
**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

УДК 534.222.2

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ БЕСПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ КРУПНОЙ
КАПЛИ n-ДОДЕКАНА В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ**

© 2018 г. С. М. Фролов^{1,2,3,*}, В. Я. Басевич¹, С. Н. Медведев¹, Ф.С. Фролов^{1,2}

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

³Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, Москва

*E-mail: smfrol@chph.ras.ru

Поступила в редакцию: 21.06.2017

На основе физико-математической модели горения капли и детального кинетического механизма окисления и горения n-додекана $C_{12}H_{26}$ изучены особенности вынужденного зажигания и горения, а также самовоспламенения капли n-додекана в атмосфере воздуха при нормальном давлении в условиях микрогравитации. Выбор n-додекана связан с проведением в 2017 г. российско-американского космического эксперимента “Зарево” на Международной космической станции с использованием крупных капель этого углеводорода. Проведенный анализ углубляет наши знания о беспламенном горении крупной капли в условиях микрогравитации. Сделанные расчеты показали, что после радиационного погасания “горячего” пламени капля может продолжать испаряться благодаря экзотермическому низкотемпературному окислению паров горючего с многократными вспышками “голубого” пламени при характерной температуре 980–1000 К. Детальный анализ результатов расчета показывает, что регулярные всплески температуры возникают вследствие термического распада пероксида водорода – разветвления с выходом гидроксильных радикалов.

Ключевые слова: капля n-додекана, горение, микрогравитация, низкотемпературное окисление, голубое пламя, численный расчет.

DOI: 10.7868/S0207401X18040052

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 капель индивидуального углеводородного горючего (n-гептана) с их последующим беспламенным низкотемпературным окислением в условиях микрогравитации, а также о расчетных исследованиях этого явления (космический эксперимент проводился на Международной космической станции). Обнаруженное в [1–3] беспламенное низкотемпературное окисление капель иногда сопровождалось кратными скачками температуры и тусклым свечением голубоватого цвета. Этому явлению американские исследователи дали название: “холоднопламенное” горение капли.

В работе [4] на основе одномерной сферически-симметричной математической модели нестационарного горения капли [5] и детального кинетического механизма (ДКМ) окисления и горения n-гептана [6] воспроизведены все основные особенности обнаруженного явления и предсказано существование

новых режимов беспламенного окисления капель без стадии горячего пламени. Отметим, что по сравнению с вышеуказанными моделями в модель [4] внесено изменение: учтены процессы образования и окисления сажи при горении n-гептана, а также излучение сажи.

В соответствии с результатами работ [1–4] радиационное затухание горячего пламени капли в условиях микрогравитации связано с образованием вокруг капли сферической оболочки из очень мелких (нанометрового диапазона) частиц сажи. Последние 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. Такое прогрессирующее снижение скорости горения паров горючего может привести либо к полному прекращению химической активности в окрестности капли (т.е. к полному погасанию пламени), либо к установлению квазистационарного режима беспламенного горения капли (т.е. к ее низкотемпературному окислению с возможными всплесками температуры). Что касается интерпретации экспериментальных наблюдений поведения

капли после радиационного затухания горячего пламени, мы считаем, что здесь следует говорить о беспламенном, а не о холоднопламенном горении.

Во-первых, явление “холодного” пламени давно известно как для газов, так и для капель и заключается 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, сделанные в [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 только возбужденного формальдегида, а и возбужденного формила СНО. К тому же интенсивность свечения голубого пламени значительно выше, чем холодного. Таким образом, мы полагаем, что после погасания горячего пламени капля может продолжать испаряться благодаря окислению паров горючего с многократными вспышками холодного (редко), голубого и горячего пламен, а не исключительно холодного пламени.

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 детального кинетического механизма окисления и горения *n*-додекана $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ [8], но с учетом образования и излучения сажи, как это сделано в [4] (сохранены все принятые там характеристики излучения), исследуются особенности горения капли *n*-додекана в атмосфере воздуха в условиях микрогравитации. Выбор *n*-додекана связан с проведением в 2017 г. нового космического эксперимента на Международной космической станции (космический эксперимент “Зарево”) 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.

ВЫНУЖДЕННОЕ ЗАЖИГАНИЕ

Зажигание электрическим разрядом, применявшееся в экспериментах работ [1–3] и в космическом эксперименте “Зарево”, 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 *n*-додекана минимальное значение теплосодержания слоя оказалось несколько больше, чем для капли *n*-гептана в [4], чего и следовало ожидать ввиду меньшей летучести паров *n*-додекана.

На рис. 1 представлен пример расчета горения капли *n*-додекана начального диаметра $D_0 = 2.8$ мм в воздухе при давлении $P = 0.1$ МПа и начальных значениях температуры капли и воздуха $T_{d0} = T_0 = 293$ К в виде зависимостей максимальной температуры газа T_m в окрестности капли (сплошная кривая) и квадрата отношения $(D/D_0)^2$ текущего диаметра капли D к начальному диаметру D_0 от времени t (штриховая кривая). После зажигания в момент времени $t = 0$ вокруг капли кратковременно возникает первичное горячее пламя с температурой ~ 1900 К. Процесс высокотемпературного горения сопровождается образованием сажевой оболочки внутри пламени и увеличением радиационных потерь, вызванных тепловым излучением сажевых частиц. В результате этих потерь максимальная температура газа T_m вокруг капли начинает постепенно снижаться: происходит радиационное погасание горячего пламени. В данном примере за время около 1.2 с максимальная температура газа снижается до ~ 900 К, а затем повышается, и при $t \approx 2$ с происходит воспламенение капли с повторной вспышкой горячего пламени – быстрым повышением температуры до ~ 1900 К. Новое горячее пламя существует в течение приблизительно 0.5 мс и тоже сопровождается образованием сажевой оболочки внутри пламени, вызывающей его последующее радиационное погасание. После ряда вспышек/погасаний процесс горения капли в среднем устанавливается: через 7–8 с после зажигания в расчете наблюдается квазистационарное беспламенное горение капли, прерываемое нерегулярными кратковременными вспышками голубого и горячего пламен при снижении максимальной температуры газов приблизительно до 1100 К. В ходе такого процесса диаметр капли D непрерывно уменьшается, а отношение $(D/D_0)^2$ падает почти линейно, как это обычно происходит при горении капли. Константа скорости беспламенного горения капли k может быть определена по наклону кривой на плоскости $(D/D_0)^2 - t$.

