измерения скорости детонации и фиксации ячеи-

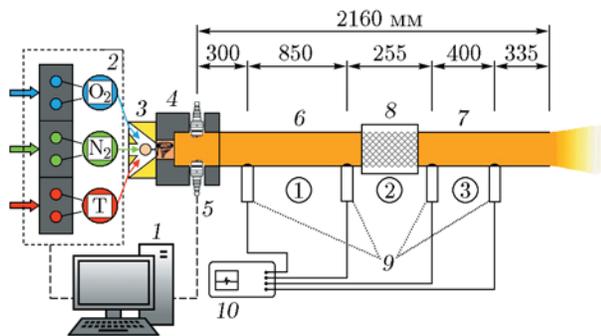


Рис. 3. Схема стенда для регистрации детонации:

1 — управляющий компьютер, 2 — газораспределитель, 3 — ствольный клапан, 4 — камера зажигания, 5 — свечи зажигания, 6 — казенная секция, 7 — дульная секция, 8 — втулка для фольги, 9 — датчики давления, 10 — осциллограф

стой структуры детонационного фронта представлена на рис. 3.

По команде управляющего компьютера 1 открывались клапаны газораспределителя 2 и компоненты взрывчатой смеси по трем независимым каналам подавались в ствольный клапан 3, где происходило предварительное смешение, и затем, проходя через вихревой смеситель камеры зажигания 4, уже хорошо смешанная взрывчатая смесь поступала в двухсекционный ствол, вытесняя из него воздух через открытый конец и заполняя его до предела, после чего электрическим разрядом от свечей 5 смесь в камере зажигания поджигалась и возбуждалась детонация, которая распространялась в виде самоподдерживающейся волны вдоль ствола с выходом через открытый конец в атмосферу. При диаметре 26 мм длина ствола превышала 2 м. Его казенная секция 6 соединялась с дульной секцией 7 с помощью втулки 8, в которой устанавливалась закопченная фольга для фиксации по следовым отпечаткам ячейки детонационного фронта. Измерение скорости детонации на трех участках проводилось с помощью четырех пьезоэлектрических датчиков давления 9, установленных на казенной и дульной секциях ствола, сигнал от которых фиксировался 4-канальным осциллографом Tektronix TDS 2004B 10.

В экспериментах использованы технические газы с содержанием примесей в пределах 1 % (по сертификатам).

Детально описанная в [12] система газопитания обеспечивала подачу газовых компонентов с точностью концентрационного соот-

ношения не хуже 5 %. Готовая смесь вытесняла воздух из ствола через открытый конец со скоростью около 10 м/с, заполняя его примерно за 250 мс, после чего в течение 1 мс возбуждалась детонация. Для увеличения эффективности инициирование детонации производилось одновременным разрядом двух свечей зажигания, расположенных диаметрально в камере зажигания. Причем для исключения перехода горения в детонацию в разбавленных и в особенности в топливовоздушных смесях, аналогично [13] и [16], применялась стратификация заряда взрывчатой смеси. Программировалось управление подачей компонентов смеси в проточном режиме таким образом, чтобы при заполнении ствола исследуемой (разбавленной) смесью его начальный участок, включая камеру зажигания, заполнялся неразбавленной взрывчатой смесью. Для исключения неоднородности состава смеси в выходной части ствола объем подаваемой смеси превышал объем ствола на 25 %.

Скорость измерялась на трех участках ствола длиной 850, 255 и 400 мм, а ячейка рассчитывалась по общепринятой методике [17, 18] на основе измерений на следовых отпечатках длиной 150 мм. Детонация считалась самоподдерживающейся и стационарной, если размер ячейки существенно не менялся на всей длине следового отпечатка и скорости на всех участках не отличались в пределах погрешности измерения $\pm 3\%$, что давало основание считать настолько же однородным состав детонирующей смеси. Специального анализа состава смеси другими средствами не проводилось. На рисунках значения скорости детонации соответствуют результатам осреднения по трем участкам измерения.

