

УДК 533.1

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ЗА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

© 2021 г. П. В. Козлов¹, Ю. В. Акимов¹, Г. Я. Герасимов¹, В. Ю. Левашов¹, *

¹Институт механики МГУ, Москва, Россия

*E-mail: vyl69@mail.ru, levashovvy@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.

После доработки 13.05.2020 г.

Принята к публикации 18.06.2020 г.

Получены экспериментальные данные по временам задержки воспламенения в стехиометрической пропано-воздушной смеси. Эксперименты проводились в ударной трубе в интервале температур за фронтом отраженной ударной волны от 1065 до 1595 К при давлениях от 23 до 33 атм. Представлено сравнение полученных данных с результатами других измерений и данными кинетических расчетов.

DOI: 10.31857/S0040364421010105

ВВЕДЕНИЕ

Разработка гиперзвуковых летательных аппаратов на детонационных двигателях инициирует исследования детонационного горения различных видов топлива [1–4]. Пропан является самым легким углеводородом, детонационные свойства которого близки к соответствующим величинам для более тяжелых углеводородов, включая керосин [5]. Поэтому пропан наряду с водородом и тяжелыми углеводородами может использоваться как модельное топливо для детонационных двигателей [6–8].

Ударные трубы являются традиционным инструментом для исследований по инициированию детонационного горения различных топлив. Несмотря на значительный прогресс в исследовании детонационных характеристик пропана, экспериментальные исследования по воспламенению пропана за отраженной ударной волной относятся в основном к горючим смесям, разбавленным аргоном [9–11]. Данные по высокотемпературному воспламенению стехиометрических пропано-воздушных смесей достаточно ограничены и относятся к давлениям менее 20 атм. [5, 12]. В настоящей работе представлены результаты измерения времени задержки воспламенения в стехиометрической пропано-воздушной смеси при давлениях порядка 30 атм. Представленная информация расширяет диапазон имеющихся экспериментальных данных, являющихся основой для тестирования редуцированных кинетических механизмов, используемых для моделирования детонационных процессов в двигателях гиперзвуковых летательных аппаратов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты проводились на ударной трубе, входящей в состав экспериментального комплекса “Ударная труба” НИИ механики МГУ [13, 14]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Внутренний диаметр трубы составляет 57 мм, длина камер высокого (КВД) и низкого (КНД) давлений равна соответственно 1.0 и 3.7 м. Между камерами установлена медная диафрагма с калиброванными насечками (D). Варьируя толщину диафрагмы, глубину насечек и давления в камерах толкающего и исследуемого газов, можно достичь необходимых условий за отраженной волной. Толкающим газом служил гелий. Для получения исследуемой смеси воздух марки ПНГ и пропан (R290 REFO) предварительно смешивались в смесителе. Откачка ударной трубы и смесителя осуществлялась форвакуумным насосом до 10^{-3} Тор. Установка позволяет проводить исследования при давлениях за отраженной ударной волной до 60 атм.

Скорость падающей ударной волны определялась непосредственно перед торцевой стенкой ударной трубы. Для этих целей в КНД установлены пьезоэлектрические датчики давления P1 и P2 на расстоянии 57 и 7 мм от торцевой стенки соответственно.

Время задержки воспламенения горючей смеси (время индукции) τ_{ind} определялось за отраженной ударной волной. Для этих целей в торце ударной трубы были установлены два УФ светодиода F1 и F2 (SSU 1.1), фиксирующие начало воспламенения по излучению радикала OH на длине волны 308 нм, и датчик давления P3 (PCB113B24).

