

УДК 536.46

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ НАД ПЛЕНКОЙ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В СРЕДЕ, ОБОГАЩЕННОЙ КИСЛОРОДОМ

И. Г. Намятов, А. А. Коржавин

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
630090 Новосибирск, korzh@kinetics.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование распространения пламени над тонкой пленкой различных жидких топлив с температурой вспышки ниже температуры окружающей среды. Исследование проводилось на тонких медных и толстой стеклянной подложках в средах с различным содержанием кислорода. Показано, что с повышением концентрации кислорода скорость пламени растет быстрее, чем нормальная скорость соответствующей гомогенной стехиометрической смеси. Диапазон изменения скорости пламени $0.02 \div 2.4$ м/с при изменении доли кислорода в смеси с азотом от 0.21 (воздух) до 1. При скоростях распространения пламени выше 0.3 м/с не выполняется условие термической тонкости даже для тонких медных подложек. Скорость пламени перестает зависеть от свойств подложки и толщины слоя топлива, а становится зависимой только от свойств топлива. В этом диапазоне скоростей скорость распространения пламени линейно растет с увеличением теплового эффекта единицы объема стехиометрической смеси паров топлива с окислителем и падает с ростом разности между температурой T_{st} , при которой образуется стехиометрический состав в равновесных условиях, и температурой окружающей среды T_0 .

Ключевые слова: модельная система, диффузионное пламя, *n*-бутанол, *n*-пентанол, предельные углеводороды.

DOI 10.15372/FGV20230104

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена экспериментальному исследованию зависимости скорости распространения пламени над пленкой топлива на различных подложках в среде, обогащенной кислородом. Целью исследования является выяснение возможности распространения пламени с достаточно высокой скоростью порядка нормальной скорости соответствующего гомогенного стехиометрического состава, а также обобщение полученных экспериментальных данных.

При скоростях распространения пламени порядка 1 м/с система подложка — слой топлива может стать термически толстой. Скорость пламени при этом не зависит не только от свойств подложки, но и от толщины слоя топлива. То есть полученные данные могут быть применены для ванн любой глубины, а также разливов горючей жидкости в соответствующих средах.

Распространению пламени над поверхностью жидкого топлива в воздушной среде посвящено множество работ. Исследовалось распространение пламени при температуре топли-

ва выше и ниже температуры вспышки [1–7]. Доминирующим механизмом переноса тепла в предпламенную зону является конвекция жидкой фазы, обусловленная термокапиллярностью [3]. Показано, что уменьшение скорости распространения пламени в случае неглубокой ванны в основном обусловлено вязкостью жидкости и во вторую очередь — теплопотерями в стенку сосуда [5]. Таким образом, конвекция тепла в жидкой фазе является основным видом теплопередачи для распространения пламени над жидким топливом при температурах ниже температуры вспышки, тогда как теплопроводность в жидкой фазе и излучение пламени играют второстепенную роль. Объектом исследования в большинстве цитируемых выше работ являются сложные топлива, имеющие практическое применение, но изучались также и чистые вещества. В этих исследованиях толщина слоя топлива в основном такова, что физическими свойствами стенок контейнеров с топливами (ванн) можно пренебречь.

Другой предельный случай — это распространение пламени над достаточно тонкими пленками жидких топлив на подложках. Такие системы встречаются на практике. Это пористые среды, смоченные жидким топливом,

в свободном пространстве которых находится воздух. С практической точки зрения эта проблема интересна тем, что смоченная инертная пористая среда может стать пожаро- и взрывоопасной [8, 9]. Пористые среды также нередко используются в качестве взрывозащитного наполнителя топливных баков различных транспортных средств [10], т. е. там, где пористая среда всегда смочена.

Научный интерес к проблеме распространения пламени в пористой среде обусловлен возможностью реализации различных стационарных режимов горения: режима гетерогенной детонации [11], режима высокой скорости [12] и испарительно-диффузионного режима [13, 14]. Скорость соответствующих процессов составляет $400 \div 1050$ м/с [11], $0.1 \div 10$ м/с [12] и $4 \div 10$ см/с [14].

Практический интерес представляют случаи распространения пламени со скоростями в диапазоне $0.1 \div 10$ м/с. В работе [14] исследовалось распространение пламени над пленкой *n*-октана в трех пористых средах. Две среды были высокопористыми с долей свободного пространства около 0.98 и одна — низкопористая, образованная засыпкой стальными шариками с долей свободного пространства 0.4. В качестве высокопористых сред использовались пенополиуретан с открытой пористостью, представляющий собой совокупность тонких нитей полиуретана и пористого наполнителя на основе алюминиевой фольги. В качестве окислителя использовался воздух при различных начальных давлениях. С увеличением давления воздуха концентрация паров *n*-октана выходила за бедный предел, а пламя в этих условиях в высокопористых средах распространялось. Оказалось, что скорость пламени в режиме распространения за бедным пределом была одинаковой в этих двух средах, несмотря на различия в структуре и физических свойствах. Для того чтобы изучить влияние подложки на скорость и пределы распространения пламени, в работе [15] перешли на модельную систему — пленка топлива на тонкой плоской подложке, которая имитирует фольговую пористую среду.

Поставленная цель достигалась вариацией параметров подложки, топлива, геометрии образцов и их ориентации относительно вектора ускорения свободного падения. В распространении диффузионного пламени над поверхностью конденсированного материала (твёрдо-

го или жидкого) выделяются два предельных случая. Это термически толстые и термически тонкие системы [16]. Особенно интересны термически тонкие системы топливо — подложка. В этом случае скорость распространения пламени не должна зависеть от скорости встречного потока окислителя. Условиям термической тонкости удовлетворяет система пленка топлива на тонкой металлической подложке. В результате экспериментальных исследований определен ряд стационарных и нестационарных режимов распространения пламени над такими системами [17].