Расчеты показали, что динамика всего процесса горения капли – радиационного затухания первичного горячего пламени и последующего беспламенного горения, а также частота вспышек – существенно зависит от теплосодержания поджигающего слоя: его толщины Δ . Так, на рис. 2 представлены расчетные зависимости максимальной температуры газа T_m в окрестности капли и отношения $(D/D_0)^2$ от времени

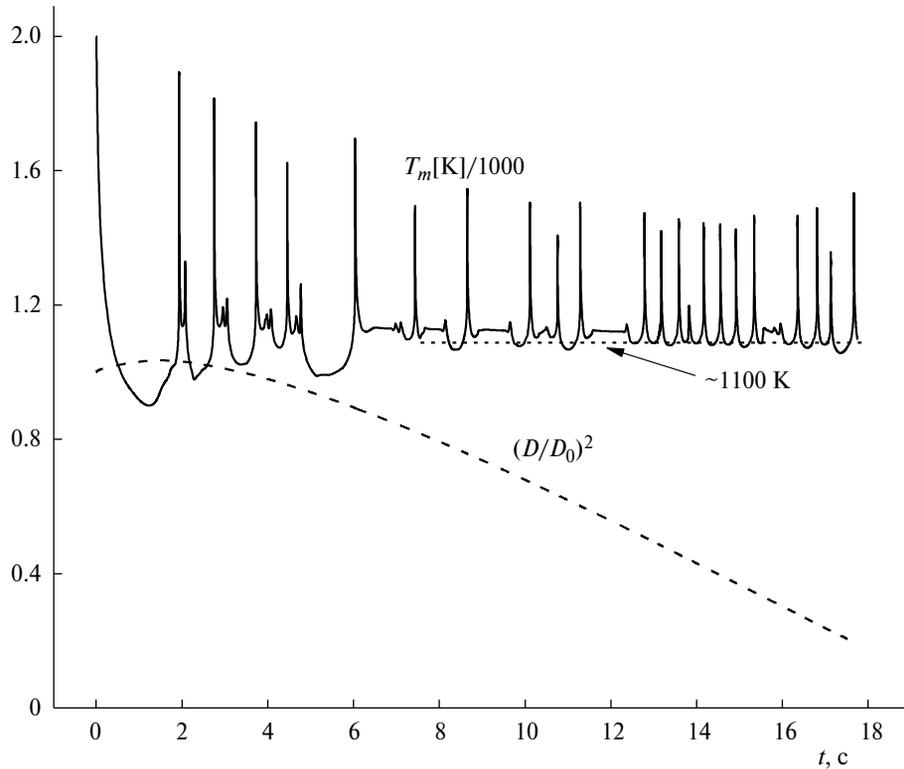


Рис. 1. Расчетные зависимости максимальной температуры газа T_m в окрестности капли н-додекана и отношения $(D/D_0)^2$ при ее горении в воздухе; $P = 0.1$ МПа, $D_0 = 2.8$ мм, $T_{d0} = T_0 = 293$ К; вынужденное зажигание поджигающим слоем толщиной Δ .

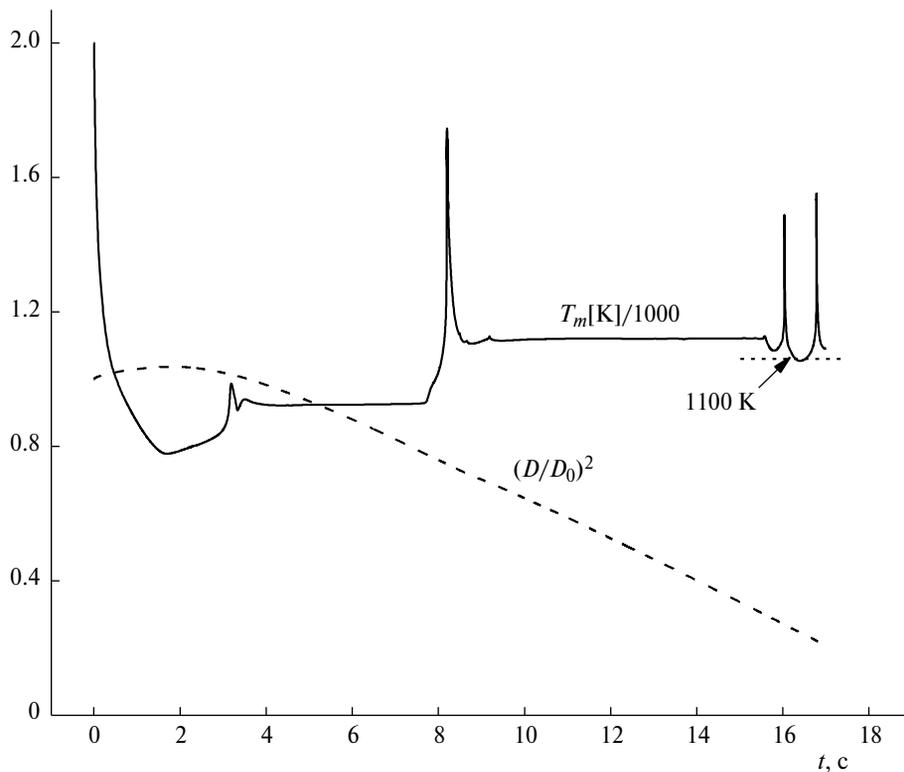


Рис. 2. Расчетные зависимости максимальной температуры газа T_m в окрестности капли н-додекана и отношения $(D/D_0)^2$ при ее горении в воздухе; $P = 0.1$ МПа, $D_0 = 2.8$ мм; вынужденное зажигание поджигающим слоем толщиной 0.96Δ .

