

Ignition of Propane-Air Mixtures in Shock Tube at Pressure of 30 atm

P. V. Kozlov, I. E. Zabelinskii, N. G. Bikova, G. Ya. Gerasimov,
V. Yu. Levashov

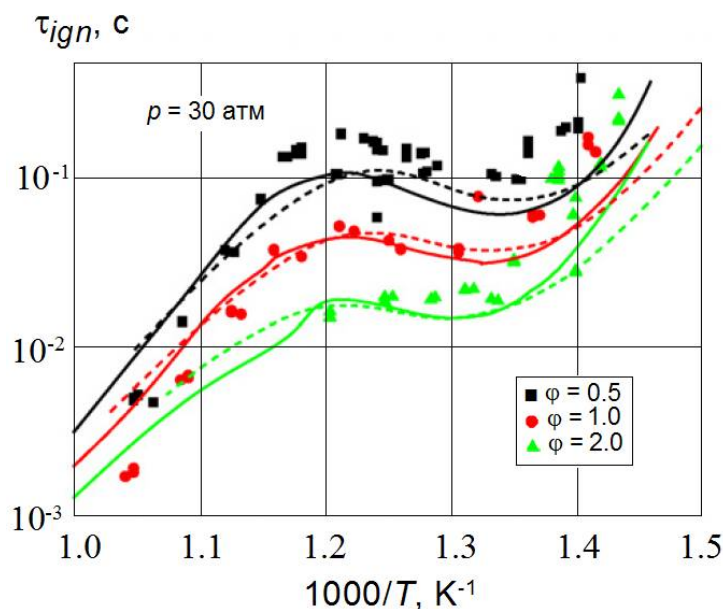
Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Russia

vyl69@mail.ru

Abstract

Measurement of ignition delay times in propane-air mixtures was performed. The experiments were carried out on a shock tube behind the front of the reflected shock wave in the temperature range $T=1050\div 1780$ K at a pressure $p=30$ atm and fuel excess ratios $\phi=0.5, 1.0$ and 2.0 . It is shown that in the region of the studied temperatures, the ignition delay time in propane increases with increasing ϕ . The data obtained are compared with the results of other measurements, which shows that at low temperatures ($T\leq 1000$ K) the dependence of the ignition delay time on ϕ has the opposite character.

Keywords: propane, air, ignition delay time, shock tube, high pressures.



Influence of the fuel excess ratio on the ignition delay time of the propane-air mixture at low temperatures

УДК 533.1

Воспламенение пропан-воздушных смесей в ударной трубе при давлении 30 атм

П. В. Козлов, И. Е. Забелинский, Н. Г. Быкова, Г. Я. Герасимов,
В.Ю. Левашов

*НИИ Механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1*

vyl69@mail.ru

Аннотация

Проведено измерение времен задержки воспламенения в пропан-воздушных смесях. Эксперименты проводились на ударной трубе за фронтом отраженной ударной волны в интервале температур $T = 1050 \div 1780$ К при давлении $p = 30$ атм и коэффициентах избытка топлива $\phi = 0.5, 1.0$ и 2.0 . Показано, что в области исследованных температур время задержки воспламенения в пропане растет с увеличением ϕ . Проведено сравнение полученных данных с результатами других измерений, которое показывает, что при низких температурах ($T \leq 1000$ К) зависимость времени задержки воспламенения от ϕ имеет противоположный характер.

Ключевые слова: пропан, воздух, время задержки воспламенения, ударная труба, высокие давления.

1. Введение

Самовоспламенение углеводородных топлив в различных условиях (температура, давление, отношение топливо/окислитель и т.д.) является критически важным процессом, лежащим в основе работы двигателей [1]. Поэтому изучение данного процесса стало предметом многочисленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований [2]. Пропан относится к числу наиболее важных представителей гомологического ряда предельных углеводородов. С одной стороны, он является самым легким углеводородом, для которого характерны общие закономерности низкотемпературного и высокотемпературного воспламенения, присущие более тяжелым углеводородам [3]. С другой стороны, пропан играет ключевую роль в качестве модельного топлива и промежуточного продукта в химии горения [4]. В литературе имеется большое количество экспериментальных данных по воспламенению пропана в различных экспериментальных установках. К ним, в частности, относятся ударные трубы [4–6], быстрые компрессорные машины [7, 8], реакторы струйного смешения [9] и проточные реакторы [10–12].

Ударные трубы являются традиционным инструментом для изучения различных высокотемпературных процессов [13]. В настоящее время в мировой практике задействовано большое количество ударных труб, отличающихся друг от друга размерами, конструкцией и целью проводимых исследований включая измерение радиационных характеристик ударно нагретых газов [14, 15], определение констант скоростей химических реакций [16, 17] и измерение времен задержки воспламенения в высокотемпературных горючих смесях [18–20].

