

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ И СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

L.-X. Zhou¹, F. Wang²¹Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, zhoulx@mail.tsinghua.edu.cn²School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing, China

Процесс воспламенения струи распыленного жидкого топлива, часто встречающийся в энергетике и энергетическом машиностроении, является важным фактором при проектировании и эксплуатации камер сгорания. Воспламенение струи распыленного жидкого топлива в значительной мере связано с воспламенением отдельных капель. В большинстве современных исследований процесса воспламенения одиночных капель и распыленного жидкого топлива используется численное моделирование. Однако последующий анализ результатов проведенного численного моделирования не всегда позволяет явно указать механизм воспламенения, что создает сложности для практического использования полученных результатов. В статье представлено экспериментальное и аналитическое исследование воспламенения одиночных капель и струи распыленного жидкого топлива при различных условиях. Результаты расчетов по одномерной аналитической модели сопоставлены с экспериментальными результатами. Установлено, что температура воспламенения одиночной капли уменьшается при увеличении размера капли и возрастает при росте относительной скорости газа. Температура воспламенения двухфазной смеси воздуха с керосином продуктами сгорания пропана повышается при увеличении коэффициента избытка воздуха и уменьшается при увеличении размера капель. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации камер сгорания на жидком топливе.

Ключевые слова: капля, распыленное жидкое топливо, воспламенение, эксперимент, аналитическая модель.

DOI 10.15372/FGV20230105

ВВЕДЕНИЕ

Задача воспламенения струи распыленного жидкого топлива часто встречается в энергетике и энергетическом машиностроении. Поэтому при эксплуатации и конструировании камер сгорания важно понимать, как именно протекает этот сложный процесс. Можно с уверенностью утверждать, что воспламенение распыленного жидкого топлива в значительной мере связано с воспламенением отдельных капель. В ранних работах [1, 2] был проведен асимптотический теоретический анализ процесса воспламенения одиночной капли и получено критическое значение числа Дамкёлера. Этот анализ относится к случаю горения капли в неподвижном воздухе. Впоследствии воспламенение одиночных капель в условиях вынужденной конвекции исследовалось численно в работе [3]. Моделирование проводилось на основе заданного поля скоростей течения газа в предположении, что воспламенение сначала

происходит в следе за каплей. Были получены время задержки воспламенения и расстояние от капли до точки воспламенения. Численное моделирование воспламенения одиночных капель с использованием детального механизма химических реакций выполнено в работе [4]. Ни естественная, ни вынужденная конвекция в модели не учитывались, что соответствует условиям микрогравитации. Получено время задержки воспламенения в зависимости от температуры окружающей среды. Детальное численное моделирование воспламенения капель метанола при вынужденной конвекции проведено в работе [5]. Получена зависимость времени задержки воспламенения от числа Рейнольдса капли и зависимость расположения точки воспламенения от скорости газового потока. В работе [6] с помощью трехмерного численного моделирования изучалась задержка воспламенения одиночных капель гептана, но никакой информации о пределах воспламенения в работе не представлено. Что касается экспериментальных исследо-