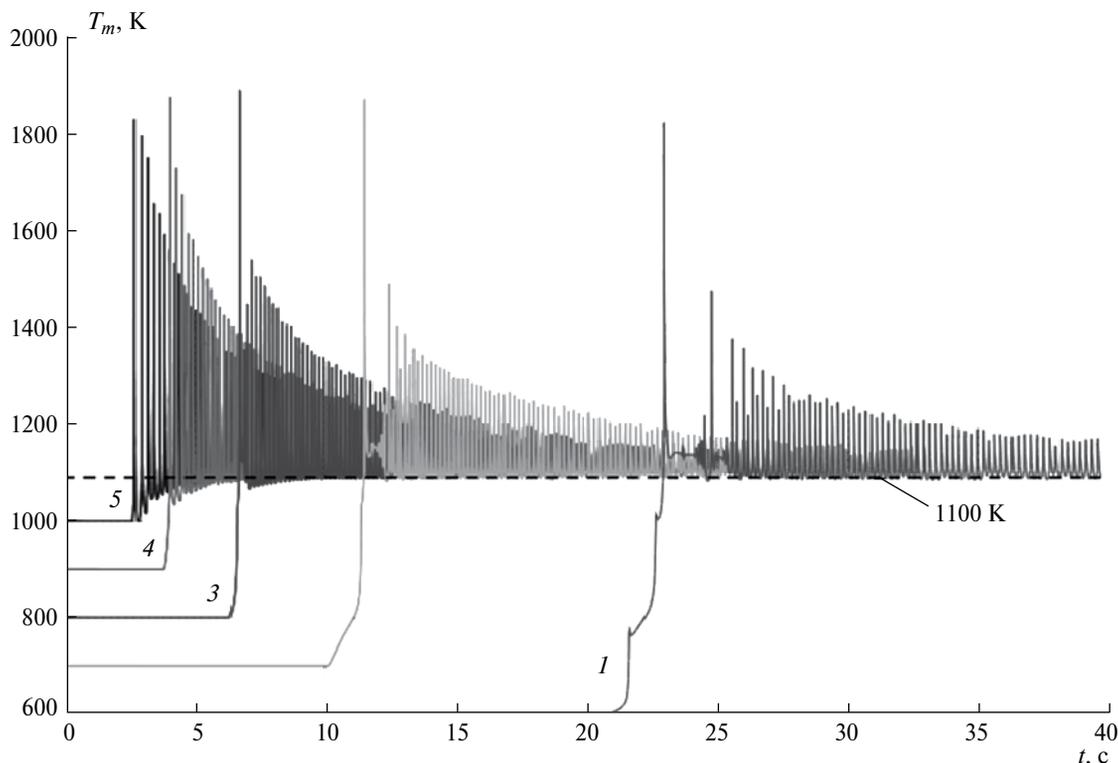


Рис. 3. Расчетные зависимости максимальной температуры газа T_m от времени при самовоспламенении капли н-додекана начального диаметра $D_0 = 4$ мм с $T_{d0} = 293$ К в воздухе при $P = 0.1$ МПа и пяти значениях начальной температуры: $T_0 = 600$ (1), 700 (2), 800 (3), 900 (4) и 1000 К (5).

t для того же примера, что и на рис. 1, только с поджигающим слоем толщиной 0.96Δ , т.е. тоньше на 4%. В данном случае в результате радиационного погасания первичного горячего пламени максимальная температура газа вокруг капли понижается не до ~ 900 К (как на рис. 1), а до 780 К. За этим понижением температуры следует однократное ступенчатое повышение максимальной температуры до ~ 950 К, которая поддерживается в окрестности капли в течение почти 5 с (такой участок на рис. 1 отсутствует), а далее вокруг капли возникают несколько высокотемпературных вспышек, количество которых значительно меньше, чем на рис. 1. Как и на рис. 1, нерегулярные кратковременные вспышки пламени, возникающие через 16–17 с после зажигания, происходят при снижении максимальной температуры газов приблизительно до 1100 К.

Уменьшение толщины поджигающего слоя до 0.95Δ приводит к тому, что вспышки голубого и горячего пламени оказываются единичными, а до 0.93Δ — к срыву беспламенного горения, т.е. к выравниванию температуры на более низком уровне ($T \approx 400$ К), сохраняющемся в течение 30 с (времени окончания расчета). Постоянство температуры при продолжающемся испарении капли говорит о протекании медленного химического процесса с одновременным изменением концентраций веществ. В течение всего этого промежутка времени капля продолжает испаряться с низкой скоростью.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что способ зажигания капли может определять и скорость ее горения. В таблице представлены расчетные значения константы скорости горения капли k в зависимости от толщины поджигающего слоя. Видно,

Расчетные значения константы горения

Толщина слоя	t , с	T , К	Число высокотемпературных пиков	k , мм ² /с
Δ	7.00–18.0	$\sim 1150^*$	много	0.500
0.96Δ	9.00–17.0	~ 1150	2	0.491
0.94Δ	3.20–8.80	950	нет	0.422
0.93Δ	15.0–30.0	~ 400	нет	0.009

* Уровень нижней огибающей температур.

