УДК 629.7:665.7.035
DOI: 10.63430/TIA202502002

Исследование теплофизических характеристик «зеленого» углеводородного горючего нового поколения для аэрокосмических систем многоразового применения*

Л.С. Яновский[1,2], Г.А. Тарасов[1,2], В.М. Ежов[2], М.А. Ильина[1,2], Н.А. Червонная[2], Д.В. Новаковский[2]

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

[2]*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка*

Email: anathema40000@gmail.com

Развитие концепции многоразового применения аэрокосмической техники приводит к ужесточению требований к надежности эксплуатации энергоустановок и летательных аппаратов в целом. Важнейшей проблемой является достижение безотказного функционирования всех элементов энергоустановок аэрокосмической техники в условиях высоких тепловых нагрузок. В таких энергоустановках применяются углеводородные топлива, обладающие повышенной стойкостью к образованию отложений продуктов неполного окисления.

Благодаря совершенствованию технологий производства синтетических топлив на основе биосырья повышается доступность топлив с пониженным или нулевым углеродным следом. Синтетическое топливо или его компоненты отличаются от нефтяного топлива по составу и, следовательно, свойствам. Применение топлив, содержащих синтетические компоненты, требует исследования их физико-химических свойств, в том числе теплофизических характеристик.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям термостабильности, хладоресурса и воспламеняемости высокоплотного углеводородного горючего (ВУГ) нового поколения. Показано, что ВУГ может эксплуатироваться при температуре до 300 °C при отсутствии отложений или их допустимом количестве. Проведено экспериментальное исследование периода индукции воспламенения ВУГ в диапазоне давлений 14 – 16 бар, температуры 1000 – 1500 K и коэффициента избытка окислителя 0,5 – 3 с помощью ударной трубы.

Ключевые слова: хладоресурс, термостабильность, высокоплотное углеводородное горючее, период индукции воспламенения, ударная труба.

Введение

Возросший интерес к разработке многоразовых аэрокосмических систем и тенденции к повышению температуры рабочего тела энергоустановок выдвигают требования по повышению безопасности эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). В связи с этим к качеству

* Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

© Яновский Л.С., Тарасов Г.А., Ежов В.М., Ильина М.А., Червонная Н.А., Новаковский Д.В., 2025

горючего предъявляются все более жесткие требования по его стойкости к образованию отложений продуктов окисления.

Для ракетных двигателей взамен топлива Т-1 разработано термостабильное высокоплотное углеводородное горючее (ВУГ) с использованием синтетических компонентов. Повышение термостабильности ВУГ обеспечивается снижением содержания серы, ароматических углеводородов и олефинов в сравнении с топливом Т-1 [1]. Состав ВУГ способствует снижению образования смолистых отложений в каналах охлаждения, что облегчает прокачку горючего и улучшает условия теплообмена [2].

Важным аспектом развития технологий многоразовых полетов является применение газотурбинных двигателей (ГТД) для суборбитальных полетов и в качестве первой многоразовой ступени для вывода малогабаритных грузов на низкую околоземную орбиту [3, 4].

Оценка возможности применения ВУГ в ГТД представляет большой интерес. Она должна основываться на сравнении физико-химических и эксплуатационных свойств, в том числе характеристик воспламеняемости, ВУГ со штатным топливом ТС-1.

Задержка воспламенения смеси топлива и окислителя зависит от эффективности организации распыла, испарения и смешения топлива с окислителем в камере сгорания двигателя и обусловливается диффузионными процессами, а также химическим составом топлива, характеризирующим кинетику процесса воспламенения — период индукции воспламенения (ПИВ). Изучение ПИВ топлив является важной научной и практической задачей.

Для оценки термостабильности ВУГ авторами предложена методика оценки стойкости к образованию отложений, а также хладоресурса топлива в условиях нагрева в трубчатом канале.