ваний, то в работах [7, 8] измерялось время задержки воспламенения капель *n*-гептана и *n*-гексадекана в зависимости от размера капель и температуры окружающей среды. Информации о пределах воспламенения в этих работах также нет. В работе [9] представлен подробный обзор теоретических и экспериментальных исследований процесса воспламенения одиночных капель, проведено сравнение пределов воспламенения капель, предсказанных теоретически и измеренных экспериментально. В работе [10] методом численного моделирования изучалось воспламенение трехкомпонентных топливных смесей метан/водород/*n*-додекан и метанол/водород/*n*-додекан. В [11] выполнено численное моделирование влияния давления впрыска на период задержки воспламенения *n*-додекана. В работе [12] методом крупных вихрей исследовалось влияние температуры окружающей среды на воспламенение двухкомпонентной топливной смеси *n*-додекан/метан. Задержка воспламенения струи распыленного *n*-гептана изучалась в работе [13] с помощью разных моделей турбулентности. В работе [14] проведено численное моделирование воспламенения частиц гелеобразных топлив. Имеется также ряд работ по экспериментальному исследованию задержки воспламенения. В работе [15] было измерено время задержки воспламенения *n*-додекана при впрыске в сосуд постоянного объема с высокой температурой среды (800 и 900 К). В недавних экспериментах [16, 17] измерялось время задержки воспламенения дизельного топлива в камере сгорания постоянного объема, в [18, 19] — капель суспензионных органоводоугольных топлив при различных условиях нагрева. Из проведенного литературного обзора видно, что численное моделирование используется во многих современных исследованиях процесса воспламенения одиночных капель и распыленного жидкого топлива, однако моделирование не всегда позволяет явно указать механизм воспламенения, что создает сложности для практического использования полученных результатов. Если говорить о современных экспериментальных работах, то в основном измеряется время задержки воспламенения распыленного жидкого топлива, но не измеряется зависимость температуры воспламенения от параметров потока двухфазной смеси.

В данной статье представлено экспериментальное и аналитическое исследование воспла-

менения одиночных капель и воспламенения двухфазной смеси воздуха и керосина продуктами сгорания пропановоздушной смеси при различных коэффициентах избытка воздуха и размерах капель. Полученные результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации горелок и камер сгорания на жидком топливе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАПЛИ

Эксперименты по воспламенению одиночной подвешенной капли проводились в печи, схематически изображенной на рис. 1 [20]. Исследуемые капли углеводородов размером 1.5 мм подвешивались на кварцевой нити диаметром 2 мм, которая до начала эксперимента находилась внутри охлаждаемой водой крышки. Поток воздуха, поступающий в печь, сначала подогревался спиральным змеевиком, а затем нагревался в шести цилиндрах из карбида кремния до температуры $293 \div 1273$ К. Давление и скорость воздуха относительно капли изменялись с помощью вакуумного насоса в диапазонах $760 \div 150$ Торр и $0 \div 10$ м/с соответственно. Для выравнивания скорости входящего потока нагретый воздух пропусклся через набор сеток. В начале эксперимента водоохлаждаемая крышка быстро убиралась с помощью

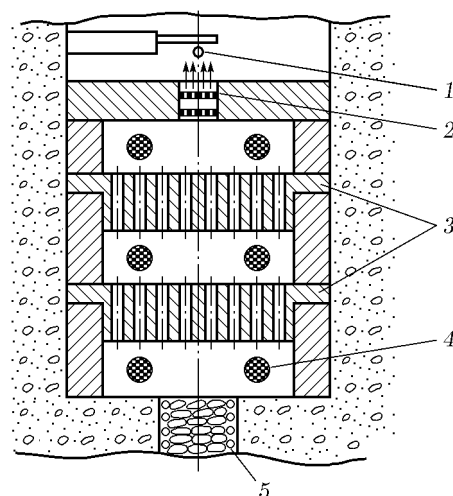


Рис. 1. Печь для исследования воспламенения подвешенной капли [20]:

1 — капля, 2 — сетка, 3 — огнеупорный кирпич, 4 — нагревательный элемент (карбид кремния), 5 — спиральный змеевик

электромагнитного клапана и капля оказывалась в высокотемпературном потоке воздуха. Затем капля либо воспламенялась, либо просто испарялась.

2. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАПЛИ

Ниже представлена аналитическая модель воспламенения капли в условиях вынужденной конвекции. Начальные (до воспламенения) распределения температуры и концентраций топлива и кислорода в окружающем каплю газовом слое (приведенной пленке) в условиях вынужденной конвекции показаны пунктирными линиями на рис. 2 [21].