Несмотря на значительный прогресс в изучении процесса горения пропана в различных условиях, экспериментальные исследования по изучению характеристик воспламенения пропана продолжают в настоящее время [4, 21, 22]. Тем не менее, имеющиеся данные по временам задержки воспламенения ограничены и относятся к давлениям менее 20 атм [23]. В

[24] получены экспериментальные данные по воспламенению стехиометрической смеси пропана и воздуха при давлении 30 атм. В настоящей работе, являющейся продолжением [24], представлены результаты измерения времен задержки воспламенения в высокотемпературных пропан-воздушных смесях при давлении 30 атм и различных значениях коэффициента избытка топлива. Представленная информация расширяет диапазон имеющихся экспериментальных данных, являющихся основой для тестирования редуцированных кинетических механизмов, которые используются для моделирования процесса горения пропана в различных камерах сгорания. Особенно это касается богатых смесей, для которых отсутствуют экспериментальные данные по временам задержки воспламенения.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на ударной трубе, входящей в состав экспериментального комплекса «Ударная труба» НИИ механики МГУ [25]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Внутренний диаметр трубы составляет 57 мм, длина камер высокого (КВД) и низкого (КНД) давления равна, соответственно, 1.0 и 3.7 м. Между камерами устанавливалась медная диафрагма с калиброванными насечками (D). Варьируя толщину диафрагмы, глубину насечек и давления в КВД и КНД, можно достичь необходимые условия за отраженной волной. Установка позволяет проводить исследования при давлениях за отраженной ударной волной до 60 атм.

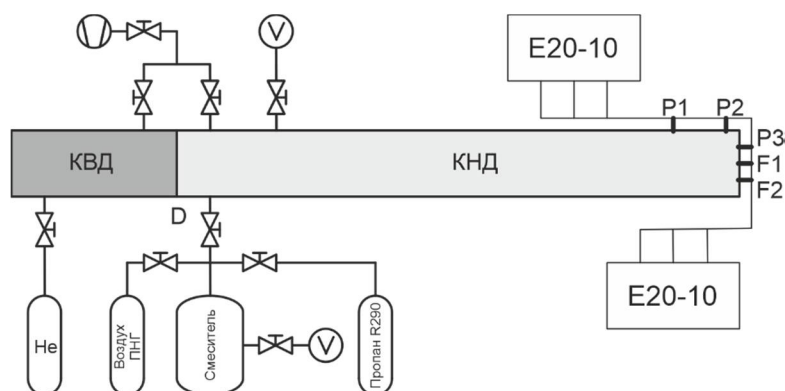


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Ударная труба снабжена системами откачки, приготовления и напуска газовых смесей. Система приготовления служит для подготовки исследуемой смеси, состоящей из пропана (R290 REFO) и воздуха марки ПНГ. Через систему напуска подготовленная смесь подается в КНД. В качестве толкающего газа в КВД используется гелий. Предварительная откачка секций ударной трубы осуществлялась форвакуумным насосом до остаточного давления 10^{-3} Торр. Натекание вследствие недостаточной герметичности не превышало 10^{-4} Торр/мин. При разрыве диафрагмы, отделяющей КВД от КНД, в исследуемом газе формируется падающая ударная волна, скорость которой определяется непосредственно перед торцевой стенкой КНД ударной трубы. Для этих целей используются пьезоэлектрические датчики давления, расположенные на расстоянии 50 мм друг от друга.

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 световода F1 и F2 (SSU 1.1), фиксирующие начало воспламенения по излучению радикала OH на длине волны 308 нм, и датчик давления P3 (PCB113B24). 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).

Временные зависимости сигналов со световодов F1, F2 и датчика давления P3 для двух режимов (числа Маха $M = 3.06$ и 3.3 , начальное давление $p_0 = 0.51$ и 0.37 атм) представлены на рис. 2.

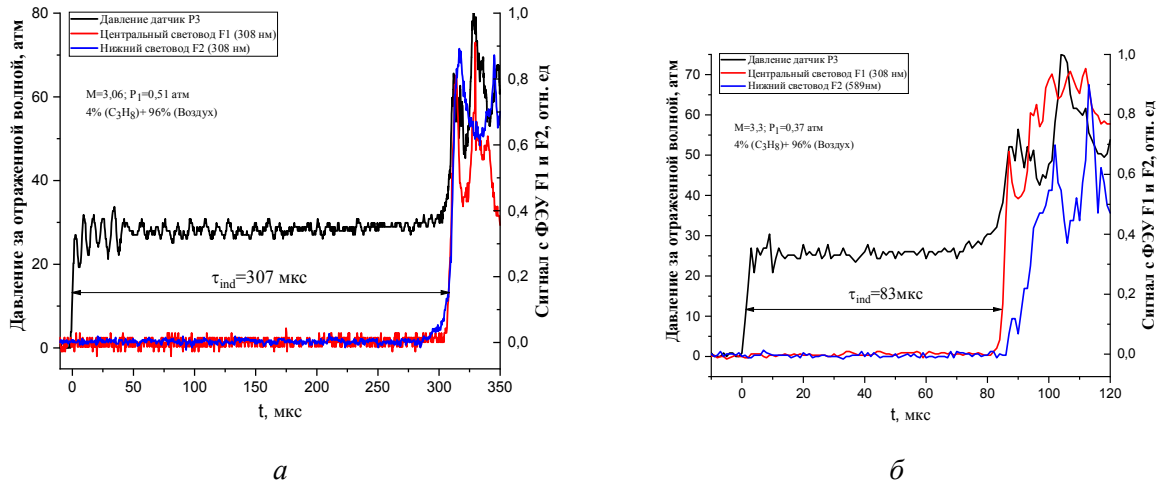


Рис. 2. Осциллограммы давления и сигналы со световодов за фронтом отраженной ударной волны: (а) $M=3.06$, $p_0=0.51$ атм; (б) $M=3.3$, $p_0=0.37$ атм

Из рисунка видно, что 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. Параметры газа за фронтом отраженной ударной волны рассчитывались с помощью программы GASEQ [26].

