

УДК 662.612.12:533.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Л. С. Яновский<sup>1,2,3,4</sup>, А. Ю. Вараксин<sup>1</sup>, К. Ю. Арефьев<sup>1</sup>,  
В. М. Ежов<sup>1,2</sup>, С. И. Мартыненко<sup>5</sup>, Н. А. Червонная<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва,  
leonidyanovskiy@yandex.ru, arefyev@rambler.ru

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
142432 Черноголовка, vmezhev@ciam.ru

<sup>3</sup> Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 107564 Москва

<sup>4</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993 Москва

<sup>5</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва

Приведены экспериментальные данные по периоду индукции воспламенения синтетических углеводородов при различных температурах и давлениях, полученные при использовании ударной трубы. На основе результатов экспериментов установлено влияние периода индукции воспламенения на полноту сгорания углеводородов в высокоэнтальпийных потоках для диффузионно-кинетических режимов. Представлена интегральная математическая модель, учитывающая влияние кинетических факторов воспламенения и горения на завершенность физико-химических процессов в воздушном потоке. Приведены результаты расчетов полноты сгорания синтетических углеводородов в потоках с различными параметрами.

Ключевые слова: период индукции воспламенения, синтетический углеводород, полнота сгорания, математическая модель, ударная труба.

DOI 10.15372/FGV2022.9220

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности энергетических, силовых и технологических установок на углеводородных топливах тесно связано с решением двух основных научно-технических проблем: использование новых энергоемких высокомолекулярных синтетических углеводородов и повышение эффективности физико-химических процессов трансформации химической энергии в тепловую.

К числу весьма перспективных относятся каркасные синтетические углеводородные соединения с большой молярной массой ( $100 \div 200$  г/моль). Эти соединения могут иметь высокие положительные значения энтальпии образования (до 2 МДж/кг) и низшей теплоты

сгорания (более 44 МДж/кг) [1]. При этом использование синтетических соединений зачастую приводит к снижению скорости протекания химических реакций, что требуется учитывать при организации рабочего процесса в энергетических установках. Однако систематизированных экспериментальных данных по кинетике воспламенения и скорости горения таких углеводородов в воздухе в опубликованной литературе нет.

Согласно работам [2–5] одним из интегральных обобщающих параметров, характеризующих скорость химических реакций, является период индукции воспламенения  $t_{\text{инд}}$  топливно-воздушной смеси. В работах [6–8] показано, что период индукции значительно влияет на локализацию зоны интенсивного тепловыделения и стабильность факела при горении. Так, с уменьшением периода индукции воспламенения зона тепловыделения уменьшается, уровень тепловыделения растет, а факел пламени становится стабильнее. При малых значениях периода индукции горение протека-

Расчетно-теоретические исследования проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ИОХ РАН им. Н. Д. Зелинского № 075-15-2020-803).

© Яновский Л. С., Вараксин А. Ю., Арефьев К. Ю.,  
Ежов В. М., Мартыненко С. И.,  
Червонная Н. А., 2023.

ет преимущественно в диффузионном режиме [9, 10], в то время как увеличение периода способствует переходу горения в кинетический режим.

Важным показателем завершенности физико-химических процессов является коэффициент полноты сгорания  $\eta$ , который определяется как отношение выделившейся энергии при горении веществ к их низшей теплоте сгорания [11]. Известны различные способы определения коэффициента  $\eta$ , детально изложенные в работах [12, 13].

Широко известны исследования [9, 14], в которых проведено обобщение большого количества экспериментальных данных и установлены эмпирические зависимости полноты сгорания водорода и различных углеводородов в высокоэнтальпийных потоках. Разработанные математические модели практически удобны для инженерных оценок эффективности сгорания горючих в высокоэнтальпийных потоках. Однако такая оценка полноты сгорания, согласно работам [9, 15], наиболее достоверна для диффузионных режимов горения. Использование новых высокомолекулярных соединений с повышенными значениями  $t_{\text{инд}}$  или сокращение времени пребывания, располагаемого для организации процесса горения, приводят к возрастанию влияния кинетических процессов на полноту сгорания.

Таким образом, актуальным становится определение периода индукции воспламенения и прогнозирование его влияния на эффективность горения высокомолекулярных углеводородов в высокоэнтальпийных потоках.