Среди них по механизму распространения можно выделить свободно-конвективный и низкоскоростной режимы пламени. В свободно-конвективном режиме пламя распространяется снизу вверх. Всплывающие продукты сгорания прогревают пленку топлива, она испаряется и сгорает, образуя новую порцию продуктов. Скорость распространения пламени в этом случае зависит от угла наклона подложки к горизонту, слабо зависит от свойств нанесенного топлива (предельные углеводороды с числом атомов от 10 до 16, $C_{10}H_{22}$ – $C_{16}H_{34}$) и достигает максимальных значений порядка 0.3 м/с для вертикального расположения подложки [15, 17]. В свободно-конвективном режиме скорость пламени практически не зависит от свойств топлива, в частности от разности $T_{st} - T_0$, где T_{st} — температура, при которой пары данного жидкого топлива образуют стехиометрическую смесь с воздухом, а T_0 — температура окружающей среды.

В низкоскоростном режиме скорость пламени на термически тонких подложках порядка 0.02 м/с. Скорость пламени не зависит от угла наклона подложки к горизонту в диапазоне от распространения сверху вниз до распространения в горизонтальной плоскости. В работе [18] показано, что в низкоскоростном режиме, в отличие от свободно-конвективного, скорость пламени зависит от свойств топлива. Чем больше число атомов углерода у предельного углеводорода, тем ниже скорость. В работе [19] исследовалось влияние теплопроводности подложки на скорость распространения пламени. Показано, что скорость тем выше, чем выше теплопроводность подложки. Для системы, состоящей из подложки с высокой теплопроводностью и пленки топлива на ней, показано, что лимитирующей стадией для процесса распространения пламени

является передача тепла через подложку от продуктов сгорания в холодную зону с пленкой топлива. В [20] предложена математическая модель механизма распространения пламени с учетом теплопередачи через подложку. В [20] также экспериментально показано, что при оценке скорости распространения пламени над топливом на медных подложках потоком тепла, обусловленного термокапиллярностью, можно пренебречь. Установлено, что скорость пламени растет с падением разности $T_{st} - T_0$. В работе [21] в качестве топлива также использовались предельные углеводороды с различным числом атомов. С целью понизить T_{st} в воздух добавлялся метан в концентрациях ниже бедного предела. Чем больше метана в воздухе, тем меньше необходимо испарить жидкого топлива, чтобы создать стехиометрическую концентрацию, тем ниже температура T_{st} для смеси паров топлива с метаном. С ростом концентрации метана наблюдалось увеличение скорости распространения пламени в соответствии с уравнением для скорости из [20]. Следует отметить, что при таком способе изменения T_{st} тепловой эффект сгорания единицы объема стехиометрической смеси практически не изменяется. В работе [21] получены новые экспериментальные свидетельства работоспособности предложенной в [20] оценки скорости распространения пламени в термически тонкой системе. Также впервые экспериментально показано, что в термически тонкой системе скорость пламени не зависит от скорости встречного потока окислителя. Однако предложенная в [21] гипотеза предела распространения пламени в такой системе согласуется с экспериментом только в случае учета течения пленки топлива под действием градиента температуры вдоль подложки. В работе [22], где изучалось влияние начальной температуры на скорость распространения пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках, также показано, что предложенная в [20] модель расчета скорости пламени удовлетворительно согласуется с экспериментом, но предел распространения пламени обусловлен невозможностью обеспечения достаточной толщины испаряющейся пленки топлива из-за убегания топлива вперед вследствие термокапиллярного эффекта. Таким образом, эксперименты указывали на то, что в термически тонких системах термокапиллярный поток не оказывает влияния на скорость пламени, но влияет на предел распространения

пламени по скорости потока окислителя и по начальной температуре системы.

В работе [23] изучалось распространение пламени над пленками топлива на тонких плоских подложках с низкой теплопроводностью. Показано, что такая система является термически толстой. Сделан вывод, что скорость распространения пламени над тонкими подложками с низкой теплопроводностью зависит от градиента температуры жидкости вблизи передней кромки пламени. Величина градиента температуры определяется не только теплофизическими свойствами топлива и подложки и их толщиной, а в основном производной зависимости коэффициента поверхностного натяжения σ от температуры ($d\sigma/dT$) и динамической вязкостью μ жидкого топлива. Роль подложки сводится к теплотерям, которые определяют ее теплоемкостью и толщиной.

В работах [24, 25] исследовалось распространение пламени над тонким слоем жидкости в плоском кварцевом канале навстречу потоку окислителя. В качестве окислителя использовались смеси кислорода с азотом в диапазоне от воздуха до чистого кислорода. Экспериментально показано, что пламя над слоем *n*-бутанола толщиной около 1 мм распространяется со скоростью от 2 м/с без потока кислорода до 4 м/с при скорости встречного потока кислорода 3 м/с. Эта система термически толстая.

В работе [25] показано, что при распространении пламени над слоем жидкости толщиной порядка 0.4 мм перед фронтом пламени вследствие термокапиллярного эффекта в жидкости образуется волна, движущаяся со скоростью пламени. Высота гребня волны коррелирует со скоростью пламени: сначала растет от высоты 0.2 мм при скоростях до 10 см/с, а затем резко падает до нуля от высоты 0.6 мм при скоростях выше 20 см/с. Показано, что должны быть нереально высокие градиенты температуры в жидкости, чтобы гребень волны двигался со скоростью пламени, при высокой скорости распространения пламени.

Таким образом, для термически толстых систем механизм, определяющий скорость распространения пламени в диапазоне скоростей ниже 0.1 м/с, должен включать в себя термокапиллярные явления. А в диапазоне скоростей выше 0.1 м/с скорость пламени почти не зависит ни от температуропроводности подложки, ни от термокапиллярного потока.

Целью данного исследования является выяснение возможности распространения пламени с достаточно высокой скоростью порядка нормальной скорости соответствующего гомогенного стехиометрического состава при увеличении содержания кислорода в окислительной среде. Особенность этой постановки задачи заключается в том, что повышение содержания кислорода приведет, с одной стороны, к увеличению T_{st} , а с другой стороны, также будет расти тепловой эффект единицы объема смеси. Это приведет к увеличению температуры продуктов сгорания T_b . Однако при данном содержании кислорода температуры продуктов сгорания T_b стехиометрических смесей будут близки для углеводородов одного гомологического ряда.