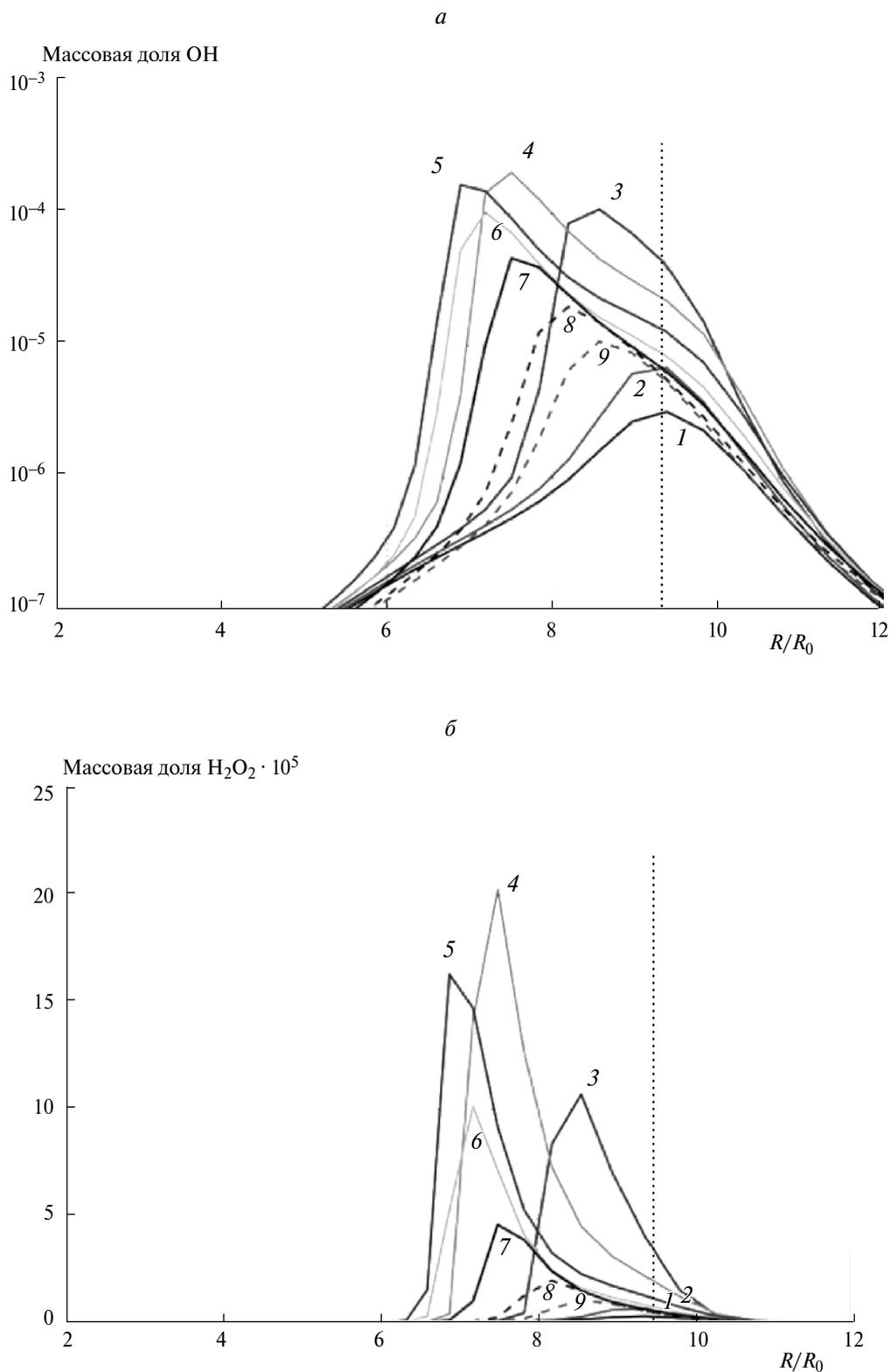


Рис. 4. Расчетные пространственные распределения массовых долей гидроксила (*a*), пероксида водорода (*б*) и температуры (*в*) при самовоспламенении капли *n*-додекана начального диаметра $D_0 = 4$ мм с $T_{\text{до}} = 293$ К в воздухе при $P = 0.1$ МПа и $T_0 = 600$ К в интервале времени 27.3–27.38 с с шагом в 0.01 с: 1 – 27.30 с, 2 – 27.31 с, ..., 9 – 27.38 с.

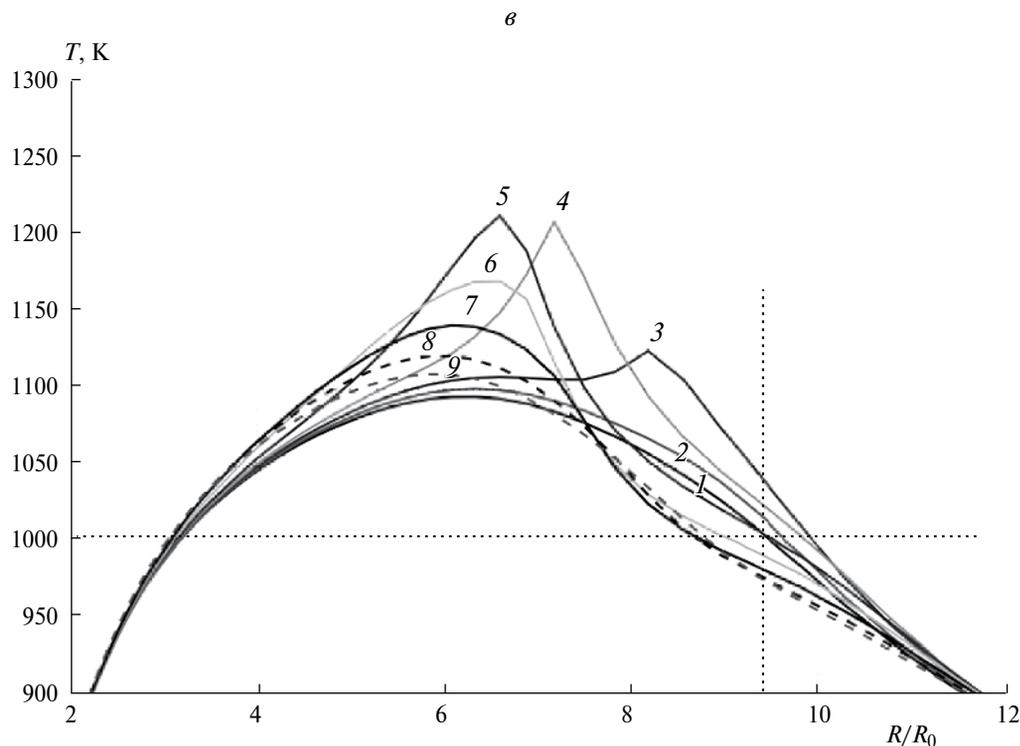


Рис. 4. Окончание

что расчетные значения k варьируются от 0.500 до 0.00923 мм²/с. Отметим, что измеренные значения k изменяются в пределах 0.378–0.398 мм²/с. Расхождение расчетных и экспериментальных значений k может быть связано с различием расчетных и экспериментальных поджигающих температурных полей.

Полученные расчетные результаты могут означать, что изменение каких-либо особенностей зажигания в эксперименте (расстояние электродов от капли и др.) или характеристик поджигающего электрического разряда может повлиять на наблюдаемую динамику процесса. Поскольку в настоящее время невозможно осуществить адекватное физико-математическое моделирование трехмерного процесса зажигания капли электрическим разрядом, для изучения фундаментальных особенностей беспламенного горения капель необходимо использовать постановку задачи, исключаящую неопределенности такого рода. Следуя результатам работы [4], мы предлагаем исследовать не вынужденное зажигание капли, а ее самовоспламенение в равномерно нагретом газе.

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ

Переход от задачи с вынужденным зажиганием капли в воздухе к задаче о ее самовоспламенении в условиях микрогравитации также приводит к режиму 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 состояниях, начального диаметра капли D_0 , а также начальных температур капли, T_{a0} , и воздуха, T_0 .

На рис. 3 показаны результаты расчетов самовоспламенения капли *n*-додекана начального диаметра $D_0 = 4$ мм с $T_{a0} = 293$ К в воздухе при $P = 0.1$ МПа и пяти 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 до $T_m \approx 1000$ 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 максимальная температура газов в окрестности капли уменьшается до уровня ~ 1100 К и после некоторой временной задержки (около 2 с) в пространстве