Учитывая вышеизложенное, были поставлены следующие задачи:

1) установить закономерности влияния периода индукции воспламенения на полноту сгорания высокомолекулярных углеводородов в высокоэнтальпийных воздушных потоках для диффузионно-кинетических режимов;

2) адаптировать интегральную математическую модель, учитывающую влияние кинетических факторов воспламенения и горения на завершенность физико-химических процессов в неравновесном потоке;

3) экспериментально определить значения периода индукции воспламенения высокомолекулярных синтетических углеводородов при различных температурах;

4) установить зависимость полноты сгорания высокомолекулярных синтетических угле-

водородов в воздушных потоках от периода индукции воспламенения в различных условиях.

## ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДА ИНДУКЦИИ НА ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Обобщение большого количества экспериментальных данных позволило автору работы [9] предложить эмпирические закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных потоках. Эти закономерности нашли широкое применение при анализе данных и прогнозировании полноты сгорания горючих  $\eta$  в высокоэнтальпийных потоках.

Исходная зависимость [9], определяющая кривую выгорания, описывается уравнением

$$\eta = 1 - \exp(-0.13(\bar{Z} + 1)). \quad (1)$$

Здесь эквивалентная длина канала  $\bar{Z}$  может быть определена по уравнению

$$\bar{Z} = \bar{X} \cdot \bar{Y} / \sqrt{\bar{L}}, \quad (2)$$

где  $\bar{X}$  — относительная координата,  $\bar{Y}$  — теоретическая функция, обратная изменению длины пламени в диапазоне режимов,  $\bar{L}$  — приведенный стехиометрический коэффициент. Указанные параметры вычисляются по методике, изложенной в [9].

На основе закономерностей выгорания водорода в работе [15] была предложена адаптированная модель [9] для описания выгорания углеводородов. Авторы предложили заменить в зависимости (1) коэффициент  $-0.13$  на переменную  $k$ , определяемую полиномиальной зависимостью от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ :

$$k = 0.019\alpha^2 - 0.005\alpha - 0.132. \quad (3)$$

Адаптация модели [9] позволила авторам работы [15] приблизиться к возможности прогнозирования эффективности горения углеводородов в диффузионном режиме, однако она так же, как и исходная модель, не учитывает кинетических факторов, влияние которых на длину факела отмечалось еще в работах [9, 14].

По результатам анализа приведенных работ можно предположить, что наряду с режимами горения определяющее влияние на интенсивность выгорания горючего оказывает период индукции при параметрах, соответствующих значениям температуры и давления в потоке. Такие тенденции и некоторые физические

обоснования влияния периода индукции воспламенения на полноту сгорания представлены в работе [16].

В настоящей статье приведена модифицированная математическая модель, позволяющая учесть влияние типа горючего и температуры потока на кривую выгорания, т. е. на зависимость полноты сгорания от координаты.

Согласно уравнению (1) с поправкой (3), в месте инъекции горючих полнота сгорания  $\eta_0$  не равна нулю. Ее можно вычислить по соотношению

$$\eta_0 = 1 - \exp k. \quad (4)$$

Этот эффект является следствием возникновения рециркуляционного течения перед местом подачи горючего. За счет рециркуляционного течения часть подаваемого горючего попадает в зону, расположенную выше точки его инъекции, где и сгорает частично или полностью. Согласно [9, 14] для водорода наблюдается полное сгорание той части горючего, которая попадает в рециркуляционную зону еще до точки инъекции.

Наличие и размеры рециркуляционной зоны зависят от многих факторов, однако в исследуемых режимах в соответствии с [15] эта зона присутствует.

Согласно оценкам в рециркуляционную зону попадает 6 ÷ 14 % подаваемого горючего. Относительное количество попадающего в рециркуляционную зону горючего пропорционально достигаемой в точке инъекции полноте сгорания. Это подтверждается и анализом более поздних исследований [13, 15, 17–19].

Для более точного определения количества попадающего в рециркуляционную зону горючего требуется проведение дополнительных расчетно-экспериментальных исследований для конкретной геометрической конфигурации канала, системы инъекции и режимов течения. При этом следует учитывать пространственную структуру турбулентного течения и процессы тепло- и массообмена реагирующих вязких газов, особенно в области инъекции горючего.

Для сравнительного параметрического исследования количество попадающего в рециркуляционную зону горючего принято постоянным и равным 14 % от суммарного количества горючего, подаваемого в канал.

Для метана и других углеводородов не наблюдается полного сгорания горючего в рециркуляционной зоне.

Это связано с более высоким значением  $t_{\text{инд}}$  для углеводородов.

Отметим, что в рециркуляционной зоне обычно формируется смесь с локальным избытком воздуха. Поэтому лимитирующими факторами в этой зоне становятся скорость воспламенения и кинетика горения.