Как следует из этого краткого обзора, в литературе отсутствуют представления и теории, описывающие распространение пламени над поверхностью жидкого топлива с высокими скоростями. Главной целью данной работы является привлечение внимания исследователей к проблеме теоретического описания распространения пламени над поверхностью жидких топлив в средах, более агрессивных, чем воздух. Частной целью данной работы является представление экспериментальных данных по распространению пламени в этих условиях для верификации будущих теорий. В работе также представлена обработка экспериментальных данных в виде зависимостей скорости распространения пламени от параметров, детерминирующих, по мнению авторов, процесс распространения пламени над жидкостью с высокой скоростью.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В наших экспериментах проводились измерения средней скорости распространения пламени над тонкими пленками топлив (толщина порядка 10 мкм) в средах с различным содержанием кислорода в диапазоне от воздуха до чистого кислорода. В качестве подложек для пленок были использованы медная фольга толщиной 45 и 60 мкм и стекло толщиной 3 мм. В качестве топлива использовался ряд нормальных алканов C_nH_{2n+2} , $n = 10, 11, 12, 13, 16$, а также спирты: *n*-бутанол (C_4H_9OH) и *n*-пентанол ($C_5H_{11}OH$). Все эксперименты проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре $T_0 = 22 \pm 2$ °C, температура

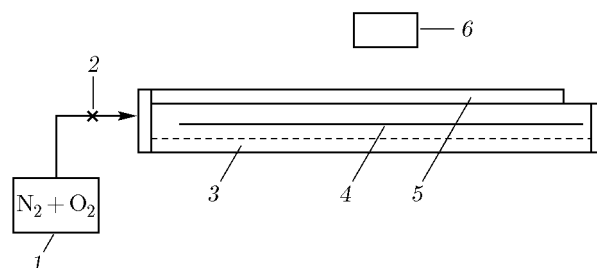


Рис. 1. Схема проведения экспериментов:

1 — смеситель высокого давления, 2 — клапан, 3 — нижняя стеклянная пластина, на которой проводились эксперименты, 4 — полоса медной фольги, 5 — верхняя, более короткая стеклянная пластина, 6 — видеокамера

вспышки всех топлив была выше этой величины.

Установка представляет собой квадратную трубу, составленную из полос стекла толщиной 3 мм (рис. 1). Труба располагалась горизонтально. Длина трубы 1 м, внутреннее сечение 50×50 мм, фольга располагалась на высоте 25 мм, топливо наносилось на верхнюю сторону фольги. Слева из смесителя высокого давления 1 через клапан 2 подается смесь воздуха с кислородом. В верхней части трубы на противоположном от ввода окислителя конце имеется открытая часть длиной 4 см, через которую выходит газ-окислитель при продувке, а также осуществляется зажигание факелом пропановоздушной смеси. Эксперимент проводился следующим образом. На нижнюю пластину трубы 3 или на верхнюю поверхность медной подложки 4 наносится слой топлива толщиной порядка 10 мкм. Слой наносится при снятой верхней пластине трубы. Затем верхняя пластина, которая на 4 см короче нижней, ставится на свое место, открывается клапан 2 и воздух вытесняется 10-кратным объемом окислителя, выходящего через открытую верхнюю часть трубы. После закрытия клапана 2 осуществляется зажигание пленки топлива. Таким образом, распространение пламени, в отличие от работ [24, 25], происходит в отсутствие встречного потока окислителя. Процесс распространения пламени записывается видеокамерой 5, расположенной сверху.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При распространении пламени над медной подложкой на воздухе в структуре пламени можно выделить следующие характерные эле-

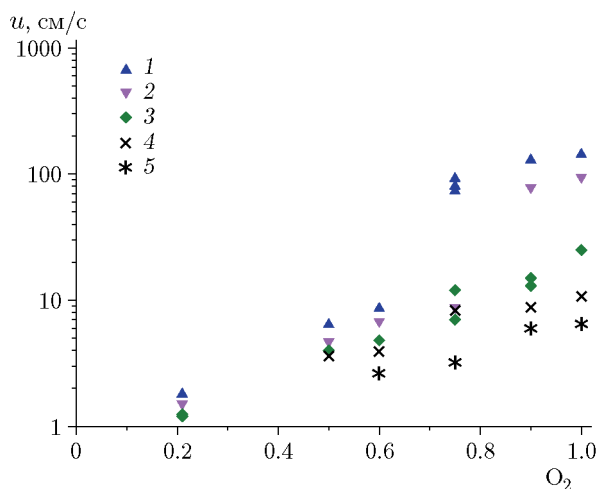


Рис. 2. Зависимость скорости распространения пламени над пленками предельных углеводородов: *n*-декана ($C_{10}H_{22}$) (1), *n*-ундекана ($C_{11}H_{24}$) (2), *n*-додекана ($C_{12}H_{26}$) (3), *n*-тридекана ($C_{13}H_{28}$) (4), *n*-гексадекана ($C_{16}H_{34}$) (5) на медной подложке от объемной концентрации кислорода в окислителе

менты: фронт пламени с ровной кромкой, расположенной вблизи поверхности подложки, короткий клинообразный участок жидкости под пламенем. Кромка пламени — ровная прямая линия, перпендикулярная боковым параллельным краям подложки. Перед кромкой пламени имеется некоторое утолщение пленки жидкости длиной 10 ÷ 15 мм. За кромкой пламени, под зоной свечения, характерный размер которой порядка 2 см, находится клинообразный участок жидкости длиной 1 ÷ 10 мм, короткий для предельных углеводородов и более длинный для спиртов. Пламя имеет синий цвет. Скорость пламени постоянна с точностью 2 % [15]. По мере увеличения содержания кислорода длина пламени увеличивается, увеличивается также длина пленки топлива под пламенем. Для более тяжелых углеводородов цвет пламени становится белым. При высоком содержании кислорода кромка пламени становится неровной, выделяется лидирующая точка, скорость распространения которой непостоянна. Пламя вблизи лидирующей точки синее, догорание пленки за лидирующей точкой происходит в виде отдельных «язычков» белого цвета. Далее под скоростью распространения пламени понимается средняя скорость лидирующей точки.