Ударные трубы позволяют определять ПИВ топлив в широком диапазоне давления, температуры и коэффициента избытка окислителя (α), практически полностью исключая влияние диффузионных факторов. Результаты, полученные с помощью ударных труб, хорошо описываются существующими кинетическими моделями [5 – 7]. В литературе имеются данные по ПИВ топлива RP-1 [8, 9].

Возросший интерес к ВУГ и отсутствие данных по его термостабильности и ПИВ обусловливают актуальность проведения представленных исследований.

Экспериментальные установки и методики измерения

Хладоресурс оценивается как величина тепловой энергии, которая может быть передана горючему без заметного образования отложений. Для определения хладоресурса ВУГ в работе использовалась экспериментальная установка на основе омически нагреваемого канала (рис. 1). Испытательный реактор *4* в виде капиллярной трубки был изготовлен из легированной стали. Длина рабочей (нагреваемой) части испытательного реактора была равна 1000 мм, внутренний диаметр — 0,8 мм, наружный диаметр — 3 мм. Расход топлива составлял 3,2 см^3/мин (время пребывания в реакторе — 8 секунд), что обеспечивало ламинарный режим течения, характеризующийся худшими условиями теплообмена, по сравнению с турбулентным. ВУГ нагревалось до 300 °С. Давление в системе поддерживалось на уровне 3 МПа, что исключало кипение топлива в канале. Длительность испытаний составляла 50 часов, что принято на практике [10].

Образование отложений определялось по изменению гидравлического сопротивления канала и температуры поверхности испытательного реактора. Хладоресурс ВУГ определялся по формуле:

$$H = \frac{W - W^*_{\text{пот}}}{D}, \qquad (1)$$

где H — подведенное к топливу тепло (хладоресурс), кДж/кг, W — мощность нагрева, Вт, $W^*_{\text{пот}}$ — потери мощности в окружающую среду, Вт, D — массовый расход топлива, кг/с.

Потери мощности в окружающую среду находились как сумма потерь от сегментов поверхности испытательного реактора по формуле:

$$W^*_{\text{пот}} = \sum_{i=1}^{n} W^*_{\text{пот},i}, \tag{2}$$

где i — номер сегмента испытательного реактора (сегментом считается участок испытательного реактора, расположенный между термопарами), $W^*_{\text{пот},i}$ — потери тепла от сегмента испытательного реактора, Вт:

$$W^*_{\text{пот},i} = q_{\text{пот},i} \cdot F_i, \tag{3}$$

где $q_{\text{пот},i}$ — плотность теплового потока с i-го сегмента поверхности испытательного реактора при средней температуре этого сегмента (находится по ранее определенной зависимости $q_{\text{пот}} = f(t_{\text{ст.ср}})$, здесь $t_{\text{ст.ср}}$ — средняя температура стенки, Вт/м^2, F_i — площадь i-го сегмента, м^2. Зависимость температуры стенки трубки по длине от подводимой мощности нагрева (данные по температуре и мощности получены в процессе тарировки испытательного реактора) определяет плотность тепловых потерь $q_{\text{пот}}$.

Определение ПИВ топлив выполнялось с помощью нагреваемой ударной трубы ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рис. 2). Принцип работы ударной трубы заключается в нагреве и сжатии топливовоздушной смеси ударной волной, формируемой после разрыва диафрагмы, разделяющей камеру высокого давления и канал низкого давления.

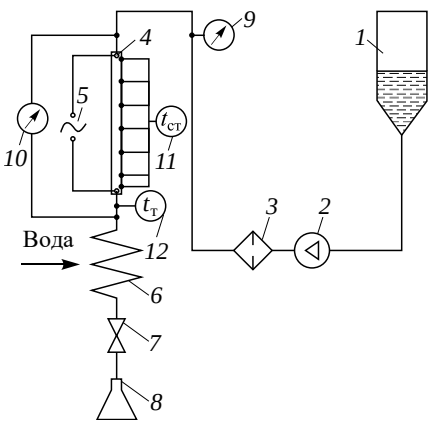

Рис. 1. Общая схема установки для определения хладоресурса.
1 — топливный сосуд, *2* — поршневой насос, *3* — фильтр, *4* — испытательный реактор, *5* — подвод электрического тока для нагрева испытательного реактора, *6* — змеевик, охлаждаемый водой, *7* — регулирующий дроссель, *8* — сливной сосуд, *9* — манометр, *10* — дифференциальный манометр, *11* — термопары для контроля температуры поверхности испытательного реактора ($t_{\text{ст}}$ — температура стенки), *12* — термопара для контроля температуры образца на выходе из испытательного реактора ($t_{\text{т}}$ — температура топлива).