Рассмотрим процесс испарения капли в квазистационарном приближении. Влияние вынужденной конвекции в одномерной сферической модели учитывается с помощью приближения так называемой приведенной пленки, показанной на рис. 2 [21]. Предполагается, что передача тепла теплопроводностью в приведенной пленке эквивалентна конвективному теплообмену между каплей и газом (без испарения и горения):

$$Q = \pi d_p^2 h_* (T_g - T_w) = \frac{\pi d_1 d_p}{r_1 - r_p} \lambda (T_g - T_w). \quad (1)$$

Тогда получаем

$$\text{Nu}_* = \frac{h_* d_p}{\lambda} = \frac{d_1}{r_1 - r_p}, \quad d_1 = d_p \frac{\text{Nu}_*}{\text{Nu}_* - 2}. \quad (2)$$

Здесь число Нуссельта Nu_* рассчитывалось по формуле Ранца — Маршалла

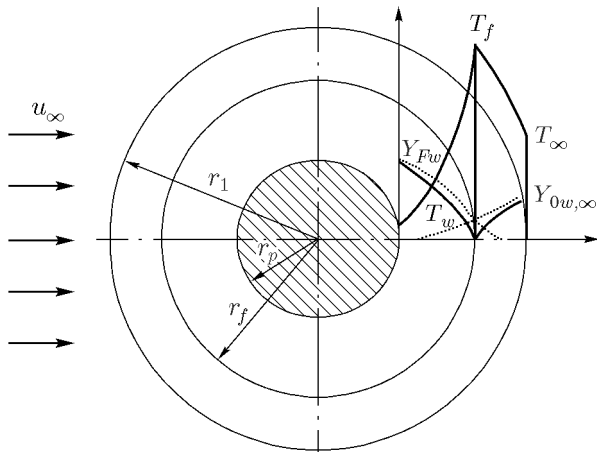


Рис. 2. Приведенная пленка вокруг капли [21]

$$\text{Nu}_* = 2 + 0.6 \text{Re}_p^{0.5} \text{Pr}^{0.33}, \quad (3)$$

$$\text{Re}_p = |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_p| d_p / \nu,$$

где Re , Pr — числа Рейнольдса и Прандтля.

Ниже представлены основные уравнения, описывающие процессы в приведенной пленке (слое газа, окружающем каплю):

$$4\pi r^2 \rho v = 4\pi r^2 \rho_w v_w = \dot{m}_p = \text{const}, \quad p \approx \text{const},$$

$$\rho v \frac{dY_s}{dr} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 D \rho \frac{dY_s}{dr} \right) - w_s,$$

$$\rho v c_p \frac{dT}{dr} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \lambda \frac{dT}{dr} \right) + w_s Q_s,$$

$$r = r_p:$$

$$v = v_w, \quad -D \rho \left(\frac{dY_s}{dr} \right)_w + Y_{sw} \rho_w v_w = \alpha \rho_w v_w \quad (4)$$

$$(s = F, \quad \alpha = 1; \quad s \neq F, \quad \alpha = 0),$$

$$\lambda \left(\frac{dT}{dr} \right)_w = \rho_w v_w q_e = \frac{\dot{m}_p q_e}{4\pi r_p^2},$$

$$Y_{Fw} = B_w \exp \left(- \frac{E_w}{RT_w} \right),$$

$$r = r_1:$$

$$T = T_g, \quad Y_F = Y_{pr} = 0,$$

$$Y_{Ox} = Y_{Ox \infty}, \quad Y_{inert} = Y_{inert \infty}.$$

Здесь d — диаметр, h — коэффициент конвективного теплообмена, T — температура, r — радиус, λ — теплопроводность, ρ — плотность, v — скорость потока, w — скорость химической реакции, m — масса капли, Y — массовая доля, p — давление, D — коэффициент газовой диффузии, ν — кинематическая вязкость, c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Q — теплота реакции, $\alpha = L/L_0$ — коэффициент избытка воздуха, L — текущее отношение воздух/топливо, L_0 — стехиометрическое отношение, q — теплота фазового перехода, B_w — предэкспонент, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная. Индексами обозначены: g — газ, w — стенка,