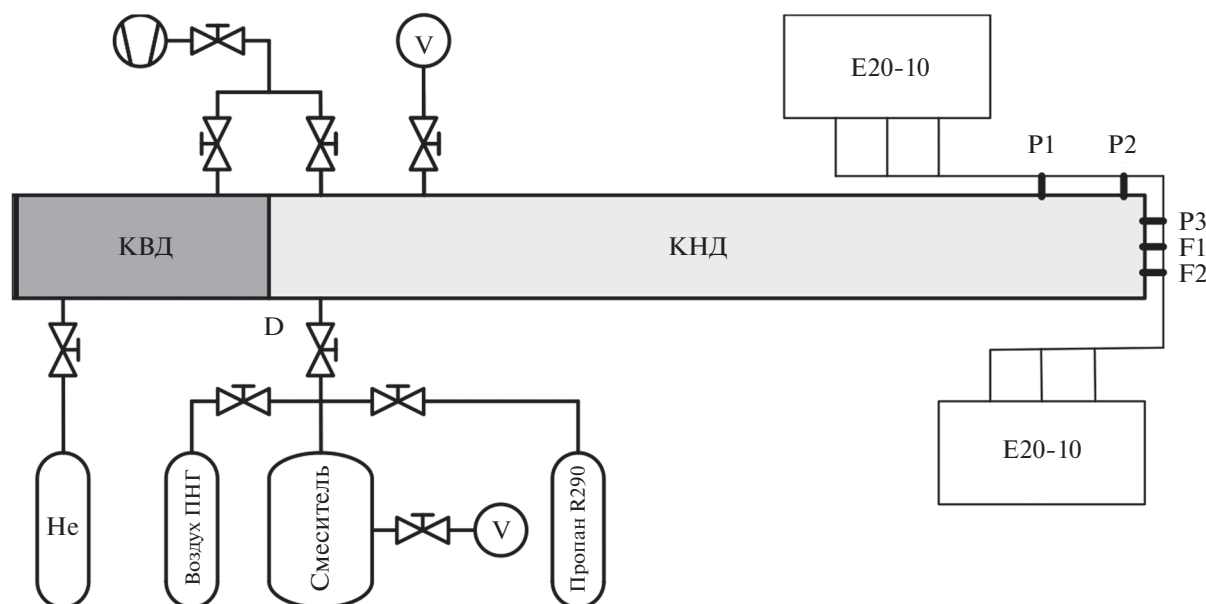


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Световод F1 установлен на оси ударной трубы, а световод F2 – на расстоянии 15 мм ниже от оси. Данное расположение световодов позволяло с учетом диаграммы направленности регистрировать излучение на ФЭУ-100, возникающее как из области на оси трубы, так и из пристеночной области. Датчик давления P3 располагался на 15 мм выше оси и позволял определять момент прихода ударной волны к торцу трубы, измерять давление в отраженной ударной волне и регистрировать момент воспламенения смеси. Сигналы с датчиков давления и ФЭУ регистрировались цифровыми осциллографами E20-10 (L-Card).

Время индукции τ_{ind} определялось как время, прошедшее между регистрацией сигнала на датчике давления и появлением сигнала на световодах. Исследовалась стехиометрическая смесь пропана и воздуха (4% C_3H_8 + 96% воздуха).

Временные зависимости сигналов со световодов F1, F2 и датчика давления P3 для двух режимов (число Маха $M = 3.06$ и 3.3 , начальное давление $p_0 = 0.51$ и 0.37 атм.) представлены на рис. 2. На рисунке в момент времени $t = 0$ наблюдается резкое увеличение давления, что соответствует приходу ударной волны на торцевую стенку. Далее давление остается постоянным. Очередное повышение давления связано с тепловыделением в результате воспламенения исследуемой смеси.

Момент начала воспламенения регистрируется также при помощи сигналов со световодов F1 и F2. Как видно из осциллограмм, представленных на рис. 2, момент воспламенения соответствует резкому возрастанию сигналов, фиксирующих излучение радикала OH на длине волны 308 нм.

Время задержки воспламенения исследуемой смеси (время индукции) τ_{ind} определялось как время от момента прихода отраженной ударной волны (по датчику P3) до момента начала воспламенения, определяемого по излучению на световоде F1 и возрастанию давления на датчике P3. Температура за фронтом отраженной ударной волны рассчитывалась с помощью программы GASEQ [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов по измерению времени индукции τ_{ind} в стехиометрической пропано-воздушной смеси за отраженной ударной волной в интервале давлений $p = 23–33$ атм. показаны на рис. 3. Здесь же для сравнения приведены данные, соответствующие измерениям за отраженной ударной волной при более низких давлениях [5]. Как уже отмечалось, экспериментальные данные по высокотемпературному воспламенению стехиометрической пропано-воздушной смеси при давлениях порядка 30 атм. и выше в настоящее время отсутствуют.