На рис. 2 представлена зависимость средней скорости распространения пламени от кон-

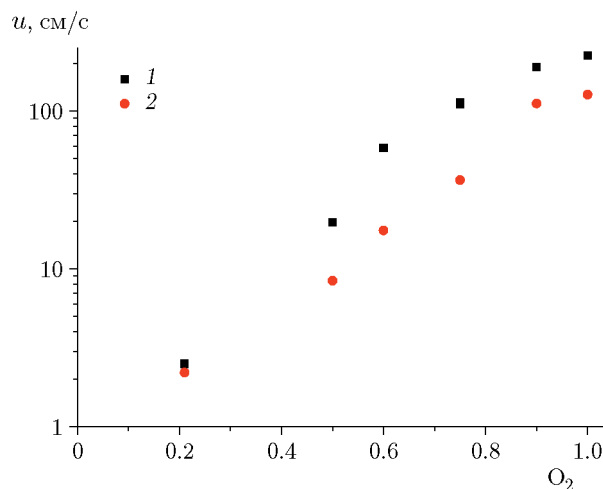


Рис. 3. Зависимость скорости распространения пламени над пленками *n*-бутанола (C_4H_9OH) (1) и *n*-пентанола ($C_5H_{11}OH$) (2) на медной подложке от объемной концентрации кислорода в окислителе

центрации кислорода над пленками предельных углеводородов и спиртов на подложке из медной фольги толщиной 45 мкм. Видно, что чем выше концентрация кислорода, тем выше скорость пламени. Чем выше молекулярная масса углеводорода, тем ниже скорость пламени при одной и той же концентрации кислорода.

Аналогичная зависимость для спиртов представлена на рис. 3.

Из рис. 2, 3 следует, что скорость распространения пламени в зависимости от концентрации кислорода изменяется почти на два порядка для спиртов и более чем на порядок для *n*-декана и *n*-ундекана.

На рис. 4 представлены зависимости скорости распространения пламени над пленками *n*-алканов и спиртов от концентрации кислорода в окислителе на подложках из стекла и меди. Данные по распространению пламени над подложкой из меди взяты из рис. 2, 3 при тех концентрациях кислорода, при которых наблюдалось распространение пламени над подложкой из стекла. При объемной концентрации кислорода ниже 0.5 пламя над пленкой топлива на стеклянной подложке не распространяется. Скорость распространения над подложкой из стекла в основном такая же, как и над подложкой из меди.

Было проведено несколько экспериментов с медной подложкой толщиной 60 мкм. Значе-

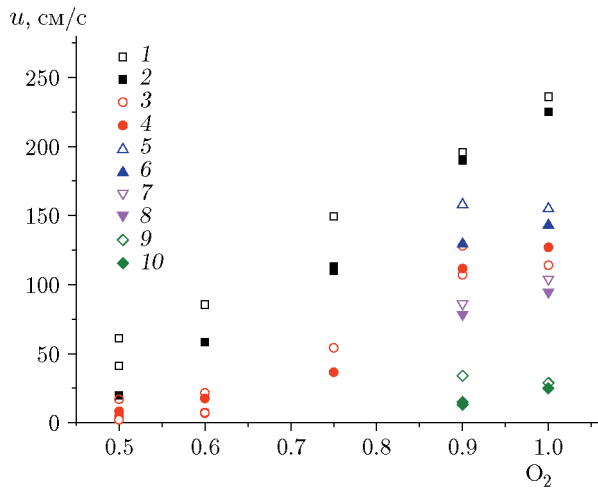


Рис. 4. Зависимость скорости распространения пламени над пленками *n*-алканов и спиртов от объемной концентрации кислорода в окислителе на подложках из стекла ($h_s = 5$ мм, точки с нечетными номерами) и меди ($h_s = 45$ мкм, точки с четными номерами):

топливо: 1, 2 — бутанол, 3, 4 — пентанол, 5, 6 — *n*-декан, 7, 8 — *n*-ундекан, 9, 10 — *n*-додекан

ния скорости пламени в кислороде были следующими: *n*-бутанол — 1.85 м/с (2.25), *n*-декан — 1.10 м/с (1.43), *n*-ундекан — 0.62 см/с (0.95), цифры в скобках — скорость на медной подложке толщиной 45 мкм. Это сравнение скоростей указывает на то, что влияние подложки все же есть. Чем толще подложка с высокой теплопроводностью, тем выше теплотери в нее и ниже скорость пламени.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение скоростей распространения пламени над пленками различных топлив на более толстой медной подложке (60 мкм) со скоростями на более тонкой подложке (45 мкм) при одинаковой теплопроводности подложек ($1.1 \text{ см}^2/\text{с}$) указывает на то, что даже при таких высоких скоростях пламени теплотери в подложку оказывают влияние на скорость распространения пламени. Чем толще подложка, тем большая часть потока тепла из фронта пламени расходуется на ее прогрев, тем ниже скорость пламени. Если же теплопроводность подложки низкая, как у стекла (порядка $0.01 \text{ см}^2/\text{с}$), то и теплотери ниже, несмотря на большую толщину подложки (5 мм), также выше скорость распространения пламени.

Экспериментальные данные по скорости распространения получены в широком диапазоне от 2 до 265 см/с на подложках толщиной 45 мкм и 5 мм. Очевидно, что в одних случаях система подложка — топливо является термически тонкой, а в других — термически толстой. Механизм распространения пламени будет различным. Критерием термической тонкости системы является соотношение характерных времен прогрева системы в направлении распространения пламени и в перпендикулярном направлении и выражается следующим образом: характерное время прогрева слоя топлива в направлении, перпендикулярном распространению пламени ($\tau_1 = h^2/\kappa_1$), должно быть меньше характерного времени передачи тепла вдоль подложки ($\tau_2 = \kappa_2/u^2$) в направлении распространения пламени. Здесь h — толщина пленки, κ — температуропроводность, u — скорость распространения пламени. Характерное время прогрева пленки топлива толщиной $h_f = 10$ мкм $\tau_f = h_f^2/k_f = 10^{-10}/(0.8 \cdot 10^{-7}) \approx 0.001$ с. Температуропроводность системы медная подложка толщиной 45 мкм — топливо составляет $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, а для системы стекло — топливо она равна $6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Характерное время прогрева медной подложки $\tau_{s1} = h_{s1}^2/k_{s1} = 4.5^2 \cdot 10^{-10}/(1.1 \cdot 10^{-4}) \approx 2 \cdot 10^{-5}$ с, а стекла толщиной 5 мм $\tau_{s2} = h_{s2}^2/k_{s2} = 5^2 \cdot 10^{-6}/(6 \cdot 10^{-7}) \approx 5$ с. Характерное время прогрева перед фронтом пламени на медной подложке $\tau_2 = \kappa/u^2 \approx 10^{-4}/u^2$ [с]. Видно, что для скоростей ниже 0.1 м/с система с медной подложкой является термически тонкой: $\tau_2 > 10^{-2} \gg \tau_f$, $\tau_2 \gg \tau_{s1}$. Для системы стекло — топливо $\tau_2 = \kappa/u^2 \approx 6 \cdot 10^{-7}/u^2$, $\tau_2 < 3 \cdot 10^{-5}$ с для всего диапазона скоростей пламени, т. е. система термически толстая: $\tau_2 \ll \tau_f$, $\tau_2 \ll \tau_{s2}$. При скоростях выше 30 см/с $\tau_2 < 0.001$ с, т. е. $\tau_2 < \tau_f$, не выполняется условие термической тонкости даже для слоя топлива, поэтому скорость пламени при этих скоростях должна слабо зависеть от свойств подложки.