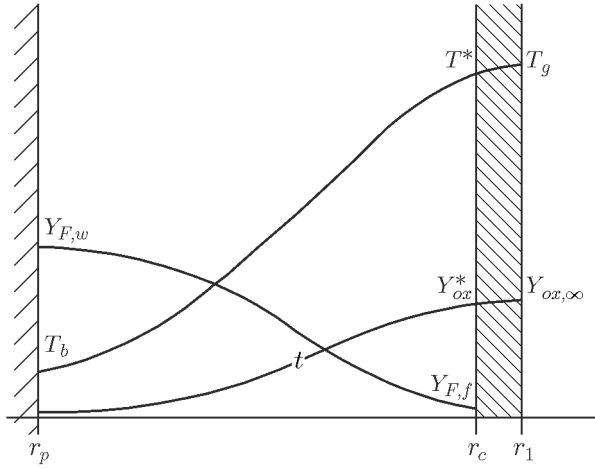


Рис. 3. Схема воспламенения капли [21]

p — капля, F, f — топливо, s — вещество, e — испарение, $inert$ — инертный газ, ox — кислород, ∞ — набегающий поток.

Благодаря сильной зависимости скорости реакции от температуры, мы можем воспользоваться приближением Франк-Каменецкого и разделить приведенную пленку на две части: очень тонкую реакционную зону и зону нагрева (рис. 3) [21], причем толщина реакционной зоны намного меньше толщины зоны нагрева. В прилегающей к горячей границе реакционной зоне (зоне 1, $r_c < r < r_1$, где r_1 — радиус приведенной пленки, а r_c — внутренний радиус реакционной зоны) конвективным членом в уравнении энергии можно пренебречь. В зоне нагрева (зоне 2, $r_p < r < r_c$) можно пренебречь скоростью химической реакции. В результате получаем следующие приближенные уравнения энергии в этих зонах:

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda \frac{dT}{dr} \right) + w_s Q_s = 0 \quad \text{для зоны 1,}$$

$$\rho v c_p \frac{dT}{dr} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \lambda \frac{dT}{dr} \right) \quad \text{для зоны 2.}$$

Предположим, что воспламенение сначала происходит на горячей границе, и используем критерий Зельдовича для зажигания горячей поверхностью:

$$\left(\frac{dT}{dr} \right)_1 = 0.$$

Основываясь на результатах теории воспламенения газов, в момент воспламенения температура на внутренней границе реакционной зоны

можно приблизительно рассчитать по формуле

$$T^* \approx T_g + RT_g^2/E.$$

Средние значения концентраций кислорода и топлива в реакционной зоне можно оценить следующим образом:

$$Y_{ox} \approx Y_{ox,\infty}, \quad Y_F \approx Y_{Fw} RT_g/E.$$

Если пренебречь изменением кривизны в очень тонкой реакционной зоне, то уравнение энергии сводится к виду

$$\frac{d^2 T}{dr^2} = - \frac{w_s Q_s}{\lambda_\infty}.$$

При интегрировании этого уравнения в зоне 1, т. е. от r_c до r_1 , получаем

$$\left(\frac{dT}{dr} \right)_c = \left(\frac{2Q_s}{\lambda_\infty} \int_{T^*}^{T_g} w_s dT \right)^{1/2}.$$

Реакция окисления топлива описывается с помощью одностадийной обобщенной реакции второго порядка:

$$w_s = B \rho_\infty^2 Y_{Fw} Y_{ox,\infty} \frac{RT_g}{E} \frac{T_g^2}{T^2} \exp \left(- \frac{E}{RT} \right). \quad (5)$$