Линиями на рис. 3 показаны результаты расчета величины τ_{ind} с использованием кинетического механизма [16], описывающего как высокотемпературное окисление пропана ($T \geq 1100$ K), так и низкотемпературную область ($T < 1000$ K), которая характеризуется так называемой отрицательной температурной зависимостью (NTC), когда время задержки воспламенения уменьшается с понижением температуры среды. Видно, что

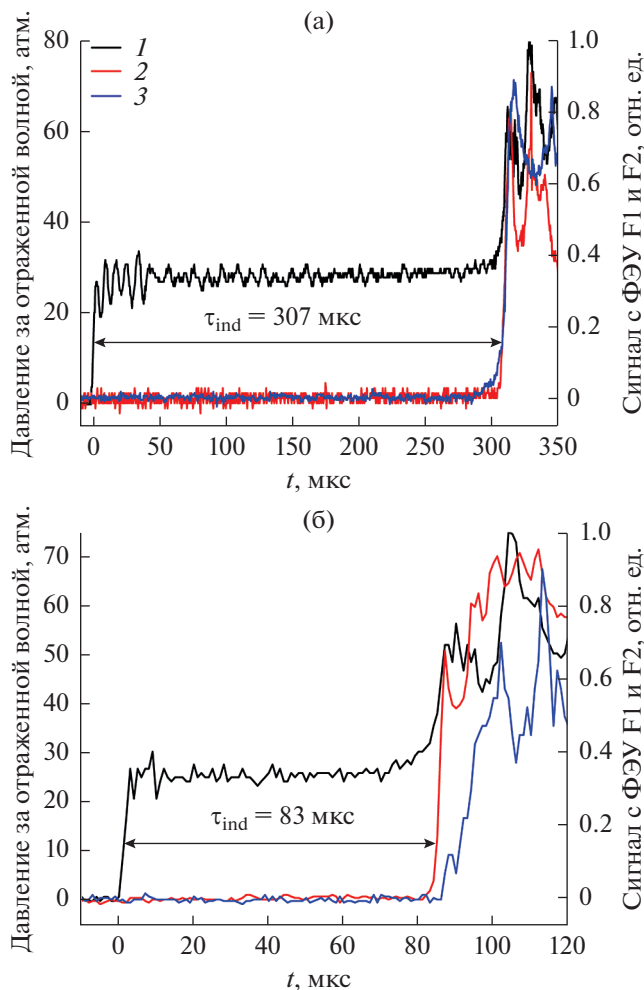


Рис. 2. Осциллограммы давления и сигналы со световодов за фронтом отраженной ударной волны: (а) – $M = 3.06$, $p_0 = 0.51$ атм.; (б) – $M = 3.3$, $p_0 = 0.37$ атм.; 1 – давление, датчик P3; 2 – центральный световод F1, 308 нм; 3 – нижний световод F2, 308 (а) и 589 нм (б).

расчетные кривые достаточно точно воспроизводят имеющиеся экспериментальные данные.

Анализ представленных на рис. 3 данных показывает, что в большинстве случаев результаты измерения τ_{ind} , полученные при одинаковой температуре, но при разных давлениях, существенно отличаются друг от друга. При этом между τ_{ind} и обратной величиной p наблюдается практически линейная зависимость, что указывает на близкий к бинарному характер процесса воспламенения топлива в высокотемпературной области. С другой стороны, данная зависимость позволяет привести значения τ_{ind} , соответствующие разным давлениям, к нормальному давлению.

Бинарный характер высокотемпературного воспламенения стехиометрической пропано-воздушной смеси проиллюстрирован на рис. 4, где показаны измеренные значения величины $p\tau_{ind}$

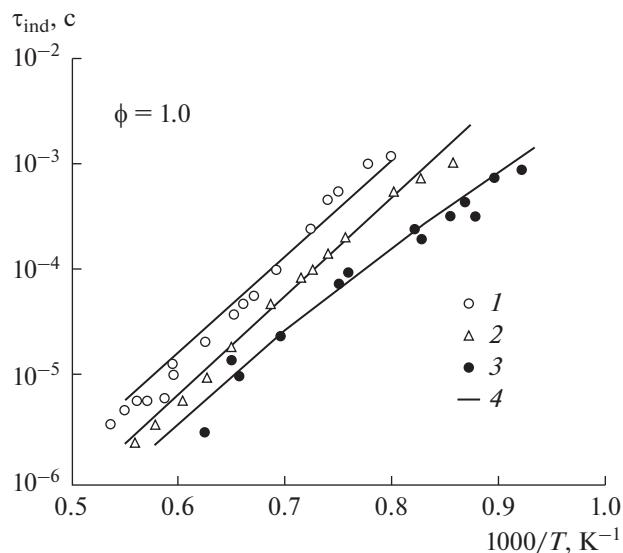


Рис. 3. Сравнение полученных экспериментальных данных в стехиометрической пропано-воздушной смеси с данными измерений величины τ_{ind} при более низких давлениях: 1 – $p = 2-3$ атм., [5]; 2 – 6–10, [5]; 3 – 23–33, данная работа; 4 – результаты кинетического расчета с использованием кинетического механизма [16].