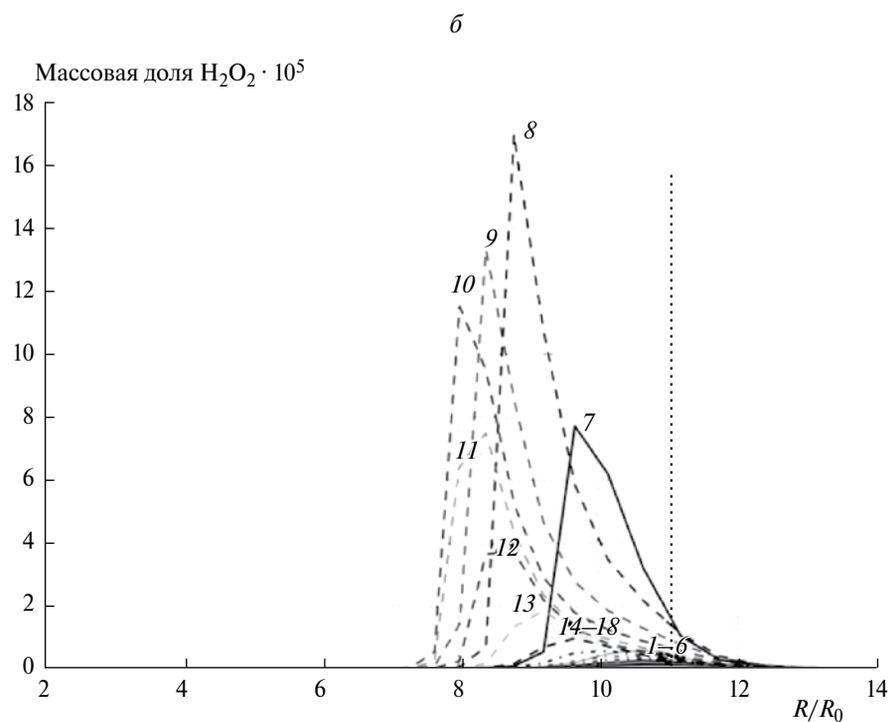
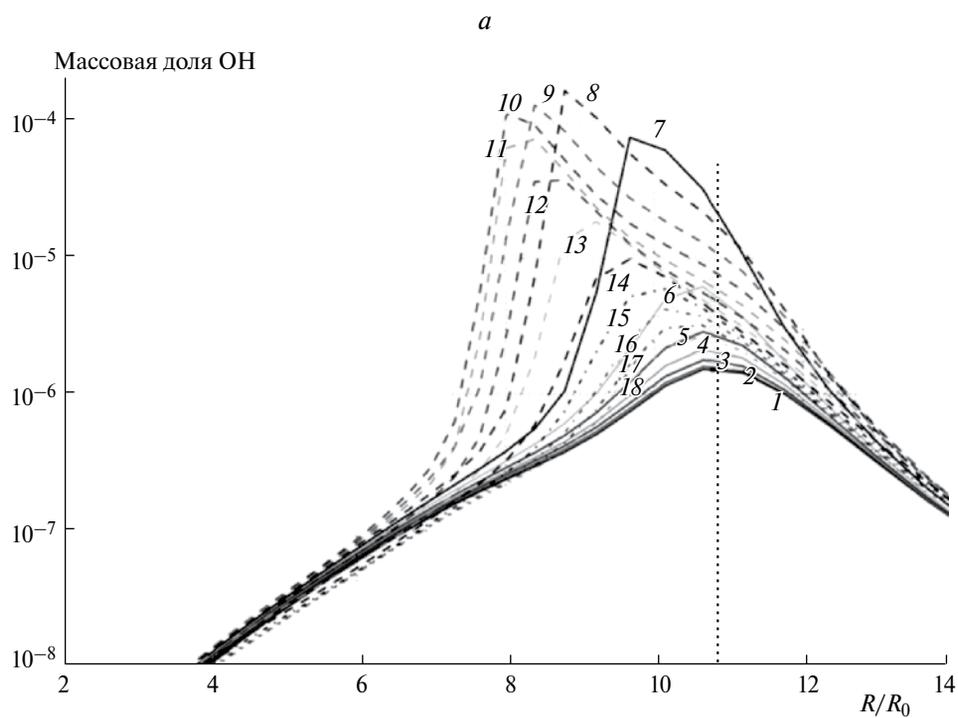


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но в интервале времени 34.39–34.56 с с шагом в 0.01 с: 1 – 34.39 с, 2 – 34.40 с, ..., 18 – 34.56 с.

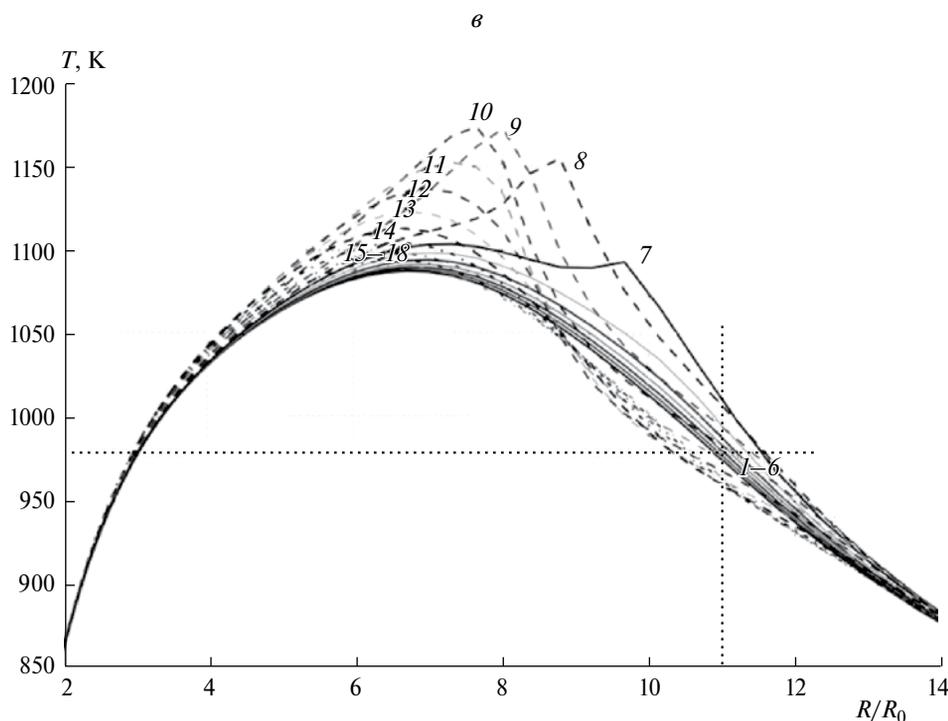


Рис. 5. Окончание

вокруг капли начинаются вспышки голубого пламени, переходящие во вспышки горячего пламени, сначала нерегулярные, а затем регулярные.

Аналогичное поведение капли прослеживается 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 зависимости $T(t)$ становятся все более неразличимыми. Интересно, что уровень максимальной температуры, при котором происходят регулярные вспышки пламени (~ 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.

В качестве примера возьмем расчетный случай с $T_0 = 600$ К. На рис. 4–6 показаны расчетные пространственные распределения массовых долей гидроксила, пероксида водорода, температуры газа в промежутки времени от 27.3 до 27.38 с (рис. 4), от 34.39 до 34.56 с (рис. 5) и от 41.86 до 42.05 с (рис. 6), т.е. в периоды, соответствующие возникающим на рис. 3 всплескам температуры с шагом в 0.01 с. Анализируя динамику пространственных распределений массовой доли

гидроксила, которая отражает суммарную скорость химических превращений, видим, что во всех рассматриваемых интервалах времени эта доля сначала быстро возрастает на некотором расстоянии от капли (точечные вертикальные линии на рис. 4а, 5а и 6а). Далее максимум на кривой для массовой доли гидроксила смещается ближе к поверхности капли и, достигнув наибольшего значения (на уровне 0.0002), быстро спадает и перемещается дальше от капли. Первичное нарастание массовой доли гидроксила происходит именно там, где достигается максимальная концентрация пероксида водорода и он начинает термически разлагаться (точечные вертикальные линии на рис. 4б, 5б и 6б), причем максимумы массовых долей пероксида водорода и гидроксила одновременно смещаются ближе к капле, а затем и дальше от нее. На пространственных распределениях температуры в местах, где достигаются максимальные массовые доли гидроксила и пероксида водорода, возникают локальные максимумы, приводящие к кратковременным подъемам температуры с 980–1000 К (точечные горизонтальные линии на рис. 4в, 5в и 6в) до ~ 1200 К. Указанные кратковременные подъемы температуры соответствуют вспышкам голубого пламени, которые происходят на расстоянии около $(7 \div 8)R_0$ от центра капли. Вспышке голубого пламени предшествует процесс образования и накопления пероксида водорода, который начинается при температуре 980–1000 К вдали от капли (на расстоянии около $(9 \div 11)R_0$ от ее центра). Пары горючего — источник водорода — во вспышках