3. Результаты и их обсуждение

Экспериментальное исследование высокотемпературного воспламенения пропана было проведено в различных пропан-воздушных смесях. Времена задержки воспламенения были измерены в диапазоне температур $T = 1050 \div 1780$ К при давлении сжатого газа $p = 30$ атм и коэффициентах избытка топлива $\phi = 0.5, 1.0$ и 2.0 . Для обеспечения надежности получаемых результатов каждое измерение проводилось два раза при одних и тех же начальных условиях.

Результаты измерений времен задержки воспламенения τ_{ign} в зависимости от обратной температуры смеси и коэффициента избытка топлива приведены на рис. 3. Анализ приведенных данных показывает, что при всех значениях коэффициента ϕ поведение измеренных значений величины τ_{ign} можно описать аррениусовой зависимостью, что выражается в прямолинейности аппроксимирующих кривых. При возрастании коэффициента ϕ время задержки воспламенения тоже увеличивается, что согласуется с результатами измерений других авторов в данной области температур [27, 28]. При этом наблюдается небольшое расхождение аппроксимирующих линий при повышении температуры. С другой стороны, продолжение этих линий в низкотемпературную область должно привести к их пересечению при температурах порядка 1000 К. Соответственно, зависимость величины τ_{ign} от коэффициента ϕ может стать незначительной или вообще смениться на противоположную. Следует отметить,

что показанная на рис. 3 зависимость $\tau_{ign} = \tau_{ign}(\phi)$ для пропана при высоких температурах характерна также для метана [29]. Для тяжелых углеводородов и, в частности, для *n*-гептана отмечена противоположная тенденция: увеличение времени задержки воспламенения при уменьшении ϕ [30].

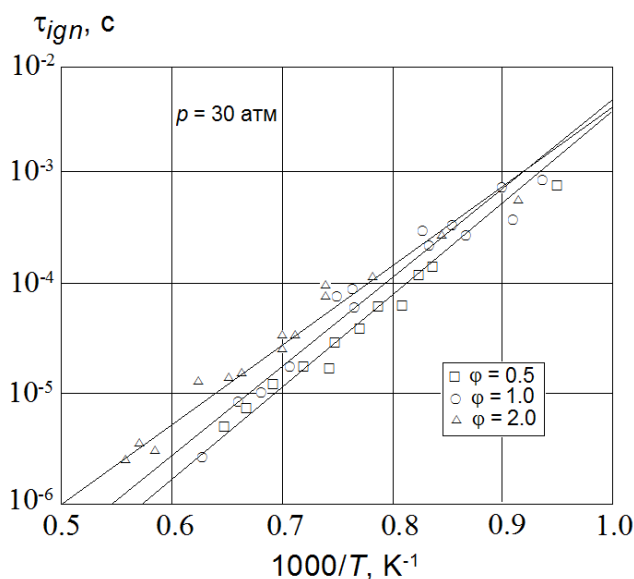


Рис. 3. Измеренные времена задержки воспламенения в пропан-воздушной смеси при давлении $p = 30$ атм и различных коэффициентах избытка топлива: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимирующие кривые

Зависимость величины τ_{ign} для пропан-воздушной смеси от обратной температуры и коэффициента избытка топлива в области низких температур ($T \leq 1000$ К), полученная в работе [31] на быстрой компрессорной установке (RCM, rapid compression machine) при давлении 30 атм, приведена на рис. 4.

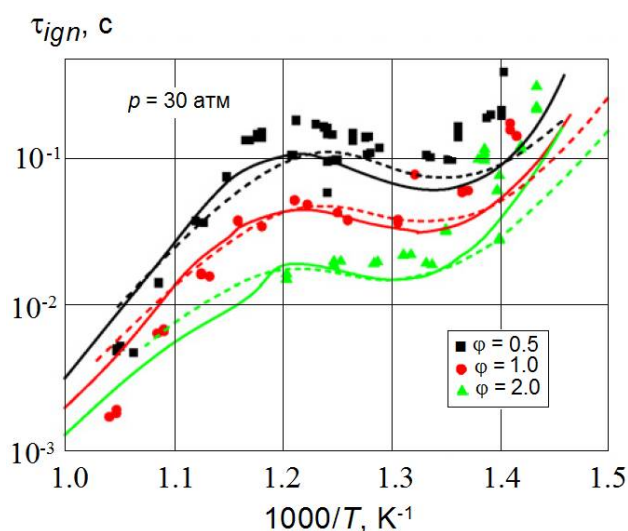


Рис. 4. Влияние коэффициента избытка топлива на время задержки воспламенения пропан-воздушной смеси, полученное в RCM в области низких температур [31]: точки – экспериментальные данные, сплошные линии – результаты расчета с использованием программы НСТ [32], штриховые линии – результаты расчета с использованием программы RCMBL [33]

