

УДК 621.44:662.61

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГОРЮЧИХ В ВОЗДУХЕ**© 2015 С. М. Сергеев¹, Н. В. Петрухин¹, М. В. Масюков²¹ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», г. Москва²Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Москва

Описана установка постоянного объёма перепускного типа, предназначенная для измерения видимых и нормальных скоростей распространения пламени в газовых и капельно-газовых смесях и периода задержки воспламенения указанных смесей в миллисекундном диапазоне. В отличие от известных, описываемая установка доработана для работы с жидкими углеводородами. Она дополнительно оснащена устройством для ввода жидких реагентов и наночастиц, а также оптико-волоконным датчиком для определения момента вспышки. Расширен температурный диапазон проведения исследований - до 850 К. Представлена методика работы на экспериментальной установке. Получены значения видимых скоростей горения различных углеводородных топлив в зависимости от температуры при давлении ≈ 50 кПа. По экспериментальным данным определены эффективные энергии активаций и предэкспотенциальные множители температурных зависимостей видимой скорости горения углеводородных горючих в воздухе. Полученные результаты согласуются с современными представлениями о механизме горения углеводородных горючих в воздухе.

Видимая скорость горения, период задержки воспламенения, углеводородные горючие, топливовоздушная смесь, энергия активации.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-179-183

Разработка перспективных реактивных двигателей требует, прежде всего, топлив с уникальными свойствами: высокими скоростями горения, энергоёмкостью, высокой плотностью, большим запасом хладоресурса и др. Получение таких топлив затруднительно без новых методов химмотологических исследований, в частности, процесса горения топлива. В данной статье представлены результаты исследования процесса горения углеводородов в воздухе, полученные на модернизированной установке, постоянного объёма перепускного типа [1, с. 10-14].

Модернизация методики определения характеристик горения обусловлена решением новых задач, связанных с объектами и условиями исследования:

- объектами исследования являются высококипящие углеводородные горючие, $T_{\text{кип}} = 413-588$ К;

- условия горения топливовоздушной смеси (ТВС): температура 573-850 К и предварительный подогрев ТВС в смесителе до 373-573 К.

Дополнительно установка имеет устройство для ввода наполнителей горючих (порошков, суспензий) и оптико-волоконный датчик для фиксации момента вспышки.

На рис. 1 представлена лабораторная установка, разработчиком и изготовителем которой выступил Институт химической физики им. Семёнова РАН. Установка предназначена для измерения видимых скоростей распространения пламени в газовых и капельно-газовых смесях, периода задержки воспламенения (ПЗВ) ТВС в миллисекундном диапазоне.

Методика работы на установке заключалась в приготовлении ТВС, дозированного перепуска её из смесителя 5 через электромагнитный клапан 12 в вакуумированный реактор 13, нагретый до заданной температуры, где она самовоспламенялась. Результаты горения в виде зависимости нарастания давления от времени в режиме реального времени с помощью быстродействующего датчика 11 отражались на экране монитора.

Пример результата экспериментального исследования горения топлива Т-1 и нафтила в воздухе в графическом виде представлен на осциллограмме (рис. 2).