На рис. 4 точками представлены данные по измерению скорости детонации D , а сплошными линиями — соответствующие результаты расчетов для разбавления азотом стехиометрических смесей.

Экспериментальные данные по продольному размеру ячейки детонационного фронта b в смесях, разбавленных азотом, показаны на рис. 5.

Результаты расчета скорости детонации хорошо согласуются с экспериментом. Отклонение не более 1 % во всем диапазоне разбавления (см. рис. 4). Размер ячейки по мере разбавления азотом увеличивается во всех смесях (см. рис. 5) и в ацетиленовоздушной смеси до-

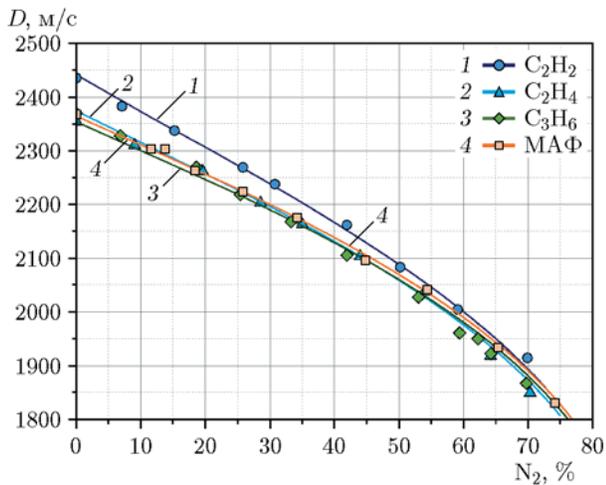


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от разбавления смеси азотом

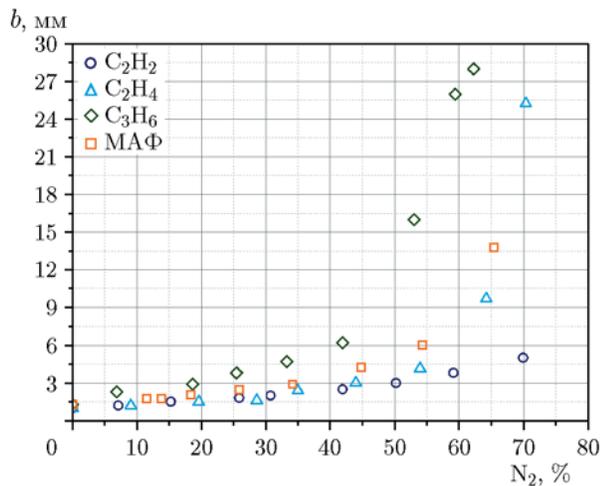


Рис. 5. Результаты экспериментов по регистрации ячейки детонационного фронта в разбавленных азотом смесях

стигает 5 мм (рис. 6,а), а в этиленовоздушной — 25 мм (рис. 6,б). У менее детонационно-активных МАФ и пропилена с разбавлением ячейка увеличивается быстрее, и в топливовоздушной смеси многофронтная структура трансформируется в одно- и двухголовый спин (рис. 6,в,г).

Отдельно следует отметить, что для прямого (без перехода горения в детонацию) инициирования даже спиновой детонации было достаточно заряда активной (стехиометрической топливокислородной) смеси, эквивалентного объему участка ствола длиной менее 8 калибров, что не превышало 10 % всего объема взрывчатой смеси.