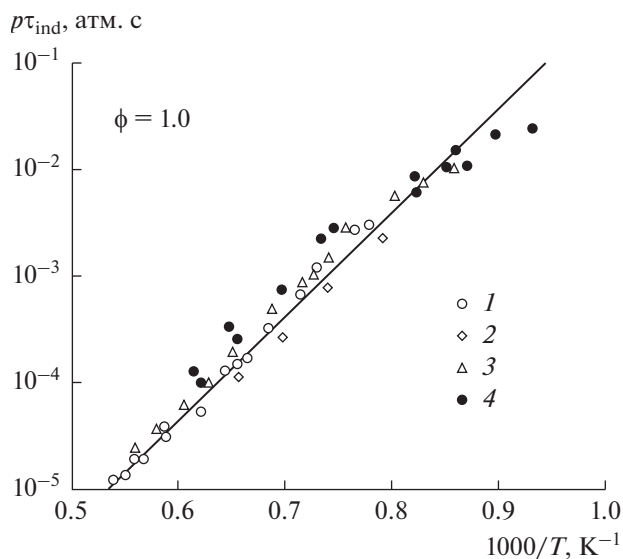


Рис. 4. Зависимость величины $p\tau_{ind}$ от температуры для стехиометрической пропано-воздушной смеси: 1 – $p = 2-3$ атм., [5]; 2 – 3–5, [12]; 3 – 6–10, [5]; 4 – 23–33, данная работа; точки – эксперимент, линия – среднеквадратичная подгонка.

в зависимости от обратной температуры. Видно, что при температурах выше 1100 К отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей зависимости

$$p\tau_{ind} = 1.159 \times 10^{-10} \exp(21580/T), \text{ атм. с,}$$

не превышает половины порядка.

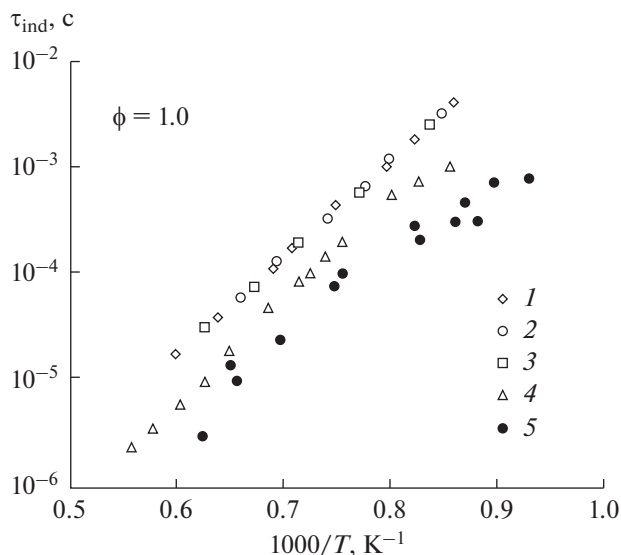


Рис. 5. Сравнение времен задержки воспламенения в пропано-воздушной смеси и смесях, разбавленных аргоном: 1 – $p = 5.3$ атм., $[\text{Ar}] = 92.6\%$ [10]; 2 – 10, 94.5 [9]; 3 – 16, 97.2 [11]; 4 – $p = 6\text{--}10$ атм., воздух [5]; 5 – 23–33, данная работа.