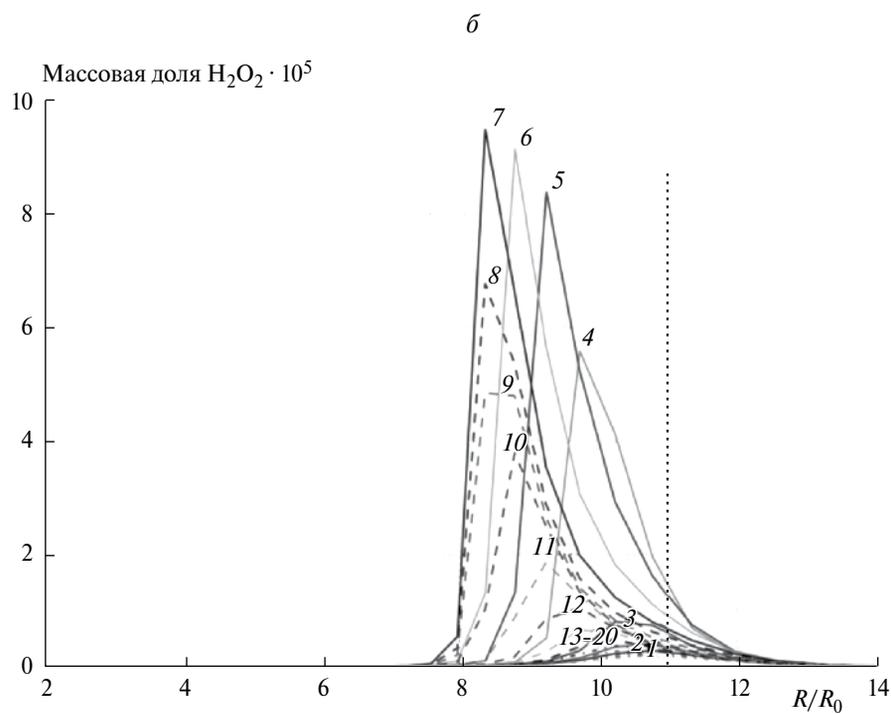
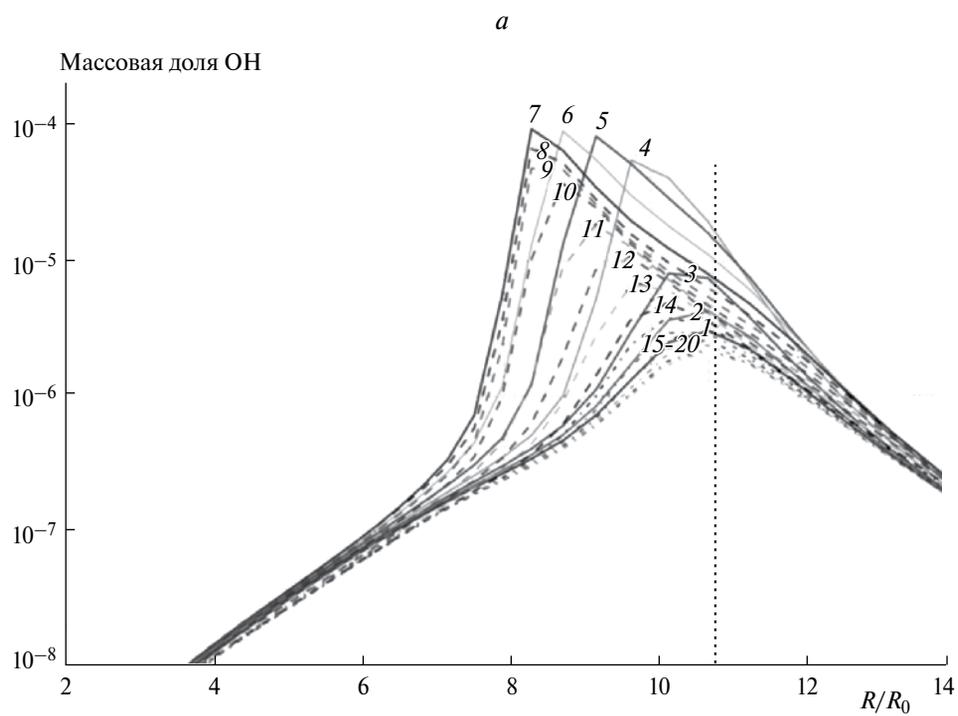


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но в интервале времени 41.86–42.05 с с шагом в 0.01 с: 1 – 41.86 с, 2 – 41.87 с, ..., 20 – 42.05 с.

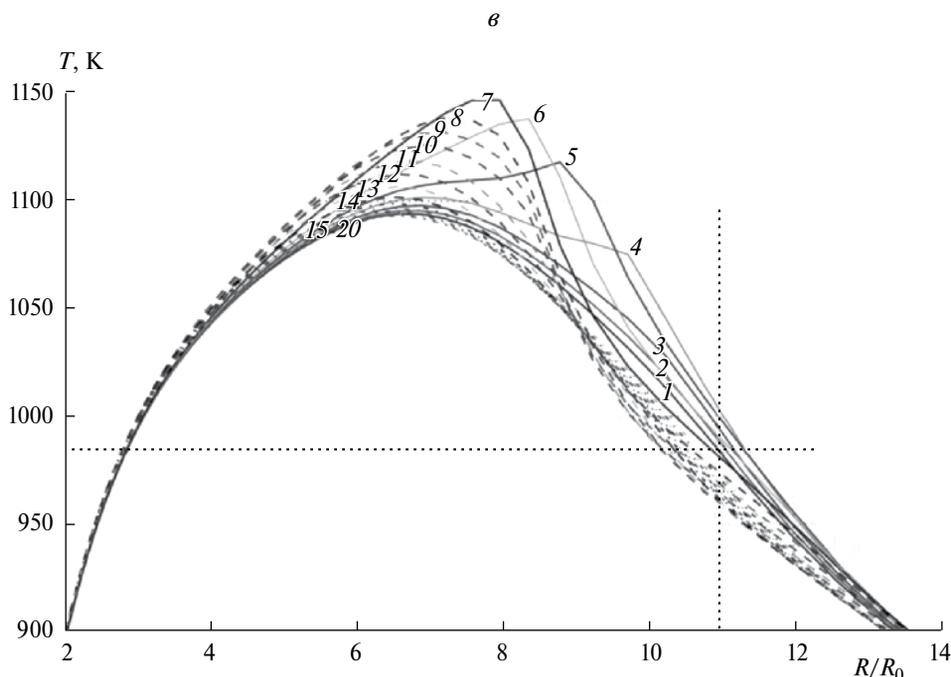


Рис. 6. Окончание

голубого пламени выгорают практически полностью и восстанавливают свою концентрацию в период времени между вспышками пламени. Интересная особенность беспламенного горения капли — очень широкая зона реакции $((2 \div 3)R_0)$ по сравнению с зоной реакции в горячем пламени.