Будем полагать, что если время пребывания горючего в рециркуляционной зоне  $t_{\text{рц}}$  больше времени индукции  $t_{\text{инд}}$ , то сгорание части горючего в рециркуляционной зоне будет практически полным, в то время как при  $t_{\text{рц}} < t_{\text{инд}}$  полнота сгорания попавшего в рециркуляционную зону горючего будет неполной.

Характерное время  $t_{\text{рц}}$  пропорционально отношению двух линейных протяженностей рециркуляционной зоны к средней скорости течения в ней. При необходимости протяженность рециркуляционной зоны и соответствующее время пребывания в ней смеси  $t_{\text{рц}}$  могут определяться либо экспериментальным, либо расчетным методом.

Величина  $\eta_0$  может быть оценена из анализа распределения статического давления согласно методике [13]. Анализ в соответствии с методикой [13] результатов работ [9–11, 15, 17–20] дал возможность определить полноту сгорания различных горючих (водород, испаренный керосин, метан) в точке инъекции ( $\eta'_0$ ) в диапазоне температур воздушного потока 1 000 ÷ 2 000 К.

Значения  $t_{\text{инд}}$  этих веществ при различных условиях соответствуют данным, представленным в [17, 21–23]. Зависимость  $\Omega = \eta'_0/\eta$  от времени индукции воспламенения рассматриваемого горючего с воздухом при их стехиометрическом соотношении и термодинамических параметрах, соответствующих температуре и давлению воздушного потока, показана на рис. 1.

Величина  $\Omega$  может быть описана следующим образом:

$$\Omega = \begin{cases} 1, & t_{\text{рц}} \geq t_{\text{инд}}, \\ 1 - 0.06 \ln\left(\frac{t_{\text{инд}}}{t_{\text{рц}}}\right), & t_{\text{рц}} < t_{\text{инд}}. \end{cases} \quad (5)$$

При характерных размерах рециркуляционной зоны, принятых в настоящей работе, значения  $t_{\text{рц}}$  соответствуют диапазону  $(0.5 \div 10) \cdot 10^{-4}$  с.

Обработка экспериментов [9, 10, 15] показала, что производная роста полноты сгорания горючего по длине канала зависит от периода

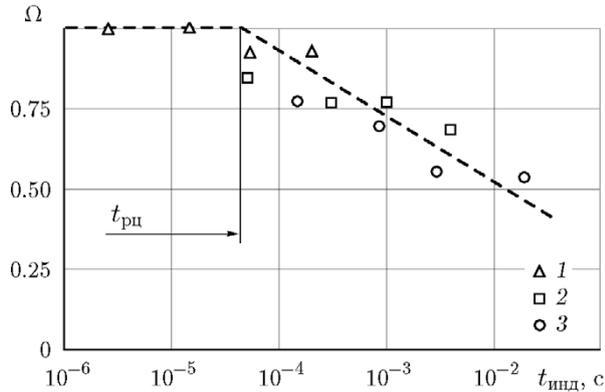


Рис. 1. Зависимость отношения  $\Omega$  от периода индукции воспламенения различных горючих: 1 — водород, 2 — керосин, 3 — метан; штриховая линия — аппроксимация

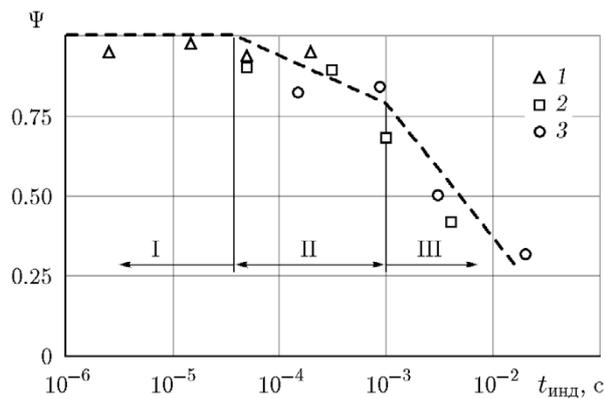


Рис. 2. Зависимость параметра  $\Psi$  от периода индукции воспламенения различных горючих: 1 — водород, 2 — керосин, 3 — метан

индукции (определенного для параметров воздушного потока). Наиболее характерной является производная роста  $\eta'$  в сечении подачи горючего.

