

БЕСПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ КРУПНОЙ КАПЛИ Н-ДОДЕКАНА В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ*

С. М. Фролов¹, В. Я. Басевич², С. Н. Медведев³, Ф. С. Фролов⁴

Аннотация: На основе физико-математической модели горения капли и детального кинетического механизма (ДКМ) окисления и горения н-додекана $C_{12}H_{26}$ изучены особенности вынужденного зажигания и горения, а также самовоспламенения крупной (2–4 мм) капли н-додекана в атмосфере воздуха при нормальном давлении в условиях микрогравитации. Выбор н-додекана связан с проведением в 2017 г. российско-американского космического эксперимента (КЭ) «Зарев» на Международной космической станции (МКС) с использованием капель этого углеводорода. Проведенный анализ углубляет наши знания о беспламенном горении капли в условиях микрогравитации. Расчетами показано, что после радиационного погасания «горячего» пламени крупная капля может продолжать испаряться благодаря экзотермическому низкотемпературному окислению паров горючего с многократными вспышками голубого и горячего пламени при характерной температуре 950 К. Детальный анализ результатов расчета показывает, что регулярные всплески температуры возникают вследствие термического распада пероксида водорода — разветвления с выходом гидроксильных радикалов.

Ключевые слова: горение капли; н-додекан; микрогравитация; низкотемпературное окисление; голубое пламя; расчет

1 Введение

В [1–3] и более поздних работах тех же авторов сообщалось о новом не наблюдавшемся ранее явлении радиационного затухания сферического горячего пламени вокруг одиночных крупных (диаметр 2–5 мм) капель индивидуального углеводородного горючего (н-гептана) с их последующим беспламенным низкотемпературным окислением в условиях микрогравитации, а также о расчетных исследованиях этого явления (КЭ проводился на МКС). Обнаруженное в [1–3] беспламенное низкотемпературное окисление капель иногда сопровождалось кратными всплесками температуры и тусклым свечением голубоватого цвета. Этому явлению американские исследователи дали название: «холоднопламенное горение» капли.

В [4] на основе одномерной сферически-симметричной математической модели нестационарного горения капли [5] и ДКМ окисления и горения н-гептана [6] воспроизведены все основные особенности обнаруженного явления и предсказано существование новых режимов беспламенного низкотемпературного окисления крупных капель без стадии горячего пламени. Единственное изме-

нение в модели [5] и в ДКМ заключалось в учете излучения сажи, образующейся при горении.

В соответствии с результатами [1–4] радиационное затухание горячей крупной капли в условиях микрогравитации связано с образованием вокруг капли сферической оболочки из очень мелких (нанометрового диапазона) частиц сажи, которые поглощают часть тепловой энергии пламени и излучают ее в окружающую среду, приводя тем самым к безвозвратным потерям энергии и прогрессирующему снижению скорости испарения капли и скорости горения паров горючего до тех пор, пока не установится новый квазистационарный режим беспламенного горения капли — ее низкотемпературное окисление с возможными скачками температуры — или пока горячие газы вокруг капли полностью не охладятся до температуры окружающей среды, т.е. произойдет полное погасание пламени. Что касается интерпретации экспериментальных наблюдений поведения капли после радиационного затухания «горячего» пламени, мы считаем, что здесь следует говорить о низкотемпературном беспламенном горении.

Во-первых, явление холодного пламени давно известно как для газов, так и для капель и за-

* Исследования проведены в рамках исполнения работ по КЭ «Зарев».

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

²Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, basevich@chph.ras.ru

³Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, medvedevs@chph.ras.ru

⁴Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

ключается в регистрации очень тусклого свечения возбужденного формальдегида CH_2O при термическом распаде алкилгидропероксидов, образующихся при окислении алкановых углеводородов при температурах 600–800 К.

Во-вторых, расчеты [4] показывают, что после радиационного погасания «горячего» пламени температура газа в ближайшей окрестности капли значительно выше температуры, характерной для холодного пламени, и может превышать ~ 1000 К. Окисление паров горючего при такой температуре приводит к накоплению другого продукта неполного окисления — пероксида водорода H_2O_2 , при термическом распаде которого также регистрируется свечение (так называемое «голубое» пламя [7]), но не возбужденного формальдегида, а возбужденного формила CHO . К тому же интенсивность свечения голубого пламени значительно выше, чем холодного.