На рисунке для сравнения показаны также результаты расчета данной величины с использованием программ НСТ (hydrodynamics, chemistry, and transport) [32] и RCMBL (rapid compression machine boundary layer) [33]. Хорошо прослеживается тенденция к смене зависимости τ_{ign} от ϕ при переходе через промежуточную область температур в интервале от 1100 до 1000 К. В низкотемпературной области зависимость, показанная на рис. 4, имеет место также для тяжелых углеводородов [34]. Это говорит о том, что низкотемпературный механизм окисления пропана сохраняется при переходе к тяжелым углеводородным топливам.

На рис. 5 результаты измерения величины τ_{ign} , полученные в настоящей работе при давлении $p = 30$ атм в стехиометрической пропан-воздушной смеси (коэффициент избытка топлива $\phi = 1.0$) сравниваются с экспериментальными данными других авторов, полученными при разных давлениях. Видно, что экспериментальные точки, показанные на рисунке, можно объединить в три группы. Данные Horning et al. [35] при $p = 1$ атм и данные Penyazkov et al. [36] при $p = 2 \div 3$ атм достаточно хорошо коррелируют друг с другом и лежат почти на порядок выше по сравнению с результатами настоящей работы. С другой стороны, данные Brown et al. [37] при $p = 3.4 \div 5$ атм, данные Penyazkov et al. [36] при $p = 6 \div 10$ атм и данные Burcat et al. [38] при $p = 8 \div 14$ атм лежат чуть выше экспериментальных точек настоящей работы, что вполне соответствует обратно пропорциональной зависимости τ_{ign} от давления. Данные Penyazkov et al. [36] при всех давлениях в области высоких температур лежат ниже аппроксимирующих кривых, что связано с тем, что измерения проводились не при постоянном давлении, а при постоянной плотности смеси.

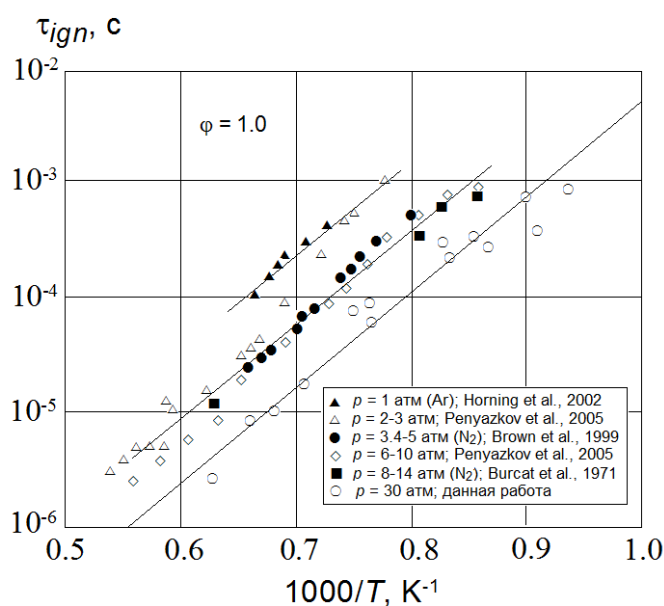


Рис. 5. Сравнение полученных экспериментальных данных для стехиометрических смесей ($\phi = 1.0$) с данными измерений других авторов при более низких давлениях: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимирующие кривые

Аналогичная картина наблюдается в бедной смеси пропан-воздух (коэффициент избытка топлива $\phi = 0.5$), экспериментальные точки для которой при разных давлениях приведены на рис. 6. Данные Zhukov et al. [39] и Cadman et al. [40], полученные при $p = 4 \div 5$ атм, практически повторяют друг друга. Данные Herzler et al. [41], полученные при давлении $p = 10$ атм, лежат немного ниже. Остальные экспериментальные точки (Herzler et al. [41] при $p = 30$ атм и Petersen et al. [42] при $p = 30$ атм) группируются вблизи данных, полученных в настоящей работе. Следует отметить, что экспериментальные точки всех авторов при температурах выше 1100 К при всех значениях коэффициента избытка топлива ϕ в общих чертах подчиняются аррениусовой зависимости.