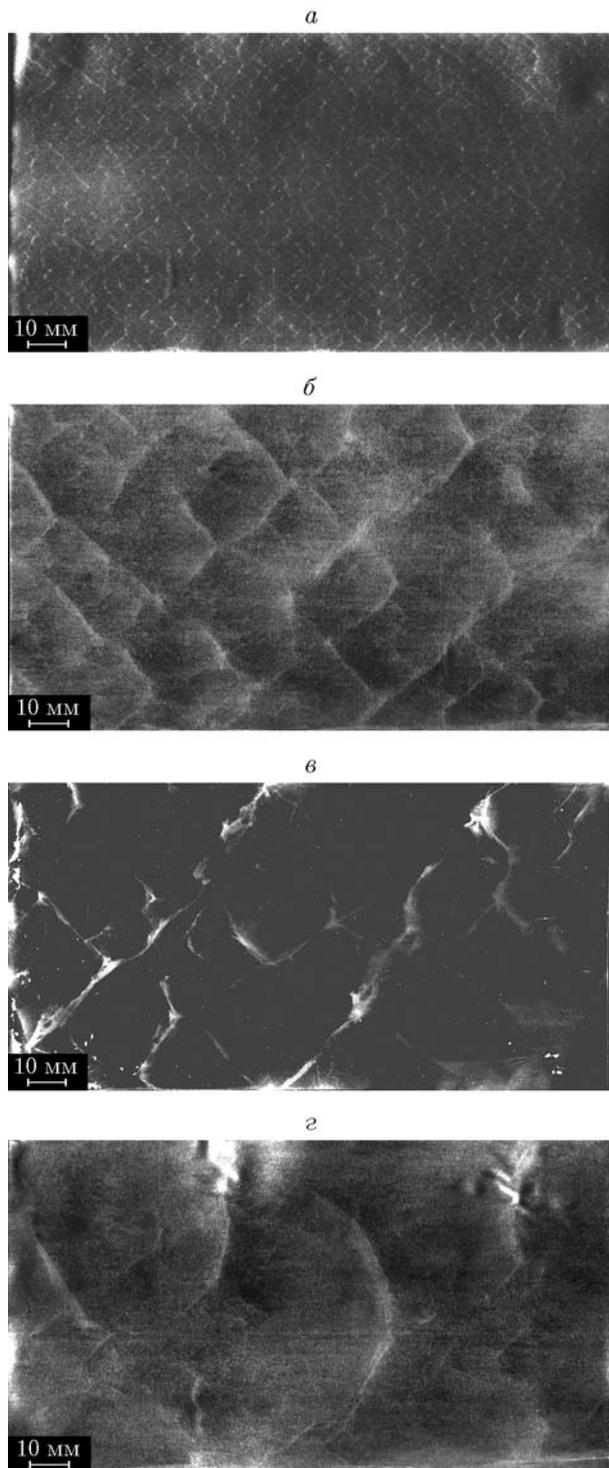


Рис. 6. Следовой отпечаток в смеси 7.7 % C₂H₂ + 92.3 % воздух (а), 6.5 % C₂H₄ + 93.5 % воздух (б), 4.7 % МАФ + 95.3 % воздух (в), 4.5 % C₃H₆ + 95.5 % воздух (г)

На рис. 7 точками представлены данные по измерению скорости детонации, а сплошными линиями — соответствующие результаты расчетов для топливоздушных смесей с различным содержанием топлива.

Экспериментальные данные по продольному размеру ячейки детонационного фронта b в топливоздушных смесях с различным содержанием топлива приведены на рис. 8.

Результаты [19] по ацетилену получены в экспериментах со смесями, предварительно смешанными в стационарных условиях. Размер ячейки пересчитан из поперечного a в продольный b по формуле $b \approx 1.4a$. Ни по размерам

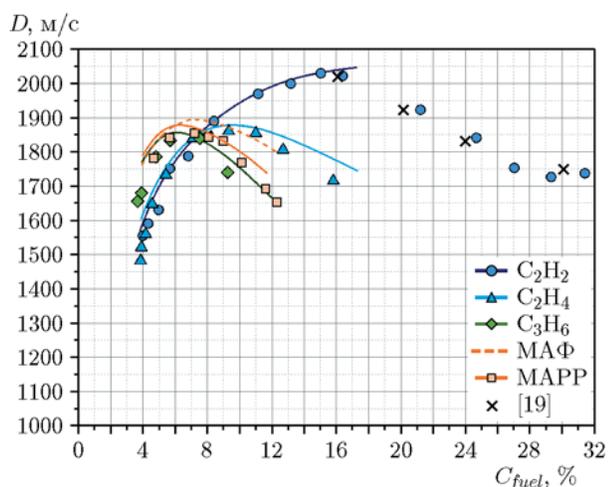


Рис. 7. Зависимость скорости детонации от содержания топлива в топливоздушных смесях