Таким образом, мы полагаем, что после погасания «горячего» пламени крупная капля может продолжать испаряться благодаря низкотемпературному окислению паров горючего с многократными вспышками холодного (редко), голубого и горячего пламени, а не исключительно холодного пламени. Такое горение капли мы предлагаем называть беспламенным, а не «холоднопламенным».

В целом, основная предпосылка работы [4], заключающаяся в однотипности химической кинетики процессов самовоспламенения гомогенных горючих смесей и горения капель в режиме низкотемпературной реакции окисления, оказалась справедливой. В данной работе на основе той же модели горения капли [5] и ДКМ окисления и горения н-додекана $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ [8], но с учетом излучения сажи, как это сделано в [4] (сохранены все принятые там характеристики излучения), исследуются особенности горения крупной капли н-додекана в атмосфере воздуха в условиях микрогравитации. Выбор н-додекана связан с проведением в 2017 г. нового КЭ на МКС (КЭ «Зарев») с использованием капель этого углеводорода. Представленный ниже анализ направлен на углубление наших знаний

о беспламенном горении капли в условиях микрогравитации, а используемую методику численных расчетов следует рассматривать как методику для анализа экспериментальных данных.

2 Вынужденное зажигание

Зажигание электрическим разрядом, применявшееся в экспериментах [1–3] и в КЭ «Зарев», в наших расчетах сначала моделировалось размещением вокруг капли сферического поджигающего слоя определенной толщины Δ с высокой температурой (2000 К), приводящего к возникновению первичного «горячего» пламени. При этом «горячее» пламя вокруг капли возникало не всегда, а только при теплосодержании поджигающего слоя (зависящем от его толщины), превышающем некоторое минимальное значение. Для зажигания капли н-додекана минимальное значение теплосодержания слоя оказалось несколько больше, чем для капли н-гептана в [4], чего и следовало ожидать ввиду меньшей летучести паров н-додекана.

Расчеты показали, что динамика всего процесса горения капли — радиационного затухания первичного «горячего» пламени, последующего беспламенного низкотемпературного окисления и даже частота вспышек — существенно зависит от теплосодержания поджигающего слоя: его толщины Δ . Толщина поджигающего слоя может определять и скорость горения капли. Константу скорости горения капли κ определяют по наклону функции $(D/D_0)^2(t)$. В таблице представлены расчетные значения константы горения капли κ в зависимости от Δ . Видно, что расчетные значения κ варьируются от 0,500 до 0,00923 $\text{мм}^2/\text{с}$. Отметим, что измеренные значения κ для крупных капель н-додекана начального диаметра от 2 до 4 мм изменяются в пределах 0,378–0,398 $\text{мм}^2/\text{с}$. Расхождение расчетных и экспериментальных значений κ может быть связано с различием расчетных и экспериментальных поджигающих температурных полей.

Полученные расчетные результаты могут означать, что изменение каких-либо особенностей за-

Расчетные значения константы горения

Толщина слоя	$t, \text{с}$	$T, \text{К}$	Число высокотемпературных пиков	$\kappa, \text{мм}^2/\text{с}$
Δ	7,00–18,0	$\sim 1150^{1)}$	Много	0,500
$0,96\Delta$	9,00–17,0	~ 1150	2	0,491
$0,94\Delta$	3,20–8,80	950	Нет	0,422
$0,93\Delta$	15,0–30,0	~ 400	Нет	0,009

¹⁾Уровень нижней огибающей температур.

жигания в эксперименте (расстояние электродов от капли и др.) или характеристик поджигающего электрического разряда может повлиять на наблюдаемую динамику процесса. Поскольку в настоящее время адекватное физико-математическое моделирование трехмерного процесса зажигания капли электрическим разрядом не представляется возможным, для изучения фундаментальных особенностей низкотемпературного беспламенного горения капель необходимо использовать постановку задачи, исключающую неопределенности такого рода. Следуя результатам [4], мы предлагаем исследовать не вынужденное зажигание капли, а ее самовоспламенение в равномерно нагретом газе.