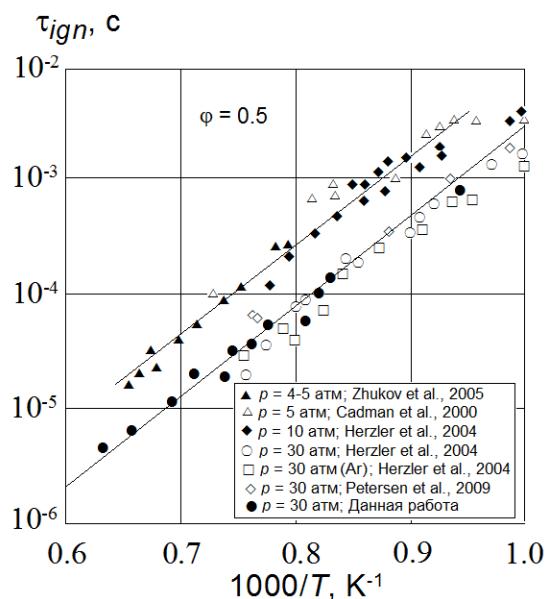


Рис. 6. Сравнение полученных экспериментальных данных для бедных смесей ($\phi=0.5$) с данными измерений других авторов при более низких давлениях: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимирующие кривые

К сожалению, экспериментальные данные по временам задержки воспламенения в богатых смесях пропан-воздух в настоящее время отсутствуют, что не позволяет сравнить данные, полученные в настоящей работе, с данными других исследований.

4. Заключение

Измерены времена задержки воспламенения τ_{ign} в смесях пропана и воздуха в диапазоне температур $T=1050 \div 1780$ К при давлении $p=30$ атм и коэффициентах избытка топлива $\phi=0.5, 1.0$ и 2.0 . Анализ полученных результатов показывает, что при всех значениях коэффициента ϕ поведение измеренных значений величины τ_{ign} следует аррениусовой зависимости, что выражается в прямолинейности кривых, аппроксимирующих экспериментальные точки. При возрастании коэффициента ϕ время задержки воспламенения тоже увеличивается, что согласуется с результатами измерений других авторов в данной области температур. Зафиксирована не упоминавшаяся ранее смена зависимости $\tau_{ign} = \tau_{ign}(\phi)$ при переходе от высоких к низким температурам. Полученная информация расширяет диапазон имеющихся экспериментальных данных, являющихся основой для тестирования редуцированных кинетических механизмов, которые используются для моделирования процесса горения пропана в различных камерах сгорания. Особенно это касается богатых смесей ($\phi=2.0$), для которых отсутствуют экспериментальные данные по временам задержки воспламенения.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по гранту РФФИ № 20-51-00003 (Бел_а), а также рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Экспериментальное и теоретическое исследование кинетических процессов в газах» (номер гос. регистрации АААА-А19-119012990112-4).

Литература

1. Туник Ю. В., Герасимов Г. Я. Воспламенение паров керосина при сверхзвуковом обтекании цилиндра с торцевой наветренной стенкой//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т.19, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-2/articles/742/>

2. Dagaut P. On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2002. Vol. 4. Pp. 2079–2094.
3. Титова Н.С., Кулешов П.С., Старик А.М. Кинетический механизм воспламенения и горения пропана в воздухе // *Физика горения и взрыва*. 2011. Т. 47. № 3. С. 3–19.
4. Burnett M.A., Wooldridge M.S. An experimental investigation of flame and autoignition behavior of propane // *Combust. Flame*. 2021. Vol. 224. Pp. 24–32.
5. Lamoureux N., Paillard C., Vaslier V. Low hydrocarbon mixtures ignition delay times investigated behind reflected shock waves // *Shock Wave*. 2002. Vol. 11. Pp. 309–322.
6. Lam K.Y., Hong Z., Davidson D.F., Hanson R.K. Shock tube ignition delay time measurements in propane/O₂/argon mixtures at near-constant-volume conditions // *Proc. Combust. Inst.* 2011. Vol. 33. Pp. 251–258.
7. 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. Vol. 153. Pp. 316–333.
8. Samimi-Abianeh O., Piehl J.A., Zyada A., Al-Sadoon M. Effect of diluents on the autoignition of propane mixtures using a rapid compression machine // *Energy Fuels*. 2019. Vol. 33. Pp. 3529–3538.
9. Dagaut P., Cathonnet M., Boettner J.C., Gaillard F. Kinetic modeling of propane oxidation // *Combust. Sci. Technol.* 1987. Vol. 56. Pp. 23–63.
10. Hoffman J.S., Lee W., Litzinger T.A., Santavicca D.A., Pitz W.J. Oxidation of propane at elevated pressures: experiments and modeling // *Combust. Sci. Technol.* 1991. Vol. 77. Pp. 95–125.
11. Beerer D.J., McDonnell V.G. An experimental and kinetic study of alkane autoignition at high pressures and intermediate temperatures // *Proc. Combust. Inst.* 2011. Vol. 33. Pp. 301–307.
12. Sabia P., de Joannon M., Lavadera M.L., Giudicianni P., Ragucci P. Autoignition delay times of propane mixtures under mild conditions at atmospheric pressure // *Combust. Flame*. 2014. Vol. 161. Pp. 3022–3030.
13. Reyner P. Survey of high-enthalpy shock facilities in the perspective of radiation and chemical kinetics investigations // *Prog. Aerospace Sci.* 2016. Vol. 85. Pp. 1–32.
14. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б., Козлов П.В., Стовбун С.В., Тереза А.М., Шаталов О.П. Радиационные характеристики воздуха в ультрафиолетовой и вакуумной ультрафиолетовой областях спектра за фронтом сильных ударных волн // *Химическая физика*. 2018. Т. 37. № 2. С. 35–41.
15. Gu S., Oliver H. Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities // *Prog. Aerospace Sci.* 2020. Vol. 113. No. 100607.
16. Hanson R.K., Davidson D.F. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2014. Vol. 44. Pp. 103–114.
17. Ibragimova L.B., Sergievskaya A.L., Levashov V.Yu., Shatalov O.P., Tunik Yu.V., Zabelinskii I.E. Investigation of oxygen dissociation and vibrational relaxation at temperatures 4000–10800 K // *J. Chem. Phys.* 2013. Vol. 139. No. 034317.
18. Han H.S., Kim C.J., Cho C.H., Sohn C.H., Han J. Ignition delay time and sooting propensity of a kerosene aviation jet fuel and its derivative blended with a bio-jet fuel // *Fuel*. 2018. Vol. 232. Pp. 724–728.
19. Shao J., Choundhary R., Peng Y., Davidson D.F., Hanson R.K. A shock tube study of n-heptane< iso-octane, n-dodecane, and iso-octane/n-dodecane blends oxidation at elevated pressures and intermediate temperatures // *Fuel*. 2019. Vol. 243. Pp. 541–553.
20. Козлов В.Е., Титова Н.С., Торохов С.А. Численное исследование влияния добавки водорода или синтез-газа к н-декану на эмиссию вредных веществ из камеры сгорания с гомогенным режимом горения // *Химическая физика*. 2020. Т. 39. № 5. С. 3–15.
21. Molana M., Piehl J.A., Samimi-Abianeh O. Rapid Compression Machine Ignition Delay Time Measurements under Near-Constant Pressure Conditions // *Energy Fuels*. 2020. Vol. 34. Pp. 11417–11428.