При распространении пламени над пленкой жидкого топлива ведущей кромкой пламени, передним фронтом, наиболее выступающим в сторону распространения пламени и наиболее близко находящимся к жидкой фазе, является линия, перед которой имеет место стехиометрическое соотношение концентраций топлива и окислителя. Эта линия — аналог тройной

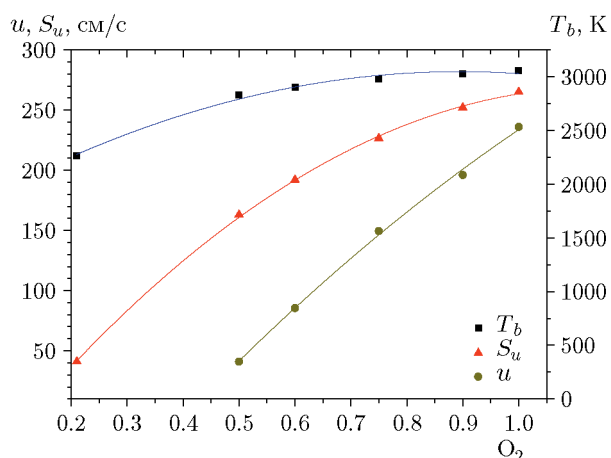


Рис. 5. Зависимость скорости распространения пламени (кружки) над пленкой *n*-бутанола на стекле, нормальной скорости (треугольники) гомогенной стехиометрической смеси бутанола и окислителя и температуры пламени (квадраты) от содержания кислорода в смеси с азотом

точки диффузионного пламени [26]. На остальной поверхности диффузионного пламени стехиометрическим является только соотношение потоков топлива и окислителя. По нашему мнению, физико-химические процессы вблизи этой линии имеют определяющее значение в механизме распространения пламени с высокой скоростью. Поэтому мы попытаемся связать скорость распространения пламени с параметрами гомогенной стехиометрической смеси данного топлива с окислителем.

Рассмотрим, как соотносится скорость распространения пламени над пленкой топлива с нормальной скоростью и температурой пламени гомогенной стехиометрической смеси соответствующего топлива, на примере *n*-бутанола. Нормальная скорость S_u и температура пламени T_b рассчитывались по [27–29]. На рис. 5 представлены зависимости скорости распространения пламени u над пленкой *n*-бутанола на стекле, нормальной скорости S_u гомогенной стехиометрической смеси и температуры пламени T_b от содержания кислорода в смеси с азотом. Отметим, что нормальная скорость гомогенной смеси с воздухом согласно расчетам по [27–29] составляет 41 см/с, а скорость пламени над пленкой *n*-бутанола на медной подложке толщиной 45 мкм составляет 2.5 см/с. При этих условиях на стекле пламя не распространяется.

Из рис. 5 видно, что расчетная равновесная температура пламени в том диапазоне объемной концентрации кислорода, в котором распространяется пламя над пленкой топлива ($0.5 \div 1.0$), изменяется незначительно ($2833 \div 3054$ K). Нормальная скорость растет от 163 до 265 см/с. Скорость пламени над пленкой топлива с увеличением концентрации кислорода в том же диапазоне растет от 41 до 236 см/с, т. е. растет быстрее, чем нормальная скорость гомогенной стехиометрической смеси. Это указывает на отличие механизма распространения пламени над пленками топлива от механизма распространения ламинарного пламени по гомогенной смеси.

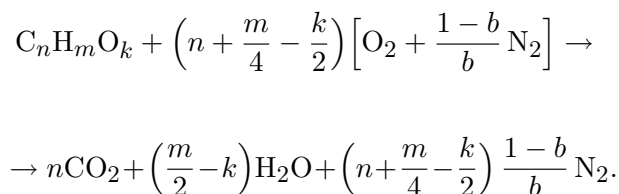
В [25] показано, что при скоростях распространения пламени выше 30 см/с отсутствует утолщение пленки топлива перед фронтом пламени. Таким образом, при высоких скоростях пламени, ввиду отсутствия движения пленки топлива и слабой зависимости скорости пламени от параметров подложки (толщины и теплопроводности), должен осуществляться какой-то другой механизм распространения пламени, отличный от описанных выше [20, 23]. Выявление характерных черт этого механизма и обобщение полученных экспериментальных результатов и является целью дальнейшего обсуждения.

Рассмотрим, что изменяется в процессе распространения пламени с увеличением концентрации кислорода. При распространении пламени над поверхностью конденсированного вещества (жидкого или твердого) начало фронта пламени (кончик) находится там, где образуется стехиометрическая смесь паров топлива с окислителем (тройная точка) [20, 26]. При увеличении концентрации кислорода в окислителе нормальная скорость стехиометрической смеси увеличивается. Но при данной концентрации кислорода она остается приблизительно одинаковой для предельных углеводородов независимо от их номера в гомологическом ряду. Приближение кончика пламени к поверхности ограничивается «мертвой зоной» d , которая зависит от числа Пекле, построенного на нормальной скорости и температуропроводности κ газа: $Pe_{cr} = S_u d / \kappa$. Число Пекле должно быть приблизительно одинаковым для всех смесей. Таким образом, с увеличением доли кислорода растет нормальная скорость пламени, значение d падает обратно пропорционально S_u . По-видимому, положение кончика пламе-

ни на этом расстоянии является устойчивым. Предположим, что кончик пламени сдвинулся ближе к поверхности жидкого топлива, находится на расстоянии меньше критического. В этом случае возрастет тепловой поток в жидкую фазу, увеличатся теплопотери из фронта пламени, снизится температура и нормальная скорость пламени. Кончик пламени отодвинется от поверхности жидкой фазы. Предположим, что кончик отодвинулся на расстояние больше критического. В этом случае позади кончика пламени на расстоянии от жидкого топлива, меньшем, чем от поверхности жидкой фазы до кончика пламени, будет иметь место стехиометрическая концентрация паров топлива. А так как расстояние больше критического, то пламя сможет переместиться в эту область, чуть сзади, но ближе к жидкому топливу.