Скорость ударной волны D определяется по разности времен срабатывания пьезодатчиков. За задержку воспламенения принимается время между регистрацией пьезодатчиком прохождения фронта ударной волны и регистрацией стабильного сигнала от оптического датчика, настроенного на длину волны излучения ОН-радикалов, которые образуются при воспламенении.

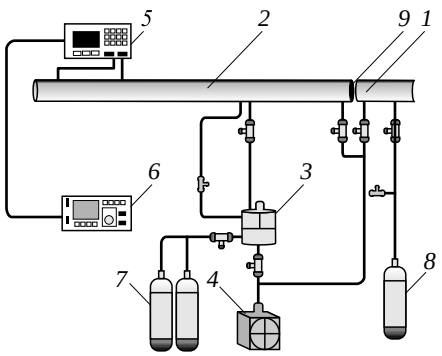

Рис. 2. Схема установки «Ударная труба».
1 — камера высокого давления, *2* — канал низкого давления, *3* — смеситель, *4* — вакуумный насос, *5* — система измерения, *6* — система регистрации, *7* — компоненты топливной смеси, *8* — газ-толкатель, *9* — диафрагма.

Расчет параметров состояния газа во фронте ударной волны, в том числе для пересчета значения ПИВ в неподвижной системе координат, выполнялся с помощью уравнений равновесия и Менделеева – Клапейрона [11]. Ошибка определения ПИВ не превышала 1,5 %, температуры за фронтом ударной волны — 1 %, давления за фронтом ударной волны — 1,5 %, скорости ударной волны — 3 %. Данные величины ошибок получены в результате анализа погрешностей используемых измерительных приборов и точности аппроксимации энтальпии.

Результаты и анализ

После 50 часов испытаний гидравлическое сопротивление канала реактора не изменилось, что свидетельствует об отсутствии отложений на внутренних стенках или их допустимом количестве. Условия теплообмена на внутренней поверхности оставались постоянными, так как изменения температуры во всех точках замера отсутствовали в течение 50 часов, что также подтверждает отсутствие образования отложений на внутренних стенках или их незначительном количестве.

Среднее относительное расхождение по расходу проливочной жидкости по всем точкам гидравлических характеристик до и после испытаний составило 3 % и не превысило установленного допустимого значения, равного 10 %.

По результатам испытаний значение хладоресурса образца ВУГ при нагреве от 20 до 300 °С составило 518 Дж/кг. В сравнении с другими российскими жидкими углеводородными топливами ВУГ имеет более высокую температуру эксплуатации вследствие его более высокой термостабильности (рис. 3). Максимальные температуры топлив Т-6 и ВУГ также соответствуют условию отсутствия активного образования отложений, но не являются предельными. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными по термостабильности горючего RP-1 [12].

Результаты определения ПИВ ВУГ в стехиометрическом соотношении с воздухом (рис. 4) хорошо коррелируют с данными по ПИВ топлива RP-1 [13]. Пониженные значения ПИВ ВУГ можно объяснить разницей в условиях проведения экспериментов. Давление при определении ПИВ топлива RP-1 составляло 10 бар, при определении ПИВ ВУГ — 14 – 16 бар.

ВУГ по сравнению с топливом ТС-1 обладает меньшими на 16 – 39 % значениями ПИВ во всем исследуемом диапазоне температуры, что может быть объяснено различным углеводородным составом, а именно: низким содержанием ароматических углеводородов (2,5 – 3 % по массе в ВУГ и до 22 % по массе в топливе ТС-1) и высоким содержанием нафтенов (до 85 % по массе) [6, 14]. Различия в величинах ПИВ топлив увеличиваются с понижением температуры.