22. Ramalingam A., Fenard Y., Heufer A. Ignition delay time and species measurement in a rapid compression machine: A case study on high-pressure oxidation of propane // *Combust. Flame*. 2020. Vol. 211. P. 392.
23. Hu E., Zhang Z., Pan L., Zhang J., Huang Z. Experimental and Modeling Study on Ignition Delay Times of Dimethyl Ether /Propane /Oxygen /Argon Mixtures at 20 bar // *Energy Fuels*. 2013. Vol. 27. Pp. 4007–4013.
24. Козлов П.В., Акимов Ю.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. Воспламенение пропано-воздушной смеси за отраженной волной при высоких давлениях // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59. № 1. С. 11–15.
25. Экспериментальный комплекс "Ударная труба" <https://istina.msu.ru/equipment/card/279166300/>
26. A Chemical Equilibrium Program for Windows. <http://www.gaseq.co.uk/>
27. 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. Vol. 160. Pp. 2283–2290.
28. Mathieu O., Goulier J., Gourmel F., Mannan M.S., Chaumeix N., Petersen E.L. Experimental study of the effect of CF3I addition on the ignition delay time and laminar flame speed of methane, ethylene, and propane // *Proc. Combust. Inst.* 2015. Vol. 35. Pp. 2731–2740.
29. Dagaut P., Boettner J.-C., Cathonnet M. Methane oxidation: experimental and kinetic modeling study // *Combust. Sci. Technol.* 1991. Vol. 77. Pp. 127–148.
30. Gauthier B.M., Davidson D.F., Hanson R.K. Shock tube determination of ignition delay times in full-blend and surrogate fuel mixtures // *Combust. Flame*. 2004. Vol. 139. Pp. 300–311.
31. 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. Vol. 153. Pp. 316–333.
32. Lund C.M., Chase L. HCT—A general computer program for calculating time-dependent phenomena involving one-dimensional hydrodynamics, transport, and detailed chemical kinetics. Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-52504, revised, 1995.
33. Lee D., Hochgreb S. Rapid compression machines: heat transfer and suppression of corner vortex // *Combust. Flame*. 1998. Vol. 114. Pp. 531–545.
34. Chang Y., Jia M., Liu Y., Li Y., Xie M. Development of a new skeletal mechanism for n-decane oxidation under engine-relevant conditions based on a decoupling methodology // *Combust. Flame*. 2013. Vol. 160. Pp. 1315–1332.
35. Horning D.C., Davidson D.F., Hanson R.K. Study of the High-Temperature Autoignition of n-Alkane/O₂/Ar Mixtures // *J. Propul. Power*. 2002. Vol. 18. Pp. 363–371.
36. Penyazkov O.G., Ragotner K.A., Dean A.J., Varatharajan B. Autoignition of propane–air mixtures behind reflected shock waves // *Proc. Combust. Inst.* 2005. Vol. 30. Pp. 1941–1947.
37. Brown C.J., Thomas G.O. Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures // *Combust. Flame*. 1999. Vol. 117. Pp. 861–870.
38. Burcat A., Lifshitz A., Scheller K., Skinner G.B. Shock-tube investigation of ignition in propane-oxygen-argon mixtures // *Symp. (Int.) Combust.* 1971. Vol. 13. P. 745.
39. Zhukov V.P., Sechenov V.A., Starikovskii A.Yu. Autoignition of a Lean Propane–Air Mixture at High Pressures // *Kinetics and Catalysis*. 2005. Vol. 46. Pp. 319–327.
40. Cadman P., Thomas G.O., Butler P. The auto-ignition of propane at intermediate temperatures and high pressures // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2000. Vol. 2. Pp. 5411–5419.
41. Herzler J., Jerig L., Roth P. Shock-tube study of the ignition of propane at intermediate temperatures and high pressures // *Combust. Sci. Technol.* 2004. Vol. 176. Pp. 1627–1637.
42. Petersen E.L., Lamnaouer M., de Vries J., Curran H., Simmie J., Fikri M., Schulz C., Bourque G. Discrepancies between shock tube and rapid compression machine ignition at low temperatures and high pressures // *Shock Waves*. 2009. Vol. 19. Pp. 739–744.