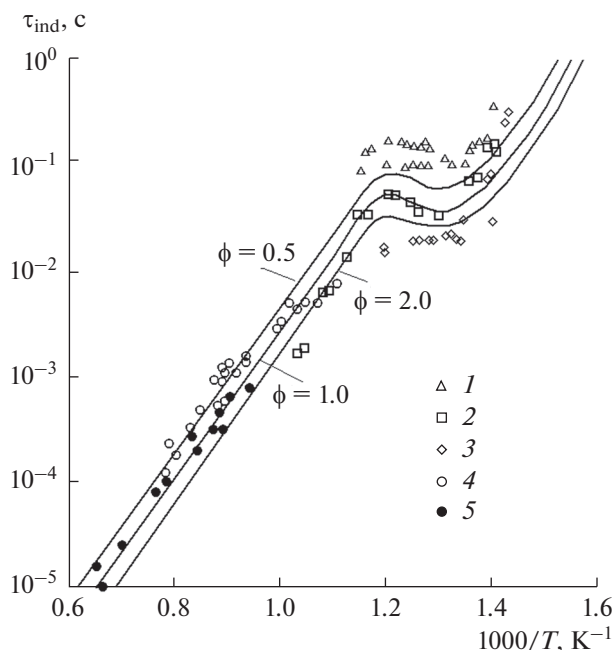


Рис. 6. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами измерений других авторов в низкотемпературной и высокотемпературной областях при $p = 30$ атм.: 1 – $\phi = 0.5$ [19], 2 – 1.0 [19], 3 – 2.0 [19], 4 – 0.5 [17], 5 – 1.0, данная работа; кривые – расчет с использованием модифицированного SD-механизма [20].

Более значительные отклонения наблюдаются в области температур меньше 1100 К. Данный факт, очевидно, связан с повышением роли низкотемпературного механизма окисления пропа-

на, влияние которого возрастает при увеличении давления [16].

При исследовании процессов воспламенения горючих смесей на основе пропана практический интерес представляет вопрос о роли разбавителя [12]. Основное количество работ по измерению времени задержки воспламенения пропана за отраженной ударной волной относится к горючим смесям, сильно разбавленным аргоном [9–11]. В экспериментах в ударных трубах аргон является идеальным термостатом в противоположность азоту, так как в азоте часть энергии уходит во вращательные и колебательные степени свободы. На рис. 5 представлены результаты сравнения времен задержки воспламенения в случае использования в качестве разбавителя аргона и воздуха. Видно, что пропано-воздушные смеси характеризуются более значительным разбросом экспериментальных точек. При этом в горючих смесях, сильно разбавленных аргоном, измеренное время задержки воспламенения практически не зависит от давления, что снижает ценность полученных данных для тестирования кинетических механизмов.

На рис. 6 экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, сравниваются с имеющимися экспериментальными данными по воспламенению пропано-воздушной смеси при $p \approx 30$ атм. Сравнение проводится в широком диапазоне изменения температуры газа за отраженной ударной волной при трех значениях коэффициента избытка топлива: $\phi = 0.5, 1.0$ и 2.0 . Данные [17], полученные в ударной трубе, описывают поведение τ_{ind} в обедненной пропано-воздушной смеси ($\phi = 0.5$) в температурной области $900 \leq T \leq 1300$ К. Несколько заниженные результаты, полученные в тех же условиях, приведены в [18]. Экспериментальные данные [19], полученные на быстрой компрессионной установке, охватывают всю низкотемпературную область и при высоких температурах ($T \geq 900$ К) лежат значительно ниже данных [17]. В целом наблюдается достаточно плавный переход экспериментальных точек из низкотемпературной в высокотемпературную область.