3 Самовоспламенение

Переход от задачи с вынужденным зажиганием капли в воздухе к задаче о ее самовоспламенении в условиях микрогравитации также приводит к режиму низкотемпературного беспламенного горения капли [4]. Однако, в отличие от задачи с вынужденным зажиганием, в задаче о самовоспламенении нет неопределенности в начальных условиях: считается, что капля «мгновенно» помещается в безграничную атмосферу покоящегося воздуха, равномерно нагретого до некоторой начальной температуры T_0 . В этом случае протекание всех физико-химических процессов зависит только от заранее известных определяющих параметров задачи: типа горючего и его свойств в жидком и парообразном состоянии, начального диаметра капли D_0 , а также начальных температур капли T_{d0} и воздуха T_0 .

На рис. 1 показаны результаты расчетов самовоспламенения капли н-додекана начального диаметра $D_0 = 4$ мм с $T_{d0} = 293$ К в воздухе при $P = 0,1$ МПа и при 5 разных значениях начальной температуры T_0 : 600, 700, 800, 900 и 1000 К. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — максимальная температура газа вокруг капли. Судя по кривой для $T_0 = 600$ К, самовоспламенение капли многостадийное: сначала после длительного периода индукции (~ 21 с) возникает холодное пламя со ступенчатым повышением температуры до $T_m \approx 780$ К, далее следует волна голубого пламени со ступенчатым повышением температуры $T_m \approx 1000$ К, а потом возникает вспышка горячего пламени с повышением температуры до $T_m \approx 1820$ К. Точно так же, как и в задаче с вынужденным воспламенением, горячее пламя погасает вследствие образования вокруг капли сажевой оболочки и связанных с этим необратимых потерь энергии на излучение. При погасании горячего пламени мак-

симальная температура газов в окрестности капли уменьшается до уровня ~ 1100 К и после некоторой временной задержки (около 2 с) в пространстве вокруг капли начинаются вспышки голубого пламени, переходящие во вспышки горячего пламени, сначала нерегулярные, а затем регулярные.

Аналогичное поведение капли наблюдается в расчетах с другими значениями начальной температуры воздуха T_0 с тем лишь отличием, что по мере увеличения T_0 многостадийность самовоспламенения постепенно вырождается: эффекты ступенчатого нарастания температуры на начальных участках кривых $T(t)$ становятся все более неразличимыми. Интересно, что уровень максимальной температуры, при котором происходят регулярные вспышки (~ 1100 К), не зависит от начальной температуры воздуха и совпадает со значением, полученным в задаче о вынужденном зажигании капли. Этот факт свидетельствует о существовании какого-то физико-химического процесса, определяющего такое поведение. Чтобы идентифицировать этот процесс, рассмотрим в деталях, что же происходит в интервалах времени между последовательными всплесками температуры.

Анализируя динамику пространственных распределений массовой доли гидроксила Y_{OH} , которая отражает суммарную скорость химических превращений, в интервалы времени, включающие всплески, обнаруживаем, что во всех этих интервалах времени Y_{OH} сначала быстро возрастает на некотором расстоянии от капли. Далее максимум Y_{OH} смещается ближе к капле и, достигнув наибольшего значения (на уровне 0,0002), быстро спадает и перемещается дальше от капли. Первичное нараста-

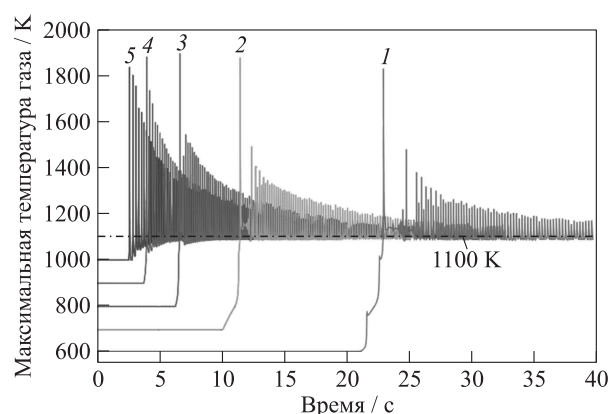


Рис. 1 Расчетные зависимости максимальной температуры газа от времени при самовоспламенении капли н-додекана начального диаметра $D_0 = 4$ мм с $T_{d0} = 293$ К в воздухе при $P = 0,1$ МПа и при пяти значениях начальной температуры: 1 — $T_0 = 600$ К; 2 — 700; 3 — 800; 4 — 900; 5 — $T_0 = 1000$ К