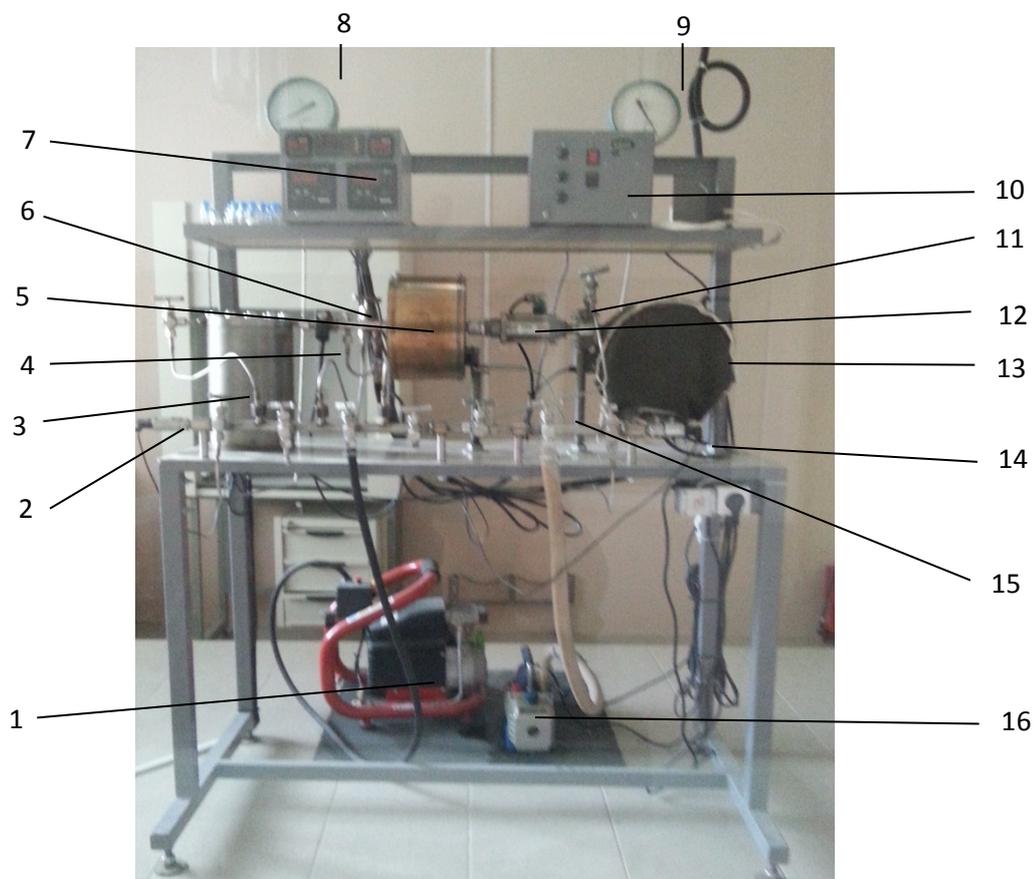


Рис. 1. Установка по оценке характеристик горения топлив:

1 – компрессор; 2,11,14 – датчик давления; 3 – ресивер; 4 – устройство для ввода добавок;
5 – смеситель; 6,12 – электромагнитный клапан; 7 – управляющий блок; 8 – манометр; 9 – вакуумметр;
10 – блок зажигания; 13 – реактор; 15 – распределительная гребёнка; 16 – форвакуумный насос.

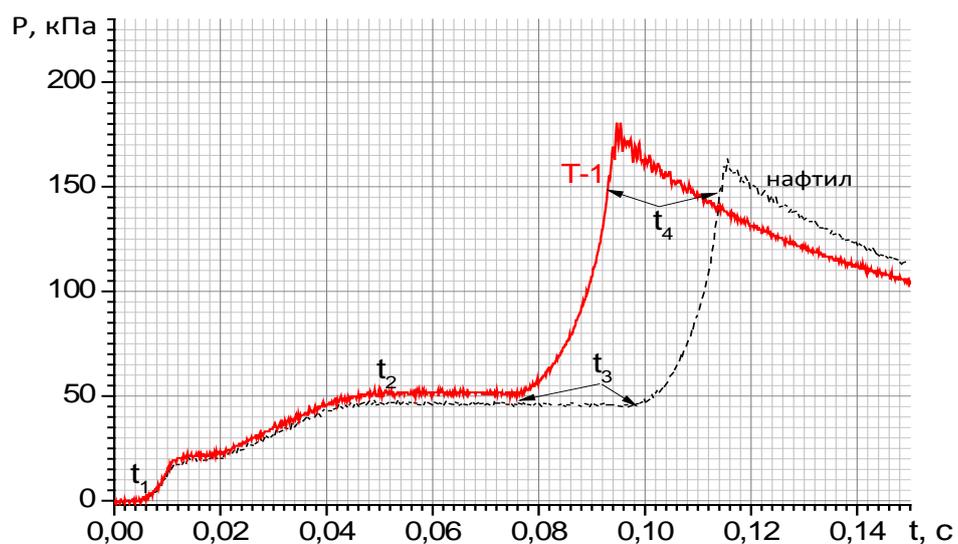


Рис. 2. Осциллограмма процесса самовоспламенения

На осциллограмме показано: t_1 – момент открытия клапана; t_1-t_2 – время перепуска ТВС; t_2-t_3 – период задержки самовоспламенения; t_3 – момент самовоспламенения ТВС; t_3-t_4 – время сгорания смеси. Эта осциллограмма позволяет получать две основные характеристики горения углеводородных топлив – видимую скорость горения и период задержки воспламенения, которые дают возможность рассчитывать время нахождения топлива в камере сгорания. Ошибка измерения видимой скорости горения не превышала 20 %, а ПЗВ – 33 %.