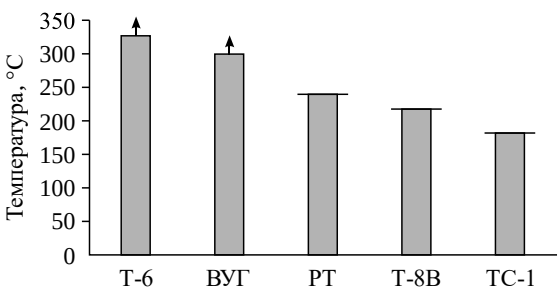

Рис. 3. Температуры, при которых отсутствует образование отложений.

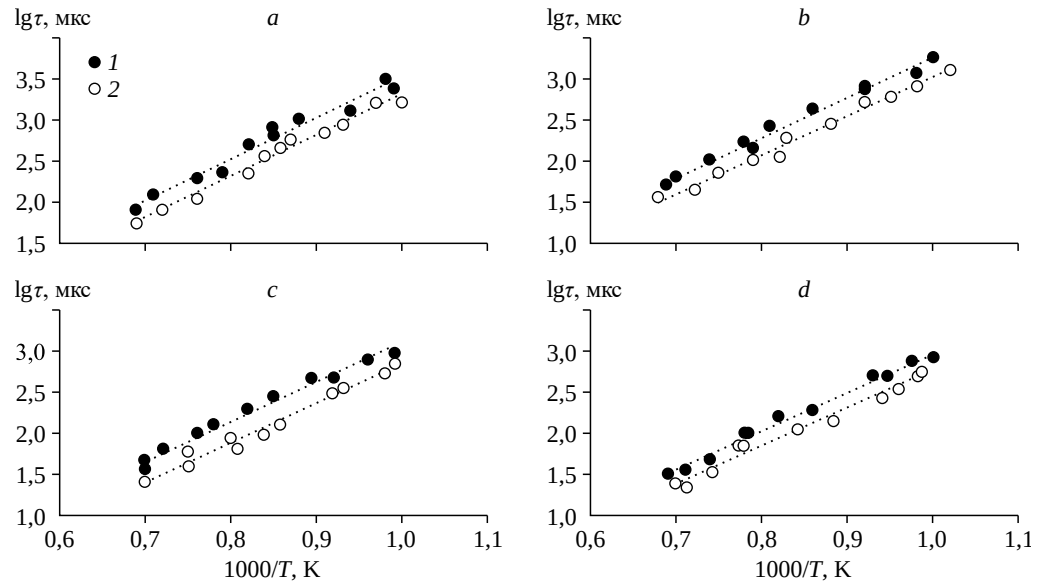

Рис. 4. ПИВ смесей ВУГ с воздухом и кислородом для различных значений α.
1 — смесь ВУГ и воздух, *2* — смесь ВУГ и кислород; α = 0,5 (*a*), 1 (*b*), 2 (*c*), 3 (*d*).

Определение ПИВ ВУГ (τ) проводилось при α = 0,5, 1, 2 и 3, в диапазоне давления 14 – 16 бар и температуры 1000 – 1500 K (рис. 4). Установлено, что ПИВ ВУГ при α = 2 снижается на 20 – 28 % относительно значений ПИВ при стехиометрическом соотношении с окислителем, при α = 3 — на 40 – 49 %, при α = 0,5 значения ПИВ ВУГ повышаются на 63 – 97 %. Замена воздуха на кислород приводит к снижению значений ПИВ ВУГ в среднем на 30 – 40 %.

Заключение

Впервые проведены исследования стойкости «зеленого» ВУГ к образованию отложений в трубчатом канале, хладоресурса и периода индукции воспламенения.

Показано, что ВУГ превосходит топливо ТС-1 по хладоресурсу и не уступает зарубежному горючему RP-1 по стойкости к образованию отложений при нагреве до предельных температур и по хладоресурсу.