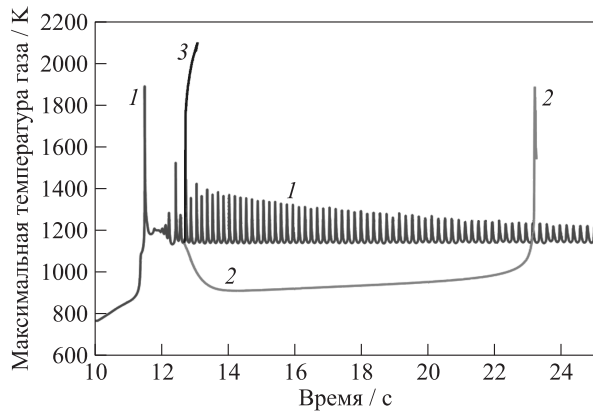


Рис. 2 Сравнение трех расчетов горения капли н-додекана начального диаметра $D_0 = 4,0$ мм с $T_{a0} = 300$ К в воздухе при $P = 0,1$ МПа и $T_0 = 600$ К: 1 — полный расчет; 2 — расчет с деактивированной реакцией распада пероксида водорода; 3 — расчет с деактивированными радиационными потерями

ние массовой доли гидроксила происходит именно там, где достигается максимальная концентрация пероксида водорода и он начинает термически разлагаться, причем максимумы массовых долей пероксида водорода и гидроксила одновременно смещаются ближе к капле, а затем дальше от капли.

На пространственных распределениях температуры в местах, где достигаются максимальные массовые доли гидроксила и пероксида водорода, возникают локальные максимумы, приводящие к кратковременным подъемам температуры приблизительно с 950 до 1200 К. Указанные кратковременные подъемы температуры соответствуют вспышкам голубого пламени, которые происходят на расстоянии около $(7-8)R_0$ от центра капли. Вспышке голубого пламени предшествует процесс образования и накопления пероксида водорода, который начинается при температуре около 950 К вдали от капли (на расстоянии около $(10-11)R_0$).

Пары горючего — источник водорода — во вспышках голубого пламени выгорают практически полностью и восстанавливают свою концентрацию в период времени между вспышками.

Таким образом, детальный анализ результатов расчета показывает, что регулярные всплески температуры возникают вследствие термического распада пероксида водорода — разветвления с выходом гидроксильных радикалов. В соответствии с [7, 8] эти регулярные всплески являются кратными «голубыми пламенами», переходящими в горячее пламя, точно такими же, как при вынужденном зажигании каплей. Чтобы окончательно убедиться в этом, проведем два математических эксперимента: в первом приравняем к нулю константу скорости распада пероксида водорода, а во втором — потери энергии, вызванные излучением сажевых частиц. Результаты обоих экспериментов показаны на рис. 2. При деактивации реакции распада пероксида водорода регулярные всплески температуры прекращаются. При отключении радиационных потерь энергии вокруг капли сразу происходит вспышка горячего пламени.