Расчетные кривые, приведенные на рис. 6, описывают поведение времени задержки воспламенения τ_{ind} как при высоких, так и при низких температурах. Эти кривые получены с использованием модифицированного SD-механизма [20], основанного на высокотемпературном SD-механизме [21, 22]. Расчет проведен при трех значениях коэффициента ϕ (0.5, 1.0 и 2.0) при $p = 30$ атм. в температурном интервале от 600 до 1700 К. Наблюдается достаточно хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных в высокотемпературной области. В низкотемпературной области расхождения значительны, особенно при $\phi = 0.5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенных экспериментов по измерению времени задержки воспламенения в стехиометрической пропано-воздушной смеси за отраженной ударной волной в интервале температур $T = 1065\text{--}1595\text{ К}$ и давлений $p = 23\text{--}33\text{ атм.}$ показывает, что полученные данные хорошо согласуются с данными других авторов, измененными при более низких давлениях, а также с результатами кинетических расчетов. Результаты проведенного исследования позволяют расширить диапазон экспериментальных данных, доступных для тестирования новых редуцированных механизмов, используемых для моделирования детонационных процессов в двигателях гиперзвуковых летательных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00343).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. Экспериментальная демонстрация рабочего процесса в импульсно-детонационном жидкостном ракетном двигателе // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 8. С. 58.
2. Котов Д.В., Суржиков С.Т. Расчет гиперзвукового течения и излучения вязкого химически реагирующего газа в канале, моделирующем участок ГПВРД // ТВТ. 2015. Т. 50. № 1. С. 126.
3. Tunik Y.V. Control of Detonation Combustion of Rarefied Hydrogen-air Mixture in a Laval Nozzle // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. № 41. P. 19260.
4. Туник Ю.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю., Славинская Н.А. Численное моделирование детонационного горения паров керосина в расширяющемся сопле // ФГВ. 2020. Т. 56. № 3. С. 27.
5. Penyazkov O.G., Ragothar K.A., Dean A.J., Varatharajan B. Autoignition of Propane-air Mixtures behind Reflected Shock Waves // Proc. Combust. Inst. 2005. V. 30. № 2. P. 1941.
6. Schwer D., Kailasanath K. Fluid Dynamics of Rotating Detonation Engines with Hydrogen and Hydrocarbon Fuels // Proc. Combust. Inst. 2013. V. 34. № 2. P. 1991.
7. Titova N.S., Kuleshov P.S., Favorskii O.N., Starik A.M. The Features of Ignition and Combustion of Composite Propane-hydrogen Fuel: Modeling Study // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. V. 39. № 12. P. 6764.
8. Гудаснов В.Ю., Северина Н.С. Численное моделирование детонации пропано-воздушной горючей смеси с учетом необратимых химических реакций // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 795.
9. Tang C., Man X., Wei L., Pan L., Huang Z. Further Study on the Ignition Delay Times of Propane-Hydrogen-Oxygen-Argon Mixtures: Effect of Equivalence Ratio // Combust. Flame. 2013. V. 160. № 11. P. 2283.
10. Zhang J., Hu E., Zhang Z., Pan L., Huang Z. Comparative Study on Ignition Delay Times of C1-C4 Alkanes // Energy & Fuels. 2013. V. 27. № 6. P. 3480.
11. Yang K., Zhan C., Man X., Guan L., Huang Z., Tang C. Shock Tube Study on Propanal Ignition and the Comparison to Propane, *n*-Propanol, and *i*-Propanol // Energy & Fuels. 2016. V. 30. № 1. P. 717.
12. Brown C.J., Thomas G.O. Experimental Studies of Shock-induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures // Combust. Flame. 1999. V. 117. № 4. P. 861.
13. Павлов В.А., Герасимов Г.Я. Измерение пределов воспламенения и времен индукции водородно-воздушных смесей за фронтом падающей ударной волны при низких температурах // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 6. С. 1238.
14. Экспериментальный комплекс "Ударная труба". <https://istina.msu.ru/equipment/card/279166300/>
15. A Chemical Equilibrium Program for Windows. <http://www.gaseq.co.uk/>
16. Титова Н.С., Кулешов П.С., Старик А.М. Кинетический механизм воспламенения и горения пропана в воздухе // ФГВ. 2011. Т. 47. № 3. С. 3.
17. Herzler J., Jeric L., Roth P. Shock-tube Study of the Ignition of Propane at Intermediate Temperatures and High Pressures // Combust. Sci. Technol. 2004. V. 176. № 10. P. 1627.
18. Жуков В.П., Сеченов В.А., Стариковский А.Ю. Самовоспламенение бедной смеси пропан/воздух при высоких давлениях // Кинетика и катализ. 2005. Т. 46. № 3. С. 344.
19. Gallagher S.M., Curran H.J., Metcalfe W.K., Healy D., Simmie J.M., Bourque G. A Rapid Compression Machine Study of the Oxidation of Propane in the Negative Temperature Coefficient Regime // Combust. Flame. 2008. V. 153. № 1-2. P. 316.
20. Petrova M.V., Williams F.A. A Small Detailed Chemical-kinetic Mechanism for Hydrocarbon Combustion // Combust. Flame. 2006. V. 144. № 3. P. 526.
21. Saxena P., Williams F.A. Testing a Small Detailed Chemical-kinetic Mechanism for the Combustion of Hydrogen and Carbon Monoxide // Combust. Flame. 2006. V. 145. № 1-2. P. 316.
22. Prince J.C., Williams F.A. Short Chemical-kinetic Mechanisms for Low-temperature Ignition of Propane and Ethane // Combust. Flame. 2012. V. 157. № 7. P. 2336.