References

1. Tunik, Yu. V., Gerasimov, G. Ya., "Ignition of kerosene vapor in supersonic flow around a cylinder with an end windward wall", *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 19, No. 2, 2018. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-2/articles/742/>
2. Dagaut, P., "On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 4, 2002, pp. 2079–2094.
3. Titova, N. S., Kuleshov, P. S., Starik, A. M., "Kineticheskiy mehanizm vosplamneniya i gorenija propana v vozduhe," *Fizika gorenija i vzryva*, Vol. 47, No. 3, 2011, pp. 3–19.
4. Burnett, M. A., Wooldridge, M. S., "An experimental investigation of flame and autoignition behavior of propane," *Combust. Flame*, Vol. 224, 2021, pp. 24–32.
5. Lamoureux, N., Paillard, C., Vaslier, V., "Low hydrocarbon mixtures ignition delay times investigated behind reflected shock waves," *Shock Wave*, Vol. 11, 2002, pp. 309–322.
6. Lam, K. Y., Hong, Z., Davidson, D. F., Hanson, R. K., "Shock tube ignition delay time measurements in propane/O₂/argon mixtures at near-constant-volume conditions," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 33, 2011, pp. 251–258.
7. 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*, Vol. 153, 2008, pp. 316–333.
8. Samimi-Abianeh, O., Piehl, J. A., Zyada, A., Al-Sadoon, M., "Effect of diluents on the autoignition of propane mixtures using a rapid compression machine," *Energy Fuels*, Vol. 33, 2019, pp. 3529–3538.
9. Dagaut, P., Cathonnet, M., Boettner, J. C., Gaillard, F., "Kinetic modeling of propane oxidation," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 56, 1987, pp. 23–63.
10. Hoffman, J. S., Lee, W., Litzinger, T. A., Santavicca, D. A., Pitz, W. J., "Oxidation of propane at elevated pressures: experiments and modeling," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 77, 1991, pp. 95–125.
11. Beerer, D. J., McDonell, V. G., "An experimental and kinetic study of alkane autoignition at high pressures and intermediate temperatures," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 33, 2011, pp. 301–307.
12. Sabia, P., de Joannon, M., Lavadera, M. L., Giudicianni, P., Ragucci, P., "Autoignition delay times of propane mixtures under mild conditions at atmospheric pressure," *Combust. Flame*, Vol. 161, 2014, pp. 3022–3030.
13. Reyner, P., "Survey of high-enthalpy shock facilities in the perspective of radiation and chemical kinetics investigations," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 85, 2016, pp. 1–32.
14. Bykova, N. G., Zabelinskij, I. E., Ibragimova, L. B., Kozlov, P. V., Stovbun, S. V., Tereza, A. M., Shatalov, O. P., "Radiacionnye harakteristiki vozduha v ul'trafioletrovoj i vakuumnoj ul'trafioletrovoj oblastjakh spektra za frontom sil'nyh udarnyh voln," *Himicheskaja fizika*, Vol. 37, No. 2, 2018, pp. 35–41.
15. Gu, S., Oliver, H., "Capabilities and limitations of existing hypersonic facilities," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 113. No. 100607, 2020.
16. Hanson, R. K., Davidson, D. F., "Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 44, 2014, pp. 103–114.
17. Ibragimova, L. B., Sergievskaya, A. L., Levashov, V. Yu., Shatalov, O. P., Tunik, Yu. V., Zabelinskii, I. E., "Investigation of oxygen dissociation and vibrational relaxation at temperatures 4000–10800 K," *J. Chem. Phys.*, Vol. 139. No. 034317, 2013.
18. Han, H. S., Kim, C. J., Cho, C. H., Sohn, C. H., Han, J., "Ignition delay time and sooting propensity of a kerosene aviation jet fuel and its derivative blended with a bio-jet fuel," *Fuel*, Vol. 232, 2018, pp. 724–728.
19. Shao, J., Choudhary, R., Peng, Y., Davidson, D. F., Hanson, R. K., "A shock tube study of n-heptane< iso-octane, n-dodecane, and iso-octane/n-dodecane blends oxidation at elevated pressures and intermediate temperatures," *Fuel*, Vol. 243, 2019, pp. 541–553.