На рис. 3, а дополнительно показаны расчетные зависимости относительных масс пероксида водорода H_2O_2 и алкилгидропероксида $C_{12}H_{25}OOH$ от времени для случая с $T_0 = 600$ К. Относительная масса того или иного компонента в газовой фазе — это отношение полной массы этого компонента в газовой фазе в момент времени t к начальной массе капли. Для удобства на том же графике показана температурная кривая $T_m(t)$. Видно, что алкилгидропероксид расходуется полностью уже в первичном «холодном» пламени — скачке температуры от 600 до 780 К — и больше не образуется, т. е. холодное пламя возникает только на начальной стадии самовоспламенения. Что касается пероксида водорода, то он нарабатывается до момента, когда максимальная температура газов вокруг капли достига-

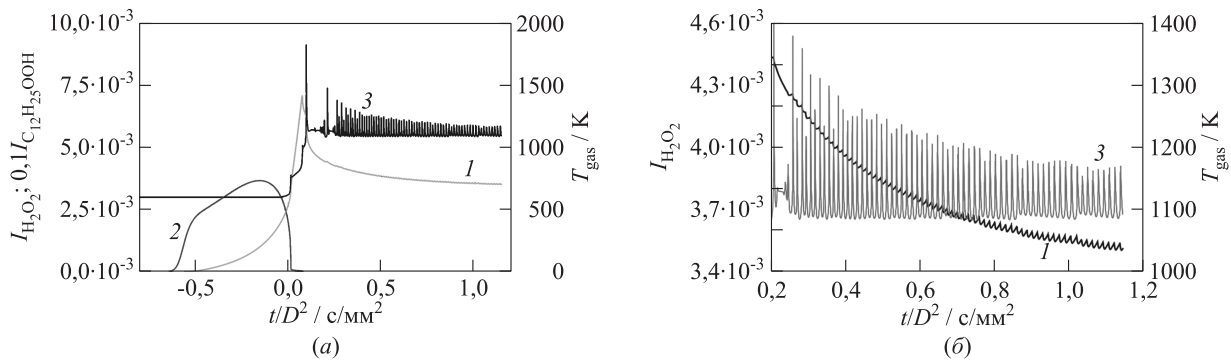


Рис. 3 Расчетные зависимости относительных масс перекиси водорода (1) и алкилгидроперекиси н-додекана (2), а также максимальной температуры газа (3) от характерного времени

ет ~ 950 К, а затем частично расходует в первичных вспышках голубого и горячего пламени, а также в последующем процессе низкотемпературного окисления с многократными вспышками голубого пламени. То, что эти вспышки относятся именно к голубому пламени, особенно наглядно видно из рис. 3, б — увеличенной версии рис. 3, а. Каждая вспышка пламени точно синхронизирована с распадением некоторого количества пероксида водорода, за которым следует стадия его образования и накопления и т. д., и кривая $I_{\text{H}_2\text{O}_2}(t)$ имеет пилообразную форму. Небольшая амплитуда колебаний полной массы накопленного пероксида водорода вокруг капли связана с локальным характером вспышек голубого пламени: вспышки происходят в области относительно низкой температуры (~ 950 К).

Еще одно косвенное подтверждение тому, что при беспламенном горении капли н-додекана должно наблюдаться именно голубое, а не холодное пламя, приведено на рис. 4, на котором показаны зависимости относительных массовых долей формулы СНО и формальдегида CH_2O от времени. Как и выше, для удобства на том же графике показана температурная кривая $T_m(t)$. Как уже отмечалось, голубое пламя регистрируется благодаря свечению возбужденного формулы HCO , а холодное — благодаря свечению возбужденного формальдегида CH_2O . Несмотря на то что в используемом в расчетах кинетическом механизме окисления н-додекана кинетика свечения отсутствует, все же разумно предположить, что концентрация возбужденных молекул формулы и формальдегида пропорциональна концентрации этих компонентов в газовой фазе. Из рис. 4 видно, что относительная масса формулы на 5 порядков величины больше, чем формальдегида, причем на кривой для формулы имеются всплески, которые точно синхронизированы с всплесками температуры.