Введем обозначение относительного изменения производной роста коэффициента полноты сгорания  $\frac{\partial \eta'}{\partial \bar{Z}}$  в сечении подачи горючего:

$$\Psi = \frac{\partial \eta'}{\partial \bar{Z}} \left( \frac{\partial \eta}{\partial \bar{Z}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\eta'$  — полнота сгорания с учетом периода индукции,  $\eta$  — полнота сгорания, рассчитанная по (1) с учетом (3). Анализ экспериментальных данных показывает (рис. 2), что в зависимости от значения  $t_{\text{инд}}$  можно выделить три зоны.

При  $t_{\text{инд}} < 5 \cdot 10^{-5}$  с (зона I)  $\Psi \approx 1$ , что указывает на диффузионный режим горения. В диапазоне  $5 \cdot 10^{-5} \leq t_{\text{инд}} < 10^{-3}$  с (зона II)

параметр  $\Psi$  снижается на  $\approx 20\%$ . Это указывает на взаимное влияние качества смешения и скорости протекания химических реакций на эффективность сгорания, а следовательно, и на переход в диффузионно-кинетический режим горения. При  $t_{\text{инд}} \geq 10^{-3}$  с снижение  $\Psi$  более значительное, очевидным становится преобладающее влияние скорости химических реакций, следовательно, горение переходит в кинетический режим (зона III).

Параметр  $\Psi$  можно интерполировать следующей кусочно-заданной функцией:

$$\Psi = \begin{cases} 1, & t_{\text{инд}} > 5 \cdot 10^{-5}, \\ 1 - 0.067 \ln(2 \cdot 10^4 \cdot t_{\text{инд}}), & 5 \cdot 10^{-5} \leq t_{\text{инд}} < 10^{-3}, \\ 0.8 - 0.2 \ln(10^3 \cdot t_{\text{инд}}), & 5 \cdot 10^{-5} \leq t_{\text{инд}} < 10^{-3}. \end{cases} \quad (7)$$

Обобщая полученные данные на основе формулы (1) с учетом зависимостей (3), (5), (7), можно записать уравнение для определения полноты сгорания с учетом  $t_{\text{инд}}$  в каналах, близких по своей геометрической конфигурации к каналу, представленному в работе [10]:

$$\eta = 1 - a \exp(k(b \cdot \bar{Z} + 1)), \quad (8a)$$

$$a = \frac{1 - \Omega(1 - \exp k)}{\exp k}, \quad (8б)$$

$$b = \Psi/a. \quad (8в)$$

Поскольку диапазон значений  $t_{\text{инд}}$  достаточно широкий, уравнения (8a), (8б), (8в) могут быть использованы для различных типов горючего и температур воздуха. По этим уравнениям был проведен расчет кривых выгорания водорода, керосина и метана (рис. 3) при их стехиометрическом соотношении с воздухом, имеющим температуру 1 200 К, для конфигурации экспериментальной установки из работы [10].

На рис. 3 по оси абсцисс отложена относительная координата  $x/x_{\text{max}}$ , где  $x$  — текущая координата от места инъекции горючего,  $x_{\text{max}}$  — длина канала экспериментальной установки. Приведенные на рис. 3 кривые характеризуются тем, что горение водорода происходит в диффузионном режиме, керосина — в диффузионно-кинетическом, а метана — в кинетическом. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что их отличие в выходном сечении канала не превышает 4 %.

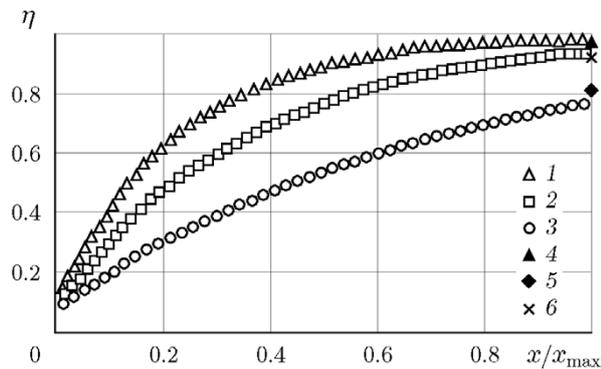


Рис. 3. Зависимость полноты сгорания различных горючих от относительной координаты: расчет: 1 — водород, 2 — керосин, 3 — метан; эксперимент: 4 — водород, 5 — керосин, 6 — метан

Из вышеизложенного следует, что представленная математическая модель может быть использована для широкого класса углеводородов. Однако для оценки полноты сгорания высокомолекулярных синтетических углеводородов требуется определить их периоды индукции.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения периода индукции воспламенения высокомолекулярных синтетических углеводородов в настоящей работе использована экспериментальная установка на основе ударной трубы [24]. Преимуществом ударной трубы является возможность проводить исследования параметров воспламенения газовых смесей в широком диапазоне температур и давлений.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из канала низкого давления (КНД), камеры высокого давления (КВД) и смесителя. В ее состав входят измерительная и вакуумная системы.