Таким образом, детальный анализ результатов расчета показывает, что регулярные всплески температуры возникают вследствие термического распада пероксида водорода — разветвления с выходом гидроксильных радикалов в реакции $H_2O_2 + M = OH + OH + M$ [8, 9]. В соответствии с изложенным в [7–9] эти регулярные всплески являются “периодическими” (по терминологии из [7]) или кратными голубыми пламенами, переходящими в горячее пламя, точно такими же, как при вынужденном зажигании капель. Чтобы окончательно убедиться в этом, проведем два математических эксперимента: в первом приравняем к нулю константу скорости распада пероксида водорода, а во втором приравняем к нулю потери энергии, вызванные излучением сажевых частиц. Результаты обоих математических экспериментов показаны кривыми 2 и 3 на рис. 7. Для удобства на том же графике показана кривая зависимости $T_m(t)$ — кривая 1. При деактивации реакции распада пероксида водорода (кривая 2) регулярные всплески температуры прекращаются. При “отключении” радиационных потерь энергии (кривая 3) вокруг капли сразу происходит вспышка горячего пламени.

На рис. 8 дополнительно показаны расчетные зависимости относительной массы алкилгидропероксида $C_{12}H_{25}OOH$ (кривая 1, I_1) и пероксида

водорода H_2O_2 (кривая 2, I_2) от приведенного времени t/D_0^2 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. Температурная кривая воспроизведена на рис. 8 в виде кривой 3. Видно, что алкилгидропероксид расходуется полностью уже в первичном холодном пламени — в 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 достигает 980–1000 К, а затем частично расходуется в первичных вспышках голубого и горячего пламен, 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. 9 — увеличенной версии рис. 8. Каждая вспышка пламени точно синхронизирована с распадом некоторого количества пероксида водорода, за которым следует стадия его образования и накопления и т.д., и кривая 2 имеет пилообразную форму. Небольшая амплитуда колебаний полной массы накопленного пероксида водорода вокруг капли связана с локальным характером вспышек голубого пламени: вспышки происходят в области с относительно низкой температурой (980–1000 К, см. рис. 4–6).

На рис. 10 показаны зависимости относительных массовых долей формальдегида CH_2O (кривая 1, I_3)

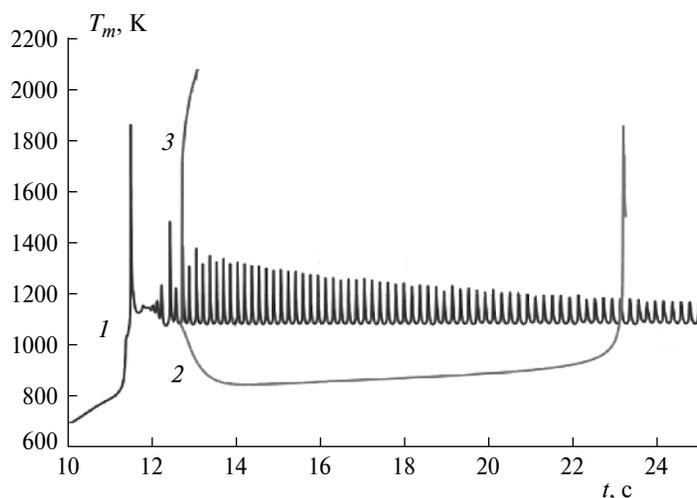


Рис. 7. Сравнение трех расчетов горения капли н-додекана начального диаметра $D_0 = 4$ мм с $T_{a0} = 293$ К в воздухе при $P = 0.1$ МПа и $T_0 = 600$ К: полного расчета (кривая 1), расчета с деактивированной реакцией распада пероксида водорода (2) и расчета с деактивированными радиационными потерями (3).

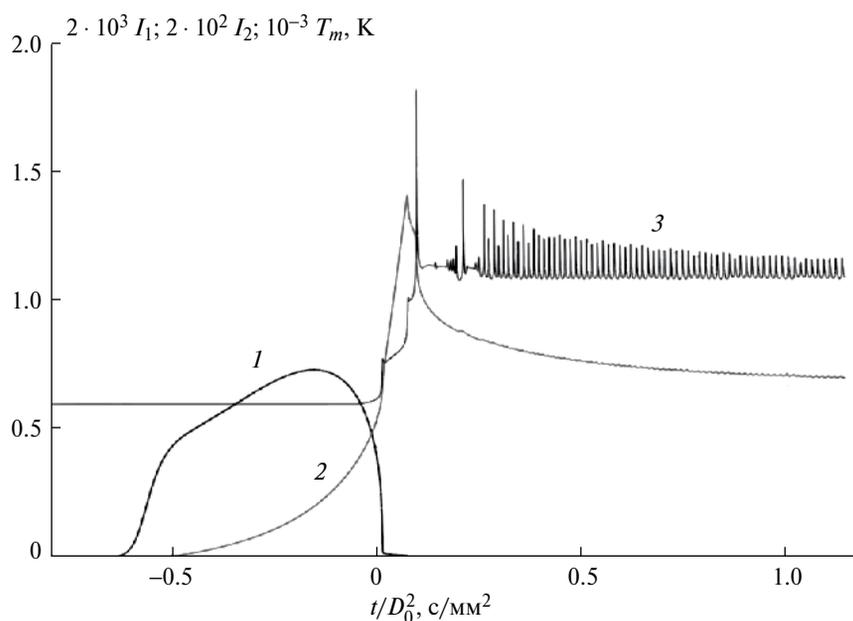


Рис. 8. Расчетные зависимости относительной массы алкилгидропероксида н-додекана $C_{12}H_{25}OOH$ (кривая 1), пероксида водорода H_2O_2 (2) и максимальной температуры газа (3) от приведенного времени.