Результаты экспериментальных определений видимых скоростей горения углеводородных горючих представлены на рис. 3, 4.

На рис. 3 представлены результаты измерения видимых скоростей горения U_v различных углеводородных горючих в воздухе в режиме предварительного смешения и подогрева до 473 К при температуре в реакторе $T_p = 573$ К, начальном давлении в реакторе $p_0 = 0,1$ МПа и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,0$.

На рис. 3 горючие нефтяного происхождения: Т-1, нафтил, Т-6 и синтетические: циклин (С), JP-10 и ВЭГ, а также н-гептан (н-Г) расположены в порядке увеличения плотности.

На рис. 4 представлены зависимости видимой скорости горения реактивных топлив от температуры. Полученные кинетические кривые позволили определить значения эффективной энергии активации $E_{акт}$ и предэкспотенциального множителя K_0 , представленные в таблице.

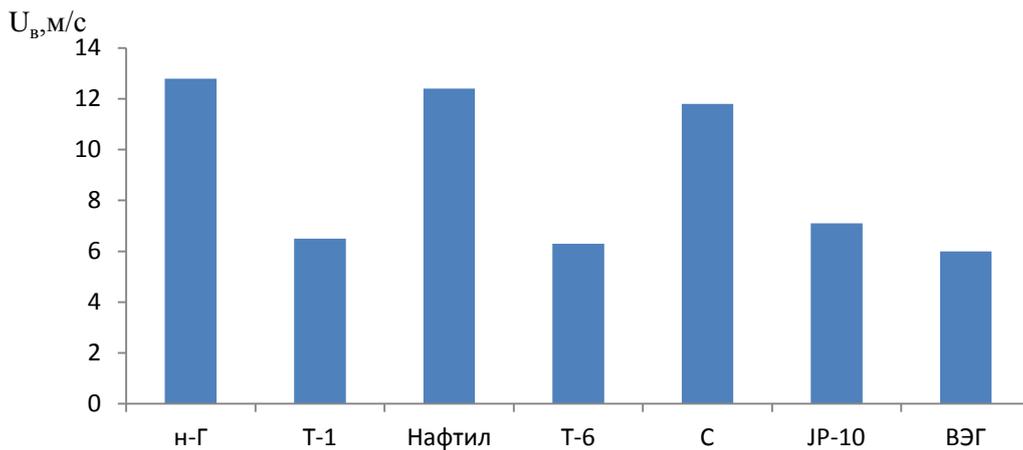


Рис. 3. Видимая скорость горения углеводородных топлив

Энергия активации горения углеводородных горючих в воздухе при температурах в реакторе $T = 573-823$ К, коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,0$ и начальном давлении в реакторе $p_0 = 60$ кПа

Горючие	Эффективная энергия активации $E_{акт}$, кДж/моль	Предэкспотенциальный множитель K_0 , м/с
Топливо Т-1	22,8	1090
Топлива ТС-1	11,9	140
Топливо Т-6	22,7	1078
Нафтил	22,1	910
Топлив JP-10	26,0	1548

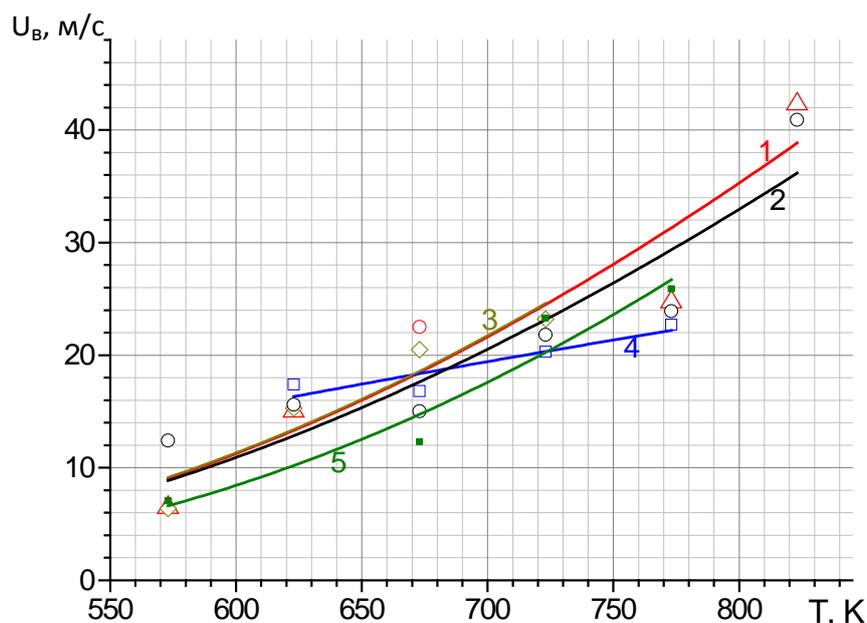
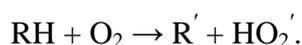