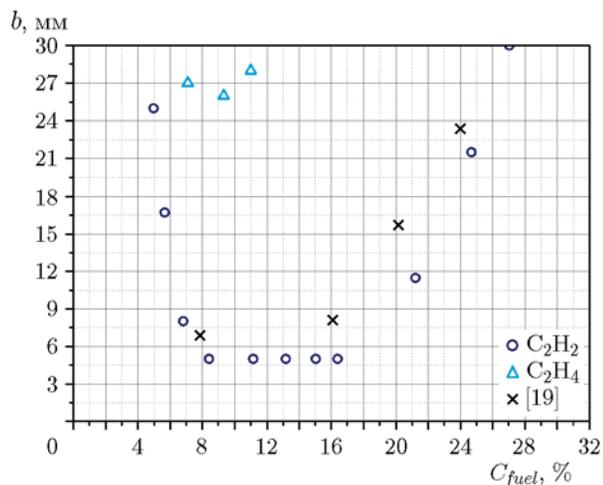


Рис. 8. Результаты экспериментов по регистрации ячейки детонационного фронта в топливоздушных смесях

ячейки, ни по скорости существенного отличия не наблюдается.

Полученные результаты отражают более высокую детонационную способность ацетилена. В смесях ацетилена с воздухом стационарная детонация существует в широком диапазоне концентраций топлива в смеси — от 4 до 32 % с выходом на спиновый режим лишь в диапазоне 4 ÷ 5 % на нижнем пределе и 30 ÷ 32 % на верхнем.

В этиленовоздушных смесях пределы детонации сокращаются до содержания топлива в смеси 4 ÷ 16 %. Спин фиксируется в диапазоне концентраций 4 ÷ 6 % внизу и 14 ÷ 16 % вверху.

Еще более узкие пределы детонации наблюдаются в воздушных смесях с МАФ (4 ÷ 12 %) и пропиленом (4 ÷ 10 %), в которых регистрируемый в стехиометрических составах двухголовый спин трансформируется в одноголовый в 2%-м интервале вблизи границ.

Характер детонационных режимов отражается и в соотношении результатов расчета и эксперимента по скорости (см. рис. 7). У ацетилена, имеющего детонационную волну с многофронтной структурой (ячейкой меньше диаметра ствола) в широком диапазоне концентраций топлива в смеси, различие расчета с экспериментом не выходит за пределы 1 %. У этилена на границах существования стационарной детонации в околоспиновых режимах отличие по скорости достигает 3 %. А у пропилена и МАФ, у которых во всем диапазоне регистрируется только одно- и двухголовый спин, скорость везде ниже расчетной, что вполне закономерно для расчета по модели идеальной детонации с мгновенной химической реакцией на фронте плоской волны [14], которая не учитывает существенных неоднородностей спиновой структуры.

Лучшее соответствие эксперимента расчету по МАРР дает основание полагать, что в составе использованного комплексного топлива преобладали высокомолекулярные добавки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ИГДА с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси ацетилена, этилена, пропилена и МАФ проведены эксперименты по исследованию детонации стехиометрических топливокислородных смесей, разбавляемых азотом, до топливоздушных с вариацией содержания топлива в смеси. Устойчивого возбужде-