20. Kozlov, V. E., Titova, N. S., Torohov, S. A., "Chislennoe issledovanie vlijaniya dobavki vodoroda ili sintez-gaza k n-dekanu na jemissiju vrednyh veshhestv iz kamery sgoraniya s gomogennym rezhimom gorenija," *Himicheskaja fizika*, Vol. 39, No. 5, 2020, pp. 3–15.
21. Molana, M., Piehl, J. A., Samimi-Abianeh, O., "Rapid Compression Machine Ignition Delay Time Measurements under Near-Constant Pressure Conditions," *Energy Fuels*, Vol. 34, 2020, pp. 11417–11428.
22. Ramalingam, A., Fenard, Y., Heufer, A., "Ignition delay time and species measurement in a rapid compression machine: A case study on high-pressure oxidation of propane," *Combust. Flame*, Vol. 211, 2020, p. 392.
23. Hu, E., Zhang, Z., Pan, L., Zhang, J., Huang, Z., "Experimental and Modeling Study on Ignition Delay Times of Dimethyl Ether /Propane /Oxygen /Argon Mixtures at 20 bar," *Energy Fuels*, Vol. 27, 2013, pp. 4007–4013.
24. Kozlov, P. V., Akimov, Ju. V., Gerasimov, G. Ja., Levashov, V. Ju., "Vosplamnenie propano-vozduшной smesi za otrazhennoj volnoj pri vysokih davlenijah," *Teplofizika vysokih temperatur*, Vol. 59, No. 1, 2021, pp. 11–15.
25. Jeksperimental'nyj kompleks "Udarnaja truba" <https://istina.msu.ru/equipment/card/279166300/>
26. A Chemical Equilibrium Program for Windows. <http://www.gaseq.co.uk/>
27. 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*, Vol. 160, 2013, pp. 2283–2290.
28. Mathieu, O., Goulier, J., Gourmel, F., Mannan, M. S., Chaumeix, N., Petersen, E. L., "Experimental study of the effect of CF3I addition on the ignition delay time and laminar flame speed of methane, ethylene, and propane," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 35, 2015, pp. 2731–2740.
29. Dagaut, P., Boettner, J.-C., Cathonnet, M., "Methane oxidation: experimental and kinetic modeling study," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 77, 1991, pp. 127–148.
30. Gauthier, B. M., Davidson, D. F., Hanson, R. K., "Shock tube determination of ignition delay times in full-blend and surrogate fuel mixtures," *Combust. Flame*, Vol. 139, 2004, pp. 300–311.
31. 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*, Vol. 153, 2008, pp. 316–333.
32. Lund, C. M., Chase, L., "HCT – A general computer program for calculating time-dependent phenomena involving one-dimensional hydrodynamics, transport, and detailed chemical kinetics," Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-52504, revised, 1995.
33. Lee, D., Hochgreb, S., "Rapid compression machines: heat transfer and suppression of corner vortex," *Combust. Flame*, Vol. 114, 1998, pp. 531–545.
34. Chang, Y., Jia, M., Liu, Y., Li, Y., Xie, M., "Development of a new skeletal mechanism for n-decane oxidation under engine-relevant conditions based on a decoupling methodology," *Combust. Flame*, Vol. 160, 2013, pp. 1315–1332.
35. Horning, D. C., Davidson, D. F., Hanson, R. K., "Study of the High-Temperature Autoignition of n-Alkane/O₂/Ar Mixtures," *J. Propul. Power*, Vol. 18, 2002, pp. 363–371.
36. Penyazkov, O. G., Ragotner, K. A., Dean, A. J., Varatharajan, B., "Autoignition of propane–air mixtures behind reflected shock waves," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, 2005, pp. 1941–1947.
37. Brown, C. J., Thomas, G. O., "Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures," *Combust. Flame*, Vol. 117, 1999, pp. 861–870.
38. Burcat, A., Lifshitz, A., Scheller, K., Skinner, G. B., "Shock-tube investigation of ignition in propane–oxygen–argon mixtures," *Symp. (Int.) Combust.*, Vol. 13, 1971, p. 745.
39. Zhukov, V. P., Sechenov, V. A., Starikovskii, A. Yu., "Autoignition of a Lean Propane–Air Mixture at High Pressures," *Kinetics and Catalysis*, Vol. 46, 2005, pp. 319–327.

40. Cadman, P., Thomas, G. O., Butler, P., "The auto-ignition of propane at intermediate temperatures and high pressures," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 2, 2000, pp. 5411–5419.
41. Herzler, J., Jerig, L., Roth, P., "Shock-tube study of the ignition of propane at intermediate temperatures and high pressures," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 176, 2004, pp. 1627–1637.
42. Petersen, E. L., Lamnaouer, M., de Vries, J., Curran, H., Simmie, J., Fikri, M., Schulz, C., Bourque, G., "Discrepancies between shock tube and rapid compression machine ignition at low temperatures and high pressures," *Shock Waves*, Vol. 19, 2009, pp. 739–744.

Статья поступила в редакцию 19 марта 2021 г.