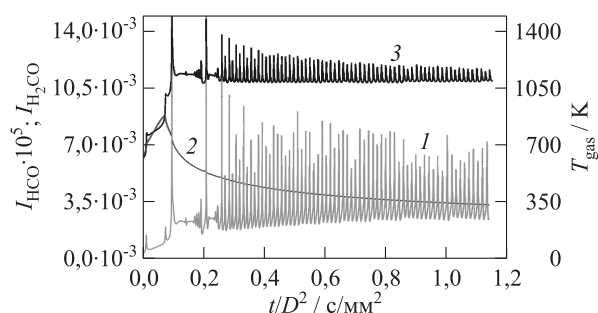


Рис. 4 Графики зависимости относительных масс I_{HCO} (1) и $I_{\text{H}_2\text{CO}}$ (2), а также максимальной температуры газа (3) от характерного времени. Расчет с начальной температурой газа $T_0 = 600$ К

Отметим, что кинетические кривые для реагентов при низкотемпературном окислении н-додекана похожи на кинетические кривые н-гептана [4]. Присутствие и накопление н-додекана в газовой фазе при низкотемпературном окислении капли свидетельствуют о неполноте реакции и о сохранении некоторого количества исходного горючего после завершения процесса.

4 Заключение

На основе физико-математической модели горения капли и ДКМ окисления и горения н-додекана $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ изучены особенности вынужденного зажигания и горения, а также самовоспламенения крупной капли н-додекана в атмосфере воздуха при нормальном давлении в условиях микрогравитации. Выбор н-додекана связан с проведением в 2017 г. КЭ на МКС (КЭ «Зарево») с использованием капель этого углеводорода. Проведенный анализ углубляет наши знания о беспламенном горении капли в условиях микрогравитации. Расчетами показано, что изменение каких-либо особенностей зажигания в эксперименте (расстояние электродов от капли и др.) или характеристик поджигающего электрического разряда влияет на наблюдаемую динамику процесса, включая и значение такого часто используемого параметра, как константа горения капли. Поскольку в настоящее время адекватное физико-математическое моделирование трехмерного процесса зажигания капли электрическим разрядом не представляется возможным, для изучения фундаментальных особенностей низкотемпературного беспламенного горения капель предложено использовать постановку задачи с самовоспламенением капли в равномерно нагретом газе, которая исключает неопределенности такого рода.

Решение задачи о самовоспламенении крупной капли н-додекана показывает, что после радиационного погасания «горячего» пламени капля может продолжать испаряться благодаря экзотермическому низкотемпературному окислению паров горючего с многократными вспышками голубого пламени при характерной температуре 950 К. Детальный анализ результатов расчета показывает, что регулярные всплески температуры возникают вследствие термического распада пероксида водорода — разветвления с выходом гидроксильных радикалов. Эти регулярные всплески являются кратными «голубыми пламенами», точно такими же, как при вынужденном зажигании капель. Математические эксперименты с приравниванием нулю константы скорости распада пероксида водорода и потерь энергии, вызванных излучением сажевых частиц,

показали, что при деактивации реакции распада пероксида водорода регулярные всплески температуры прекращаются, а при отключении радиационных потерь энергии вокруг капли сразу происходит вспышка горячего пламени.

Литература

1. Farouk T., Dryer F. L. Microgravity droplet combustion: Effect of tethering fiber on burning rate and flame structure // *Combust. Theor. Model.*, 2011. Vol. 15. No. 4. P. 487–515.
2. Hicks M., Dietrich D., Hickman J. Microgravity droplet combustion on the International Space Station — status of the FLEX/FLEX-2/FLEX-2J suite of experiments // 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012. Nashville, TN, USA.
3. Nayagam V., Dietrich D. L., Ferkul P. V., Hicks M. C., Williams F. A. Can cool flames support quasi-steady droplet burning // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. P. 3583–3588.
4. Фролов С. М., Басевич В. Я., Медведев С. Н. Моделирование низкотемпературного окисления и горения капель // Докл. РАН, 2016. Т. 470. № 4. С. 427–430.
5. Басевич В. Я., Беляев А. А., Медведев С. Н., Посвянский В. С., Фролов Ф. С., Фролов С. М. Моделирование самовоспламенения и горения капель *n*-гептана с использованием детального кинетического механизма // *Хим. физика*, 2010. Т. 29. № 12. С. 50–59.
6. Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М. Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C₁–C₆ к C₇H₁₆ // *Хим. физика*, 2010. Т. 29. № 12. С. 40–49.
7. Басевич В. Я., Фролов С. М. Кинетика «голубых» пламен при газозфазном окислении и горении углеводородов и их производных // *Успехи химии*, 2007. Т. 76. № 9. С. 927–944.
8. Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М. Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C₁–C₁₀ к C₁₁–C₁₆ // *Хим. физика*, 2013. Т. 32. № 4. С. 87–96.