В результате с ростом содержания кислорода пламя приближается к пленке топлива, увеличивается градиент температуры в газовой фазе в направлении топлива и подложки, как вследствие приближения к поверхности, так и вследствие увеличения температуры пламени. Это приводит к увеличению теплового потока в конденсированную фазу, что, в свою очередь, должно увеличить прогрев пленки топлива и подложки и испарение топлива. Увеличение испарения топлива должно увеличить его диффузию в направлении распространения пламени, а также скорость распространения пламени. Кроме того, при повышении концентрации кислорода для создания стехиометрической концентрации топлива требуется большая концентрация паров топлива. Этот процесс должен несколько замедлить увеличение скорости пламени. В целом, увеличение концентрации кислорода приводит к росту скорости пламени.

Если горит вещество вида $C_nH_mO_k$, а окислителем является смесь из b объемных частей кислорода с $1-b$ частями азота, то уравнение химической реакции запишется так:



Выражение для стехиометрических концентраций топлива в объемных долях c_{st} в этом случае имеет вид

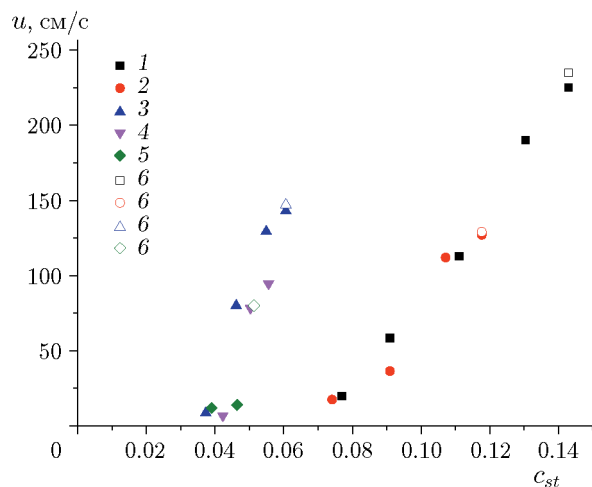


Рис. 6. Зависимость скорости пламени от объемной концентрации топлива:

1 — *n*-бутанол, 2 — *n*-пентанол, 3 — *n*-декан, 4 — *n*-ундекан, 5 — *n*-додекан, 6 — соответствующие 1–3, 5 вещества по данным работы [30]

$$c_{st} = \frac{1}{1 + (n + m/4 - k/2)(1 + (1 - b)/b)} = \frac{b}{b + n + m/4 - k/2},$$

для спиртов ($m = 2n + 2$, $k = 1$) $c_{st} = b/(b + 1.5n)$, а для предельных углеводородов ($m = 2n + 2$, $k = 0$)

$$c_{st} = \frac{1}{1 + (n + m/4 - k/2)(1 + (1 - b)/b)} = \frac{b}{b + (3n + 1)/2}.$$

Видно, что с ростом концентрации кислорода растет и объемная концентрация углеводорода в стехиометрической смеси.

Из рис. 2, 3 следует, что общей зависимости скорости пламени от объемной концентрации кислорода нет ни в области низких, ни в области высоких скоростей.

На рис. 6 представлена зависимость скорости распространения пламени на стеклянной подложке от объемной стехиометрической концентрации топлива c_{st} при высоких скоростях распространения пламени. Точки на рисунке образуют две группы. В обеих группах зависимости близки к линейным. Причем предельные (и в данном случае тяжелые) углеводороды имеют высокие скорости при более низких концентрациях, а зависимость скорости от концентрации у них более крутая, чем у спиртов.

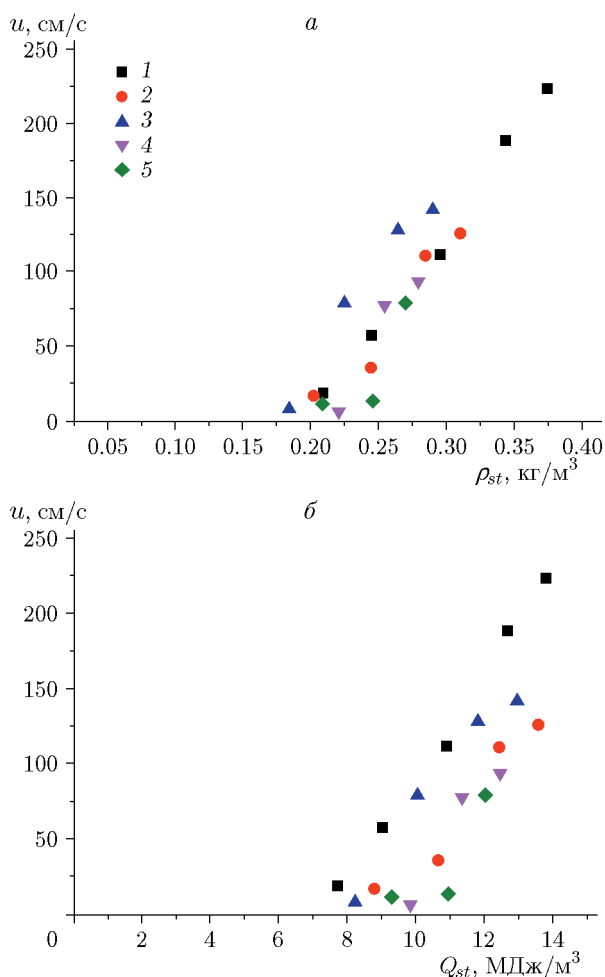


Рис. 7. Зависимость скорости пламени от массовой концентрации топлива (*а*) и от теплового эффекта единицы объема стехиометрической смеси (*б*):