Рис. 4. Зависимости видимой скорости горения реактивных топлив от начальной температуры: 1 – T-1; 2 – нафтил; 3 – T-6; 4 – TC-1; 5 – JP-10

Обращает на себя внимание низкое значение энергии активации реакции горения исследованных углеводородов, что характерно для процессов с участием свободных радикалов. Например, реакция углеводорода с молекулярным кислородом при температурах около 500 К идёт с образованием пероксидного радикала:



Энергия активации этой реакции составляет около 20 кДж/моль [2, с. 267]. Процесс образования свободных радикалов, очевидно, начинается в смесителе установки, и в реактор поступает уже подготовленная для воспламенения ТВС.

Таким образом, разработана и изготовлена установка постоянного объёма перепускного типа для изучения процесса горения жидких углеводородных топлив. С помощью разработанной методики расчёта характеристик горения топлив получены экспериментальные зависимости видимых скоростей горения от температуры и определены значения эффективной энергии активации горения углеводородных горючих в воздухе, позволяющие получать представления о механизме горения и возможность управлять процессом горения.

Выражаем благодарность Фролову С.М. и Борисову А.А. за плодотворное сотрудничество.

Библиографический список

1. Горение и взрыв / под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук С.М. Фролова. Вып. 4. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. 448 с.
2. Химия горения / под ред. У. Гардиера. М.: Мир, 1988. 464 с.

Информация об авторах

Сергеев Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, 25 ГосНИИ химмотоло-

гии Минобороны России, Москва. E-mail: ssm.58@mail.ru. Область научных интере-

сов: повышение эффективности моторных топлив.

Петрухин Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, 25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, Москва. E-mail: 25gosniihim@mail.ru. Об-

ласть научных интересов: физическая химия реактивных топлив.

Масюков Максим Владимирович, аспирант, Военная академия РВСН им. Петра Великого, Москва. E-mail: pm@mil.ru. Область научных интересов: физическая химия реактивных топлив.

EXPERIMENTAL STUDY OF HYDROCARBON FUEL COMBUSTION IN THE AIR

© 2015 S. M. Sergeev¹, N. V. Petrukhin¹, M. V. Masyukov²

¹The 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation, Moscow, Russian Federation

²Military Academy of Strategic Rocket Forces, Moscow, Russian Federation

An improved constant- volume bypass arrangement intended for measuring visible and normal velocities of flame propagation in gas and droplet gas mixtures and the ignition delay period for the mixtures mentioned above in the millisecond range is described in the paper. Unlike the other available installations the one under consideration is developed for operating with liquid hydrocarbons. It has an additional device for injecting liquid reagents and nanoparticles as well as a fiber-optic sensor to specify the instance of ignition. The temperature range of conducting the experiments is extended up to 850 K. A method of operating the experimental installation is presented. The values of visible combustion velocities are obtained for various hydrocarbon fuels depending on the temperature at the pressure ≈ 50 kPa. The effective activation energies and pre-exponential multipliers of temperature dependences of the visible velocity of hydrocarbon fuel combustion in the air are specified by the experimental data. The results obtained are in good agreement with the modern concepts of the mechanism of hydrocarbon fuel combustion in the air.

Ignition delay period, speed of burning, hydrocarbon fuels, fuel-air mixture, installation, activation energy.

References

1. *Gorenie i vzryv* [Combustion and explosion]. Moscow: TORUSS PRESS Publ., 2011. 448 p.
2. *Khimiya gorennya* [Combustion chemistry]. Moscow: Mir Publ., 1988. 464 p.

About the authors

Sergeev Sergey Mihajlovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Chief of Laboratory, 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation, Moscow. E-mail: ssm.58@mail.ru. Area of Research: improving the efficiency of motor fuels.

Petrukhin Nikolay Vasil'evich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Chief Researcher, 25-th State Research Insti-

tute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation, Moscow. E-mail: 25gosniihim@mail.ru. Area of Research: physical chemistry of jet fuels.

Masyukov Maxim Vladimirovich, postgraduate student, Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Forces, Moscow. E-mail: pm@mil.ru. Area of Research: physical chemistry of jet fuels.