Внутренний диаметр КНД и КВД составляет 76 мм. Длина КВД равна 1.5 м, а КНД — 4.5 м. КВД и КНД разделены металлической диафрагмой. Вблизи торцевой части КНД размещены пьезоэлектрические датчики давления и оптическая система с электрическим фотомножителем.

Газовая смесь готовится в смесителе установки с механической мешалкой (для гомогенизации газовой смеси). Для этого смеситель сначала вакуумируют, затем подают в него осушенный воздух и пары энергоемкого углеводорода. Контроль количества напускаемых газов

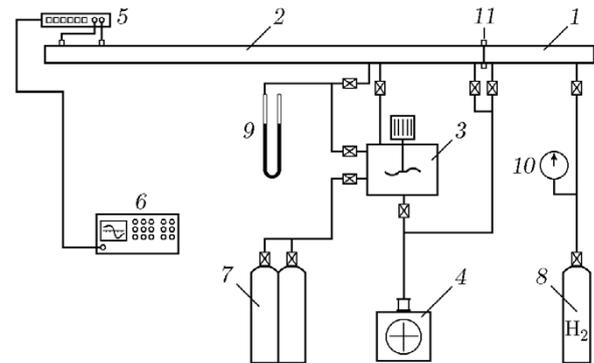


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — КВД, 2 — КНД, 3 — смеситель, 4 — вакуумный насос, 5 — измерительная система, 6 — система сбора информации, 7 — система подачи компонентов в смеситель, 8 — система наполнения КВД, 9, 10 — манометры, 11 — разделительная диафрагма

и, соответственно, состава смеси осуществляется по показаниям манометра. Вакуумирование КВД и КНД производится с помощью насоса до остаточного давления не более  $10^{-3}$  Торр. За счет разницы давлений исследуемая газовая смесь поступает в КНД. КВД наполняется толкающим газом (в работе использовался гелий) до необходимого давления. При необходимости реализуется подогрев ударной трубы. Контур обогрева обеспечивает повышение давления насыщенных паров жидких компонентов исследуемой смеси.

После прорыва диафрагмы происходит расширение толкающего газа и формирование падающей ударной волны в исследуемой газовой смеси. За фронтом падающей ударной волны повышаются температура и давление смеси, что приводит к ее воспламенению. Термодинамические параметры за фронтом ударной волны, при которых смесь воспламеняется, определяются с помощью измеренной скорости ударной волны по известным соотношениям [25–27]. При этом скорость ударной волны  $D$  определяется по разности времен срабатывания пьезодатчиков  $\Delta t$  и известному расстоянию  $l$  между ними:

$$D = \frac{l}{\Delta t}. \quad (9)$$

В качестве лабораторного времени, соответствующего процессу воспламенения исследуемой смеси  $t_1$ , принимается время между регистрацией пьезодатчиком прохождения фронта ударной волны и регистрацией стабильного

сигнала от оптического датчика, настроенного на длину волны излучения радикалов ОН, которые образуются при воспламенении. При определении периода индукции, инициированной падающей ударной волной, учтена скорость движения увлекаемого ею газа  $v_2$ :

$$t_{\text{инд}} = \frac{t_1}{1 - v_2/D}. \quad (10)$$

Скорость  $v_2$  рассчитывается при помощи соотношений [27] на ударной волне, движущейся с известной скоростью  $D$  по покоящемуся газу. В рассматриваемых условиях  $D = 1 \div 2$  км/с, а  $v_2 = 0.25 \div 0.33$  км/с.

### ПЕРИОДЫ ИНДУКЦИИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

В работе определены периоды индукции воспламенения пяти высокомолекулярных углеводородов, которые характеризуются значениями энтальпии образования  $\Delta H_0$  (в системе А. П. Ваничева), приведенными в табл. 1.

Обратим внимание, что рассмотренные углеводороды обладают положительной энтальпией образования, т. е. имеют высокий запас энергии в единице массы, вследствие напряженного их состояния и низкой энергии связи атомов в молекулах вещества.

Период индукции воспламенения углеводородов определяли при начальной температуре ударной трубы и образца  $303 \div 323$  К, начальное давление топливоздушнoй смеси в КНД составляло  $20 \div 120$  Торр.