Полученные значения периода индукции воспламенения ВУГ близки к данным по зарубежному аналогу — горючему RP-1. При этом ВУГ обладает меньшими значениями ПИВ в сравнении с топливом ТС-1 для реактивных двигателей в диапазоне температуры 1000 – 1500 K. Пожаробезопасность ВУГ и ТС-1 при этом, согласно нормативной документации, сопоставима.

Таким образом, ВУГ нового поколения дает возможность обеспечивать безопасную эксплуатацию многоразовых аэрокосмических систем по критериям термостабильности и воспламеняемости.

Список литературы

1. **Бакулин В.Н., Дубовкин Н.Ф., Котова В.Н., Сорокин В.А., Франкевич В.П.** Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. М.: Физматлит, 2009. 399 с.
2. **Яновский Л.С., Варламова Н.И., Федоров Е.П.** Исследования проблем взаимозаменяемости топлива Т-6 и нафтила при их применении в современных и перспективных изделиях ракетного вооружения с воздушно-реактивными двигателями // Прямоточные ВРД и химмотология. М.: ЦИАМ, 2010. 254 с.

3. **Chiarelli M.R., Borrometi F.B., Cipolla V., Vincenzo B., Salem K.A., Palaia G.** Design and feasibility study of novel flying wing carrier for launching small satellites in low earth orbit // Applied Sci. 2023. Vol. 13, No. 8. P. 4712-1–4712-12.
4. **Abdulagatov I., Azizov N.** Heat capacity of rocket propellant (RP-1 fuel) at high temperatures and high pressures // Fuel. 2011. Vol. 90, No. 2. P. 563–567.
5. **Беляев А.А., Трошин К.Я., Арутюнов В.С., Щукин Г.А., Власов П.А., Смирнов В.Н. и др.** Влияние состава синтез-газа на его воспламенение в области температур $T \leq 1000$ K // Горение и взрыв. 2023. Т. 16, № 2. С. 3–14.
6. **He D., Ding Y., Xiong X., Shi S., Zhimin P., Yan W.** Shock tube study of ignition-delay measurements and kinetic mechanism research for syngas // J. Propulsion and Power. 2018. Vol. 34, No. 4. P. 1–8.
7. **MacDonald M.E., Davidson D.F., Hanson R.K., Pitz W.J., Mehl M., Westbrook C.K.** Formulation of an RP-1 pyrolysis surrogate from shock tube measurements of fuel and ethylene time histories // Fuel. 2013. Vol. 103. P. 1051–1059.
8. **Bradley D., Lawes M., Materego M.** Interpretation of auto-ignition delay times measured in different rapid compression machines // Conf. 25th Intern. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive systems. 2015. P. 1–6.
9. **Stiegemeier B.R., Meyer M.L., Driscoll E.** RP-1 thermal stability and copper based materials compatibility study // National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center. 2005. P. 1–11.
10. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. 3-е изд. М.: Наука, 1986. 736 с.
11. **Широков И.А., Елизарова Г.Г.** Моделирование ударно-волновых структур на начальном участке недорасширенной сверхзвуковой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 2. С. 327–337.
12. **Iijima A., Nakata D., Sugioka M., Tanatsugu N., Higashino K., Ishimoto A. et al.** Rocket engine feasibility study for the JAXA future transportation reference system // Transactions of the Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan. 2016. Vol. 14, No. 30. P. 17–23.
13. **Gowdagiri S., Wang W., Oehlschlaeger M.A.** A shock tube ignition delay study of conventional diesel fuel and hydroprocessed renewable diesel fuel from algal oil // Fuel. 2014. Vol. 128. P. 21–29.
14. **Naser N., Sarathy S.M., Chung S.H.** Ignition delay time sensitivity in ignition quality tester (IQT) and its relation to octane sensitivity // Fuel. 2018. Vol. 233, No. 1. P. 412–419.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2024 г.,
принята к публикации 5 декабря 2024 г.