и формула СНО (кривая 2, I_4) от приведенного времени. Для удобства на том же графике показана температурная кривая зависимости $T_m(t)$ — кривая 3. Как отмечалось выше, холодное пламя регистрируется благодаря свечению возбужденного формальдегида, а голубое — благодаря свечению возбужденных формальдегида и формила. Несмотря на то, что в используемом в расчетах кинетическом механизме окисления н-додекана кинетика свечения отсутствует, разумно предположить, что концентрация возбужденных молекул формила и формальдегида

пропорциональна концентрации этих компонентов в газовой фазе. Из рис. 10 видно, что в холодном пламени формил практически отсутствует, тогда как в голубом пламени присутствуют оба компонента

Отметим, что кинетические кривые для реагентов при низкотемпературном окислении н-додекана похожи на аналогичные кинетические кривые для н-гептана [4]. Присутствие и накопление н-додекана в газовой фазе при беспламенном горении капли свидетельствуют о неполноте реакции

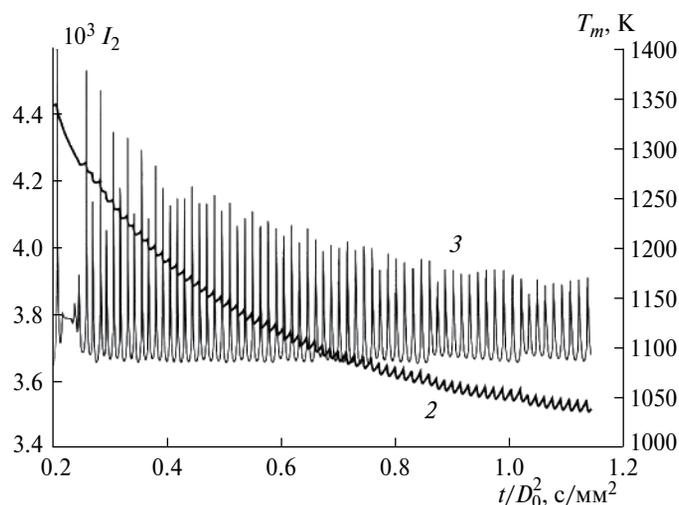


Рис. 9. Детализация рис. 8 на интервале приведенного времени от 0.2 до 1.2 с/мм².

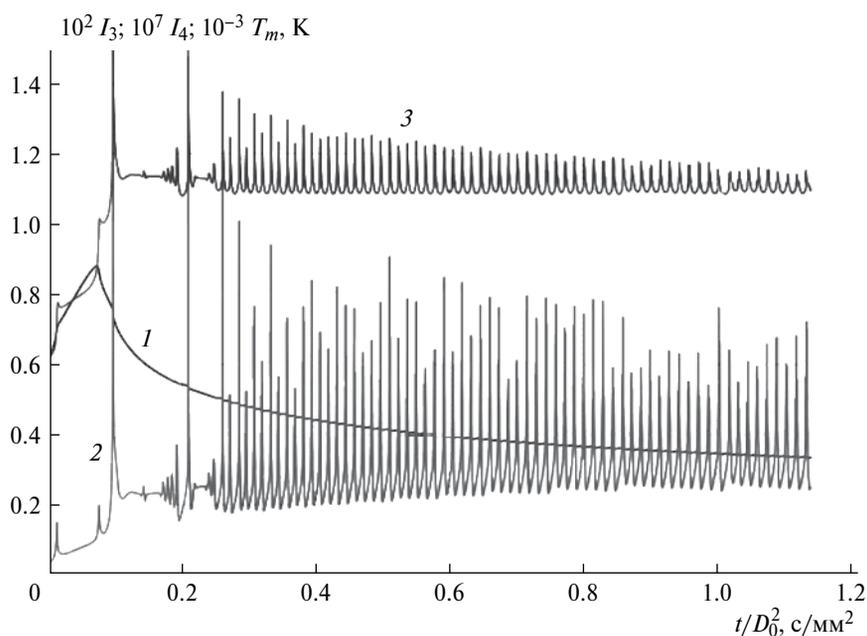


Рис. 10. Расчетные зависимости относительной массы формальдегида H_2CO (кривая 1) и формила HCO (2), а также максимальной температуры газа (3) от приведенного времени. Расчет при $T_0 = 600$ К.

и о сохранении некоторого количества исходного горючего после завершения процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе физико-математической модели горения капли и детального кинетического механизма окисления и горения *n*-додекана $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ изучены особенности вынужденного зажигания и горения, а также самовоспламенения капли *n*-додекана в атмосфере воздуха при нормальном давлении в условиях

микрогравитации. Выбор *n*-додекана связан с проведением в 2017 г. космического эксперимента “Зарево” на Международной космической станции с использованием капель этого углеводорода. Проведенный анализ углубляет наши знания о беспламенном горении капли в условиях микрогравитации. Сделанные расчеты показали, 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 скорости горения капли. Поскольку в настоящее время адекватное физико-математическое моделирование трехмерного процесса зажигания капли электрическим разрядом невозможно осуществить, для изучения фундаментальных особенностей беспламенного горения капель предложено использовать постановку задачи с самовоспламенением капли в равномерно нагретом газе, которая исключает неопределенности такого рода. Решение задачи о самовоспламенении капли н-додекана показывает, что после радиационного погасания горячего пламени капля может продолжать испаряться благодаря экзотермическому окислению паров горючего с многократными вспышками голубого и горячего пламени при температуре 980–1000 К. Детальный анализ результатов расчета показывает, что регулярные всплески температуры возникают вследствие термического распада пероксида водорода – разветвления с выходом гидроксильных радикалов. Эти регулярные всплески температуры 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.

Исследования проведены в рамках исполнения работ по космическому эксперименту “Зарево”, а также за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания ФАНО России (темы 0082-2016-0011, ААА-А17-117040610346-5)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farouk T., Dryer F.L.* // *Combust. Theory and Modelling*. 2011. V. 15. № 4. P. 487.
2. *Hicks M., Dietrich D., Hickman J.* // *Proc. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Nashville, Tennessee: AIAA Inc., 2012. P. 120.
3. *Nayagam V., Dietrich D.L., Ferkul P.V., Hicks M.C., Williams F.A.* // *Combust. and Flame*. 2012. V. 159. P. 3583.
4. *Фролов С.М., Басевич В.Я., Медведев С.Н.* // *Докл. АН*. 2016. Т. 470. № 4. С. 427.
5. *Басевич В.Я., Беляев А.А., Медведев С.Н., Посвянский В.С., Фролов Ф.С., Фролов С.М.* // *Хим. физика*. 2010. Т. 29. № 12. С. 50.
6. *Басевич В.Я., Беляев А.А., Посвянский В.С., Фролов С.М.* // *Хим. физика*. 2010. Т. 29. № 12. С. 40.
7. *Соколик А.С.* *Самовоспламенение, пламя и детонация в газах*. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
8. *Басевич В.Я., Беляев А.А., Посвянский В.С., Фролов С.М.* // *Хим. физика*. 2013. Т. 32. № 4. С. 87.
9. *Басевич В.Я., Фролов С.М.* // *Успехи химии*. 2007. Т. 76. № 9. С. 927.