Значения  $t_{\text{инд}}$  получены при температуре  $T = 700 \div 2300$  К и давлении  $p = 0.5 \div 1.3$  бар. Влияние давления на  $t_{\text{инд}}$  в указанном диапазоне не установлено.

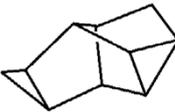
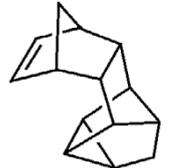
Экспериментальные данные по периоду индукции рассматриваемых веществ в зависимости от температуры представлены на рис. 5.

Повышение температуры приводит к экспоненциальному снижению  $t_{\text{инд}}$  всех рассмотренных веществ. Так, при  $T < 1000$  К для всех веществ  $t_{\text{инд}} > 2000$  мкс. В диапазоне  $t = 1000 \div 1500$  К значения  $t_{\text{инд}}$  снижаются до  $850 \div 150$  мкс, а при  $T > 2000$  К могут составлять менее 100 мкс.

Отметим, что для углеводородов наблюдается тенденция уменьшения периода индукции воспламенения с ростом энтальпии образования. Так, для веществ с одинаковой молярной массой 120 г/моль (вещества 1 и 2) снижение происходит примерно на 10 % с увеличением  $\Delta H_0$  на 408 кДж/кг. Это может быть

Таблица 1

Характеристики углеводородов

Номер вещества	Формула	$\Delta H_0$ , кДж/кг
1		1486
2		1894
3		1840
4		606
5		1232

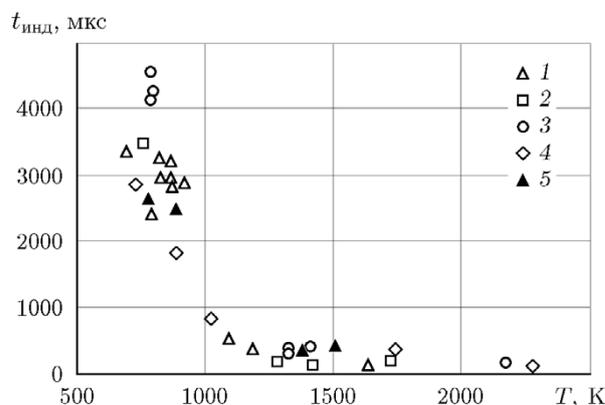


Рис. 5. Зависимость периода индукции воспламенения различных углеводородов (1–5, см. табл. 1) от температуры

Таблица 2

## Прогнозные оценки полноты сгорания углеводородов

$x/x_{\max}$	Коэффициент полноты сгорания					
	Вещество 1			Вещество 2		
	$T_{\text{в}} \approx 700 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 1000 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 1500 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 700 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 1500 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 2000 \text{ K}$
0	0.088	0.101	0.111	0.087	0.103	0.108
0.2	0.379	0.501	0.546	0.366	0.512	0.531
0.4	0.578	0.723	0.768	0.560	0.734	0.754
0.6	0.713	0.846	0.881	0.695	0.855	0.871
0.8	0.804	0.914	0.939	0.788	0.921	0.932
1.0	0.867	0.953	0.969	0.853	0.957	0.964
$x/x_{\max}$	Вещество 3		Вещество 4		Вещество 5	
	$T_{\text{в}} \approx 700 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 1500 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 2000 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 1000 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 2000 \text{ K}$	$T_{\text{в}} \approx 1500 \text{ K}$
	0	0.086	0.102	0.108	0.097	0.111
0.2	0.349	0.506	0.534	0.485	0.549	0.503
0.4	0.536	0.728	0.756	0.706	0.771	0.725
0.6	0.670	0.851	0.873	0.832	0.884	0.848
0.8	0.765	0.918	0.933	0.904	0.941	0.916
1.0	0.833	0.955	0.965	0.945	0.970	0.954

следствием интенсификации химических реакций за счет выделения дополнительной энергии при разрыве напряженных связей атомов в молекуле углеводорода.

Также прослеживается тенденция увеличения периода индукции с ростом молярной массы вещества. Обратим внимание на вещества 2 и 3 с примерно одинаковой энтальпией образования (1894 и 1840 кДж/кг), но со значительно различающейся молярной массой. Для вещества с молярной массой 132 г/моль период индукции в 1.3 ÷ 2.4 раза больше, чем для вещества с молярной массой 120 г/моль. Причиной этого может служить увеличение доли углерода в веществах с высокой молярной массой и увеличение количества молекулярных связей.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для оценки эффективности воспламенения и горения углеводородов в высокоэнтальпийных потоках.

### ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ

Прогноз полноты сгорания испаренных углеводородов 1–5 выполнен для приведенной

в [10] конфигурации канала с использованием зависимости (5) и экспериментальных данных по периоду индукции воспламенения. Оценки представлены в табл. 2 для температур воздуха  $T_{\text{в}} = 700 \div 2000 \text{ K}$ .

Результаты расчетов показывают, что для рассматриваемых углеводородов полнота сгорания в выходном сечении канала при  $T_{\text{в}} \approx 700 \text{ K}$  находится на уровне 0.833 ÷ 0.867. При этом рост температуры  $T_{\text{в}}$  выше 1500 K дает возможность обеспечить в рассматриваемой экспериментальной установке полноту сгорания выше 0.954, причем наибольшие значения достигаются для горючих 1 и 4.

Полученные данные могут быть использованы при экспериментальных исследованиях полноты сгорания различных углеводородов в воздушных потоках, а также для валидации и верификации расчетных моделей.

### ВЫВОДЫ

1. Установлено, что период индукции воспламенения влияет на начальную величину и производную роста полноты сгорания углеводородных соединений. Наиболее сильное влия-

яние этого параметра наблюдается в кинетическом режиме горения углеводородов (при  $t_{\text{инд}} > 10^{-3}$  с): производная роста снижается до четырех раз относительно диффузионного режима горения. На основе детального анализа опубликованных ранее экспериментальных данных адаптирована интегральная математическая модель, учитывающая влияние кинетических факторов воспламенения и скорости горения на завершенность физико-химических процессов в неравновесном потоке.

2. В результате экспериментального определения периода индукции воспламенения высокомолекулярных углеводородов с молярной массой  $120 \div 184$  г/моль и положительной энтальпией образования  $606 \div 1894$  кДж/кг получено:

— при температурах ниже 1000 К для всех углеводородов период индукции превышает 2000 мкс;

— в диапазоне температур  $1000 \div 1500$  К период индукции снижается до  $850 \div 150$  мкс;

— минимальные значения периода индукции при температурах выше 2000 К не превышают 100 мкс.

3. Отмечена тенденция снижения периода индукции с ростом энтальпии образования. Увеличение энтальпии образования на  $\approx 400$  кДж/кг приводит к снижению периода индукции на 10 %. Увеличение доли углерода в молекуле и соответствующий этому рост молярной массы от 120 до 132 г/моль для углеводородов с примерно одинаковой энтальпией образования (около 1850 кДж/кг) приводят к увеличению периода индукции в 1.3  $\div$  2.4 раза в рассмотренном диапазоне температур.

4. Расчетные оценки показали, что для рассматриваемых высокомолекулярных углеводородов коэффициент полноты сгорания в выходном сечении канала при температуре воздуха около 700 К находится на уровне  $0.833 \div 0.867$ . Повышение температуры воздуха выше 1500 К обеспечивает в рассматриваемом канале полноту сгорания более 0.954. При этом наиболее высокая полнота сгорания может реализоваться для углеводородов 1 и 4.

Авторы выражают благодарность инженеру М. А. Ильиной за помощь в проведении экспериментальных исследований на установке ударная труба.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шигабиев Т. Н., Яновский Л. С., Галимов Ф. М., Иванов В. Ф. Эндотермические топлива и рабочие тела силовых и энергетических установок. — Казань: Изд. центр «АБАК», 1996.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.
3. Pang G. A., Davidson D. F., Hanson R. K. Experimental study and modeling of shock tube ignition delay times for hydrogen-oxygen-argon mixtures at low temperatures // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32, N 1. — P. 181–188. — DOI: 10.1016/j.proci.2008.06.014.
4. Старик А. М., Савельев А. М., Титова Н. С. Особенности воспламенения и горения композитных топлив, содержащих наночастицы алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 2. — С. 64–91.
5. Азатян В. В., Прокопенко В. М., Тимербулатов Т. Р. Управление горением, взрывом и детонацией газов методами химической кинетики // Журн. физ. химии. — 2020. — Т. 94, № 1. — С. 32–39. — DOI: 10.31857/S0044453720010021.
6. Cheng R. K., Oppenheim A. K. Autoignition in methane-hydrogen mixtures // Combust. Flame. — 1984. — V. 58, N 2. — P. 125–139. — DOI: 10.1016/0010-2180(84)90088-9.
7. Zhang M., Wang J., Xie Y., Jin W., Wei Z., Huang Z., Kobayashi H. Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air flames // Int. J. Hydrogen Energy. — 2013. — V. 38, N 26. — P. 11421–11428. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.051.
8. Албегов Р. В., Виноградов В. А., Шихман Ю. М. Горение метана при различных схемах впрыска в воздушный поток с большими дозвуковыми скоростями // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 18–29. — DOI: 10.15372/FGV20160102.
9. Аннушкин Ю. М. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 59–71.
10. Grishin I., Zakharov V., Aref'ev K. Experimental study of methane combustion efficiency in a high-enthalpy oxygen-containing flow // Appl. Sci. — 2022. — V. 12, N 2. — 899. — DOI: 10.3390/app12020899.
11. Аверьков И. С., Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Воронежский А. В., Гуськов О. В., Прохоров А. Н., Яновский Л. С. Влияние полноты сгорания топлива на характеристики прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Теплофизика высоких температур. — 2016. — Т. 54, № 6. — С. 939–949. — DOI: 10.7868/S0040364416050045.