ния самоподдерживающейся детонации в свободном заряде удалось добиться за счет стратификации взрывчатой смеси в зоне инициирования. Установлено, что вплоть до пределов детонации для прямого (без перехода горения в детонацию) инициирования достаточно заряда стехиометрической топливокислородной смеси протяженностью не более 8 калибров ствола. Получены экспериментальные данные по скорости детонации и размерам ячейки. Установлены концентрационные пределы детонации по содержанию этих топлив в топливоздуш- ной смеси при атмосферном давлении для тру- бы диаметром 26 мм. Соответствующие расче- ты хорошо согласуются с экспериментом. По- лученные данные представляют практический интерес для расширения технологических воз- можностей детонационного напыления и могут быть использованы для обеспечения взрывобез- опасности при эксплуатации ИГДА и в других промышленных применениях изученных топ- лив.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А., Лобань С. А. Пределы дето- нации углеводородно-воздушных смесей в тру- бах // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 5. — С. 729–733.
2. Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Ры- бин Д. К. Суспензионное детонационное напы- ление керамических покрытий // Физика горе- ния и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 121–128.
3. Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Ба- траев И. С., Рыбин Д. К. Получение на- норазмерного детонационного углерода на им- пульсного газодетонационном аппарате // Пись- ма в ЖТФ. — 2018. — Т. 44, № 9. — С. 65–72.
4. Фролов С. М. Импульсные детонационные двигатели. — М.: Изд-во ТОРУС ПРЕСС, 2006.
5. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерыв- ная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд- во СО РАН, 2013.
6. Ульяницкий В. Ю. CCDS2000 — оборудова- ние нового поколения для детонационного на- пыления // Упрочняющие технологии и покры- тия. — 2013. — № 10. — С. 36–41.
7. Yushehenko K., Astakhov E., Borisov Y., Holmberg G., Kaski P. Application of deto- nation spraying in Scandinavia // Proc. of the 14th ITSC'95, 22–26 May, 1995, Kobe, Japan. — P. 137–140.
8. Гавриленко Т. П., Ульяницкий В. Ю. Ис- пользование пропан-бутана в установках дето- национного напыления // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 92–98.
9. Gill B. G. Super D-Gun // Aircraft Eng. Aerospace Technol. — 1990. — V. 62, N 8. — P. 10–33.
10. Ulianitsky V., Batraev I., Dudina D., Smurov I. Enhancing the properties of WC/Co detonation coatings using two-component fuels // Surf. Coat. Technol. — 2017. — V. 318. — P. 244–249.
11. Jackson J. E. Fuel-oxidant mixture for detona- tion gun flame-plating: U. S. Pat. 4902539. — Patented Feb. 20, 1990.
12. Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Ба- траев И. С. Исследование детонации газового топлива на основе метилацетилена и аллена // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 118–124.
13. Рыбин Д. К., Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С. Исследование детонации этилено- и про- пано-кислородных взрывчатых смесей и их применение в технологии детонационного напы- ления // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 3. — С. 115–122.
14. Gavrilenko T., Nikolaev Yu., Ulianitsky V., Kim M., Hong J. Computational code for deto- nation spraying process, thermal spray // Meet- ing the Challenges of the 21st Century, May 25–29, 1998 (Nice, France). — ASM Int., 1998. — P. 1475–1483.
15. Knystautas R., Guirao C., Lee J. H., Sulmistras A. Measurement of cell size in hydrocarbon-air mixtures and predictions of crit- ical tube diameter, critical initiation energy and detonability limits // Prog. Astronaut. Aeronaut., V. 94: Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations. — New York, 1983. — P. 23–37.
16. Батраев И. С., Васильев А. А., Ульяниц- кий В. Ю., Штерцер А. А., Рыбин Д. К. Исследование газовой детонации переобогащен- ных смесей углеводородов с кислородом // Фи- зика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 89–97.
17. Vasil'ev A. A. Cell size as the main geomet- ric parameter of multifront detonation wave // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1245–1260.
18. Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топ- чиян М. Е. Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 109–131.
19. Васильев А. А., Пинаев А. В. Образование углеродных кластеров в волнах горения и де- тонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 81–94.

Поступила в редакцию 19.12.2019.

После доработки 04.02.2020.

Принята к публикации 19.02.2020.