1 — n -бутанол, 2 — n -пентанол, 3 — n -декан, 4 — n -ундекан, 5 — n -додекан

Разброс экспериментальных точек в пределах каждой группы относительно мал. Возможно, возникновение двух групп зависимостей связано с существенно разной молекулярной массой, а также с несколько различным тепловым эффектом сгорания единицы объема стехиометрической смеси. Чтобы исключить влияние молекулярной массы, были построены зависимости скорости распространения пламени от концентрации равновесных паров топлива ρ_{st} при температуре T_{st} , соответствующей этой концентрации, и от теплового эффекта сгорания единицы объема смеси Q_{st} . Эти зависимости приведены на рис. 7. Концентрация топлива рассчитывалась по известным зависимостям равновесного давления паров от температуры,

представленным в виде уравнения Антуана [31] $\lg p = a - b/(c + t)$, а тепловой эффект единицы объема Q_{st} (МДж/м³) — по известной из [31] молярной теплоте сгорания q для каждого топлива:

$$\rho_{st} = \frac{c_{st} p_{atm} M}{RT_{st}}, \quad Q_{st} = \frac{c_{st} p_{atm}}{RT_{st}} q,$$

где p_{atm} — атмосферное давление, $M = 14n + 2 + 16k$ — молекулярная масса углеводорода, R — универсальная газовая постоянная.

На рис. 7 представлены те же зависимости скорости распространения пламени над пленками различных топлив на подложке, что и на рис. 6, но от других параметров: на рис. 7, *а* от массовой концентрации топлива в стехиометрической смеси, а на рис. 7, *б* от теплового эффекта сгорания единицы объема смеси. Видно, что корреляция скорости пламени с массовой концентрацией топлива или тепловым эффектом единицы объема стехиометрической смеси сближает зависимости для разных групп топлива. Следует отметить, что тепловой эффект сгорания предельных углеводородов на единицу массы топлива практически одинаков — около 44.5 МДж/кг, а для спиртов следующий: 36.9 МДж/кг для n -бутанола и 38.5 МДж/кг для n -пентанола. Поэтому для предельных углеводородов рис. 7, *б* — это, по существу, просто изменение масштаба по оси абсцисс рис. 7, *а*. Однако для спиртов произошло расхождение точек, первоначально лежащих на одной прямой на рис. 7, *а*. Очевидно, что это обусловлено различием тепловых эффектов единицы объема смеси. Несмотря на то, что тепловой эффект n -бутанола ниже, чем у n -пентанола, зависимость скорости распространения сдвинута в сторону более высоких скоростей при более низком тепловом эффекте сгорания стехиометрической смеси. По-видимому, это обусловлено меньшими тепловыми потерями из кончика пламени на нагрев топлива до температуры, обеспечивающей стехиометрическую концентрацию паров топлива. Видно, что при близких тепловых эффектах скорость тем выше, чем меньше номер углеводорода, чем меньше T_{st} . Таким образом, увеличение T_{st} существенно снижает скорость распространения пламени, что указывает на увеличение расхода тепла на нагрев топлива, который растет с ростом $T_{st} - T_0$.

Рассмотрим, что изменяется в процессе распространения пламени, если концентрация

кислорода одна и та же, а молекулярная масса топлива увеличивается. Если концентрация кислорода одна и та же, то и нормальная скорость стехиометрической смеси, и температура продуктов сгорания будут близки для различных углеводородов. Следовательно, поток тепла из кончика пламени в конденсированную фазу не будет зависеть от номера углеводорода. Номер углеводорода определяет температуру, при которой получается стехиометрическое соотношение паров топлива и окислителя. Чем выше номер (чем больше молекулярная масса) углеводорода, тем выше эта температура. Для нагрева жидкого топлива требуется больше тепла. При постоянном потоке тепла это означает увеличение времени прогрева и, следовательно, уменьшение скорости распространения пламени. Следует также отметить, что с ростом номера углеводорода количество тепла на испарение при создании стехиометрической смеси несколько снижается. Поэтому снижение скорости с ростом номера углеводорода указывает на то, что это снижение обусловлено не испарением топлива, а потерями тепла на прогрев системы жидкое топливо — подложка. При высоких скоростях пламени теплотери существенны только в жидкую фазу. На это указывает независимость скорости пламени от теплопроводности подложки даже для тонких слоев топлива (10 мкм), а также независимость от толщины пленки топлива. Для пленок толщиной 10 мкм и порядка 1 мм [24] скорость распространения пламени над соответствующими топливами одинакова. Это дает уверенность в том, что и для больших толщин слоя топлива это положение будет справедливым. Таким образом, данные по скорости распространения пламени, полученные на тонких слоях топлива (в данном диапазоне скоростей), будут представительны и для любых больших толщин слоев топлива, а экспериментальная процедура значительно проще.

ВЫВОДЫ

- Экспериментально показано, что скорость распространения пламени над топливом на подложке растет с повышением концентрации кислорода. Скорость распространения пламени растет быстрее, чем нормальная скорость соответствующей гомогенной стехиометрической смеси.

- С ростом скорости распространения пламени влияние теплотерь в конденсированную фазу снижается.

- При равных тепловых эффектах сгорания единицы объема стехиометрической смеси скорость распространения пламени над пленкой топлива тем ниже, чем больше величина $T_{st} - T_0$.

- При скоростях распространения пламени выше 0.3 м/с, т. е. когда скорость слабо зависит от свойств подложки, скорость пламени линейно зависит как от объемной стехиометрической концентрации топлива данного гомологического ряда, так и от теплоты сгорания единицы объема стехиометрической смеси.