12. Орлик Е. В., Старов А. В., Шумский В. В. Определение газодинамическим способом полноты выгорания в модели с горением // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 23–34.
13. Арефьев К. Ю., Кукшинов Н. В., Серпинский О. С. Методика экспериментального определения полноты сгорания потоков топливной смеси в каналах переменного сечения // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2017. — № 5. — С. 90–102.
14. Sosounov V. A. Research and Development of Ramjets/Ramrockets. Part 1. Integral Solid Propellant Ramrockets // AGARD Lect. Ser. — 1994. — P. 10–12.
15. Александров В. Ю., Кукшинов Н. В. Модифицированная кривая выгорания для модельных высокоскоростных камер сгорания, интегрированных с воздухозаборным устройством // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 32–36. — DOI: 10.15372/FGV20160304.
16. Талантов А. В. Основы теории горения. — Казань: Изд-во КАИ, 1975.
17. Гольдфельд М. А. Процесс самовоспламенения и стабилизации пламени в водородной сверхзвуковой камере сгорания при поперечной подаче топлива // Теплофизика и аэромеханика. — 2020. — Т. 27, № 4. — С. 601–613.
18. Виноградов В. А., Гольдфельд М. А., Старов А. В. Исследование воспламенения и горения водорода в канале при высоких сверхзвуковых скоростях потока на входе в канал // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 3–11.
19. Левин В. А., Карасев В. Н., Картовицкий Л. Л., Крымов Е. А., Скачков О. А. Испытания двухрежимного ПВРД с горением керосина // Теплофизика и аэромеханика. — 2015. — Т. 22, № 5. — С. 591–597.
20. Tausif Sk Md, Das K., Kundu P. K. Modified homogeneous and heterogeneous chemical reaction and flow performance of Maxwell nanofluid with Cattaneo–Christov heat flux law // J. Eng. Thermophys. — 2022. — V. 31, N 1. — P. 64–77. — DOI: 10.1134/S1810232822010064.
21. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. — М.: Физматлит, 2008.
22. Тропин Д. А., Федоров А. В., Пенязков О. Г., Лещевич В. В. Время задержки воспламенения метановоздушной смеси в присутствии частиц железа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 11–20.
23. Gusev S. V., Nikoporenko A. V., Zakharov V. S., Ezhov V. M., Varaksin A. Yu., Yanovsky L. S., Arefiev K. Yu. The period of ignition delay for methane — air mixture with hydrogen and ethylene additives // Appl. Sci. — 2021. — V. 11, N 22. — 10515. — DOI: 10.3390/app112210515.
24. Азатян В. В. Особенности физико-химических механизмов и кинетических закономерностей горения, взрыва и детонации газов // Кинетика и катализ. — 2020. — Т. 61, № 3. — С. 291–311. — DOI: 10.31857/S0453881120030041.
25. Wang S., Fan B. C., He Y. Z., Cui J. P. Shock tube study of kerosene ignition delay // 26th Int. Symp. Shock Waves. — 2007. — V. 1. — P. 775–780.
26. Davidson D. F., Horning D. C., Herbon J. T., Hanson R. K. Shock tube measurements of JP-10 ignition // Proc. Combust. Inst. — 2000. — V. 28, N 2. — P. 1687–1692. — DOI: 10.1016/S0082-0784(00)80568-8.
27. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1976.

*Поступила в редакцию 31.08.2022.*

*После доработки 01.12.2022.*

*Принята к публикации 14.12.2022.*