Поступила в редакцию 19.06.17

FLAMELESS BURNING OF LARGE *N*-DODECANE DROPS IN MICROGRAVITY CONDITIONS

S. M. Frolov^{1,2}, V. Ya. Basevich¹, S. N. Medvedev¹, and F. S. Frolov¹

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation

Abstract: Forced ignition and combustion as well as self-ignition of a large (2–4 mm) *n*-dodecane droplet in air atmosphere at normal pressure under microgravity conditions are studied on the basis of the physicomathematical model of droplet combustion and the detailed kinetic mechanism of oxidation and combustion of *n*-dodecane C₁₂H₂₆. The choice of *n*-dodecane fuel is caused by the Russian-American space experiment “Zarevo” launched at the International Space Station in 2017. The results of investigation deepen our knowledge on the flameless combustion of droplets under microgravity conditions. Calculations show that after the radiation extinction of the “hot” flame, large droplets can continue evaporating due to the exothermic low-temperature oxidation of fuel vapor with multiple flashes of blue and hot flames at a characteristic temperature of 950 K. A detailed analysis of the calculation results shows that regular temperature flashes are caused by the thermal decomposition of hydrogen peroxide — reaction branching with the formation of hydroxyl radicals.

Keywords: droplet combustion; *n*-dodecane; microgravity; low-temperature oxidation; blue flame; calculation

Acknowledgments

The study was carried out within the framework of Space Experiment “Zarevo.”

References

1. Farouk, T., and F. L. Dryer. 2011. Microgravity droplet combustion: Effect of tethering fiber on burning rate and flame structure. *Combust. Theor. Model.* 15(4):487–515.
2. Hicks, M., D. Dietrich, and J. Hickman. 2012. Microgravity droplet combustion on the International Space Station — status of the FLEX/FLEX-2/FLEX-2J suite of experiments. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Nashville, TN.
3. Nayagam, V., D. L. Dietrich, P. V. Ferkul, M. C. Hicks, and F. A. Williams. 2012. Can cool flames support quasi-steady droplet burning. *Combust. Flame* 159:3583–3588.

4. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, and S. N. Medvedev. 2016. Modeling of low-temperature oxidation and combustion of droplets. *Dokl. Phys. Chem.* 470(2):150–153.
5. Basevich, V. Ya., A. A. Belyaev, S. N. Medvedev, V. S. Posvyanskii, F. S. Frolov, and S. M. Frolov. 2010. Simulation of the autoignition and combustion of *n*-heptane droplets using a detailed kinetic mechanism. *Russ. J. Phys. Chem. B* 4(6):995–1004.
6. Basevich, V. Ya., A. A. Belyaev, V. S. Posvyanskii, and S. M. Frolov. 2010. Mechanism of the oxidation and combustion of normal paraffin hydrocarbons: Transition from C₁–C₆ to C₇H₁₆. *Russ. J. Phys. Chem. B* 4(6):985–994.
7. Basevich, V. Ya., and S. M. Frolov. 2007. Kinetics of ‘blue’ flames in the gas-phase oxidation and combustion of hydrocarbons and their derivatives. *Russ. Chem. Rev.* 76(9):867–884.
8. Basevich, V. Ya., A. A. Belyaev, V. S. Posvyanskii, and S. M. Frolov. 2013. Mechanisms of the oxidation and combustion of normal paraffin hydrocarbons: Transition from C₁–C₁₀ to C₁₁–C₁₆. *Russ. J. Phys. Chem. B* 7(2):161–169.

Received June 19, 2017

Contributors

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 31 Kashirskoe Sh., Moscow 115409, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Basevich Valentin Ya. (p. 1926) — Doctor of Science in technology, professor, chief research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; basevich@chph.ras.ru

Medvedev Sergey N. (b. 1985) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; medvedevs@chph.ras.ru

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; f.frolov@chph.ru