- Скорость распространения пламени над однокомпонентным топливом определяют следующие параметры: химическая формула, зависимость давления паров топлива от температуры, теплопроводность, теплоемкость, плотность, теплота сгорания единицы объема стехиометрической смеси и разность $T_{st} - T_0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Glassman I., Dryer F. L. Flame spreading across liquid fuels // *Fire Saf. J.* — 1981. — V. 3, N 2. — P. 123–138. — DOI: 10.1016/0379-7112(81)90038-2.
2. Ross H. D. Ignition of and flame spread over laboratory-scale pools of pure liquid fuels // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1994. — V. 20, N 1. — P. 17–63. — DOI: 10.1016/0360-1285(94)90005-1.
3. Schiller D. N., Ross H. D., Sirignano W. A. Computational analysis of flame spread across alcohol pools // *Combust. Sci. Technol.* — 1996. — V. 118, N 4-6. — P. 203–255. — DOI: 10.1080/00102209608951980.
4. Guo J., Lu S.-X., Wang C.-J. Effect of fuel depth on flame spread over aviation kerosene // *J. Fire Sci.* — 2014. — V. 32, N 1. — P. 43–51. — DOI: 10.1177/0734904113491705.
5. Li M. H., Lu S. X., Guo J., Wu X. J., Tsui K. L. Effects of pool dimension on flame spread of aviation kerosene coating on a metal substrate // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2015. — V. 84. — P. 54–60. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.005.
6. Li M. H., Wang C.-J., Sun H., Liu H., Yang S.-L., Zhang A. Heat and mass transfer of flame spread over jet fuel at sub-flash temperature // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2017. — V. 89. — P. 276–283. — DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.08.022.
7. Li M., Zhou L., Shu Z., Hu P., Wang C., Ding C. Gas-liquid hydrodynamics and vortex motion of flame spread over jet fuel in longitudinal air stream // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2022. — V. 134. — 110601. — DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110601.
8. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров: пер. с англ. / под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. — М.: Стройиздат, 1990.

9. McIntosh A. C., Bains M., Crocombe W., Griffiths G. F. Autoignition of combustible fluids in porous insulation materials // *Combust. Flame*. — 1991. — V. 99, N 3-4. — P. 541–550. — DOI: 10.1016/0010-2180(94)90047-7.
10. Стрижевский И. И., Заказнов В. Ф. Промышленные огнепреградители. — М.: Химия, 1974.
11. Лямин Г. А., Пинаев А. В. Гетерогенная детонация (газ — пленка) в пористой среде. Область существования и пределы // *Физика горения и взрыва*. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 102–108.
12. Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media // *Combust. Flame*. — 1991. — V. 87, N 2. — P. 182–190. — DOI: 10.1016/0010-2180(91)90168-B.
13. Korzhavin A. A., Bunev V. A., Babkin V. S. Diffusion flame propagation in an inert porous medium wetted with fuel // *Combustion, Detonation, Shock Waves: Proc. of the Zel'dovich Memorial Int. Conf. on Combustion, Moscow / S. M. Frolov (Ed.)*. — 1994. — V. 2. — P. 198–200.
14. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С. Распространение пламени в пористых средах, смоченных топливом // *Физика горения и взрыва*. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 76–85.
15. Коржавин А. А., Бунев В. А., Гордиенко Д. М., Бабкин В. С. Поведение пламен, распространяющихся по пленкам жидкости на металлических подложках // *Физика горения и взрыва*. — 1998. — Т. 34, № 3. — С. 15–18.
16. De Ris J. N. Spread of a laminar diffusion flame // *Symp. (Int.) Combust.* — 1969. — V. 12, N 1. — P. 241–252. — DOI: 10.1016/S0082-0784(69)80407-8.
17. Korzhavin A. A., Bunev V. A., Namyatov I. G., Minaev S. S., Babkin V. S. Combustion regimes of liquid fuel film on thermally thin metallic substrate // *Proc. of the 3rd Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards*. — Preston, United Kingdom: Univ. of Central Lancashire, 2001. — P. 379–388.
18. Коржавин А. А., Намятов И. Г., Бунев В. А., Бабкин В. С. Взаимодействие двух диффузионных пламен, распространяющихся вдоль металлической подложки, смоченной различными топливами // *Физика горения и взрыва*. — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 28–37.
19. Коржавин А. А., Бунев В. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // *Физика горения и взрыва*. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 25–30.
20. Намятов И. Г., Минаев С. С., Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А. Диффузионное горение пленки жидкого топлива на металлической подложке // *Физика горения и взрыва*. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 12–21.
21. Коржавин А. А., Какуткина Н. А., Намятов И. Г. Распространение пламени над пленками топлива при встречном потоке газа // *Физика горения и взрыва*. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 37–43.
22. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С., Намятов И. Г. Влияние начальной температуры на скорость распространения пламени над пленкой топлива на металлической подложке // *Физика горения и взрыва*. — 2012. — Т. 48, № 5. — С. 87–96.
23. Намятов И. Г., Коржавин А. А. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на подложке с низкой теплопроводностью // *Физика горения и взрыва*. — 2021. — Т. 57, № 4. — С. 29–37. — DOI: 10.15372/FGV20210403.
24. Замашников В. В., Коржавин А. А., Чиннов Е. А. Исследование горения жидкого топлива в прямоугольном канале // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 15–21.
25. Zamashchikov V. V., Korzhavin A. A., Chinnov E. A. Combustion of liquid fuel in the flat micro- and minichannels // *Int. J. Heat Mass Transfer*. — 2016. — V. 102. — P. 470–478. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.043.
26. Law C. K. *Combustion Physics*. — New York: Cambridge Univ. Press, 2006.
27. Kee R. J., Grcar J. F., Smooke M. D., Miller J. A. Premix: A Fortran Computer Program for Modeling Steady Laminar One-dimensional Premixed Flames // *Sandia Nat. Lab.* — Rep. No SAND 85-8240.
28. Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A. CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics // *Sandia Nat. Lab.* — Rep. No SAND 89-8009B.
29. Sarathy S. M., Vranckx S., Yasunaga K., Mehl M., Oßwald P., Metcalfe W. K., Westbrook C. K., Pitz W. J., Kohse-Höinghaus K., Fernandes R. X., Curran H. J. A comprehensive chemical kinetic combustion model for the four butanol isomers // *Combust. Flame*. — 2012. — V. 159, N 6. — P. 2028–2055. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.017.
30. Замашников В. В. О механизме распространения пламени над поверхностью горючей жидкости // *Физика горения и взрыва*. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 12–16. — DOI: 10.15372/FGV20200602.
31. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.; в 2 кн. — М.: Химия, 1990.

Поступила в редакцию 05.03.2022.
Принята к публикации 22.06.2022.