Интеграл от скорости химической реакции приблизительно равен

$$\begin{aligned} \int_{T^*}^{T_g} w_s dT &\approx \left[1 - \exp \left(- \frac{R^2 T_g^3}{E^2} \right) \right] \times \\ &\times B \rho_\infty^2 Y_{Fw} Y_{ox,\infty} \exp \left(- \frac{E}{RT_g} \right). \end{aligned}$$

Интегрируя уравнение энергии в зоне 2, т. е. от r_p до r_c , можно заменить r_c на r_1 , поскольку толщина зоны реакции намного меньше толщины приведенной пленки:

$$\left(\frac{dT}{dr} \right)_2 = \frac{\dot{m}_p [c_p (T_g - T_b) + q_e]}{4\pi r_1^2 \lambda_\infty}.$$

Скорость испарения равна

$$\dot{m}_p = \pi d_p \text{Nu}_* \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) \ln \left[1 + \frac{c_p (T_g - T_b)}{q_e} \right].$$

В результате имеем

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_2 = \frac{(Nu_* - 2)^2}{d_p Nu_*} \left[(T_g - T_b) + \frac{q_e}{c_p}\right] \times \\ \times \ln \left[1 + \frac{c_p(T_g - T_b)}{q_e}\right].$$

Условием сопряжения является равенство количества тепла, выделяющегося в химической реакции, и количества тепла, поступающего на поверхность капли:

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_c = \left(\frac{dT}{dr}\right)_2.$$

В итоге получаем критерий воспламенения одиночной капли:

$$\left\{ \frac{(Nu_* - 2)^2}{d_p Nu_*} \left[(T_g - T_b) + \frac{q_e}{c_p}\right] \times \right. \\ \left. \times \ln \left[1 + \frac{c_p(T_g - T_b)}{q_e}\right] \right\}^2 = \\ = \frac{2Q_s}{\lambda_\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2 T_g^3}{E^2}\right)\right] \times \\ \times B \rho_\infty^2 Y_{Fw} Y_{ox,\infty} \exp\left(-\frac{E}{RT_g}\right). \quad (6)$$

Это равенство можно переписать следующим образом:

$$\frac{1}{d_p^2} \left[\frac{(Nu_* - 2)^2}{Nu_*} \right]^2 = A T_g^n \exp\left(-\frac{E}{RT_g}\right), \quad (7)$$

$$Nu_* = 2 + 0.6 Re_d^{0.5} Pr^{0.33},$$

где A — экспериментальный коэффициент, который включает в себя предэкспоненциальный множитель, концентрацию топлива на поверхности капли и концентрацию кислорода за пределами приведенной пленки. В связи с неточностью полученной упрощенной модели значения коэффициента A и степенного коэффициента n могут быть определены экспериментально. Если $Nu_* \gg 2$, то $Nu_* \sim (u_\infty d_p)^{1/2}$. Окончательно модель воспламенения одиночной капли можно выразить в виде

$$\frac{u_\infty}{d_p} = \frac{v_g - v_p}{d_p} = A \exp\left(-\frac{E}{RT_g^n}\right). \quad (8)$$

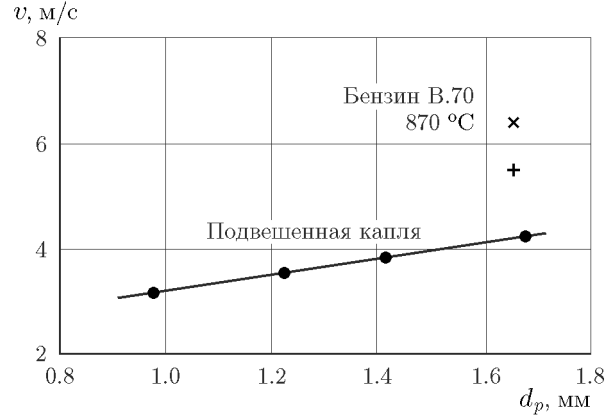


Рис. 4. Пределы воспламенения одиночной капли [20]

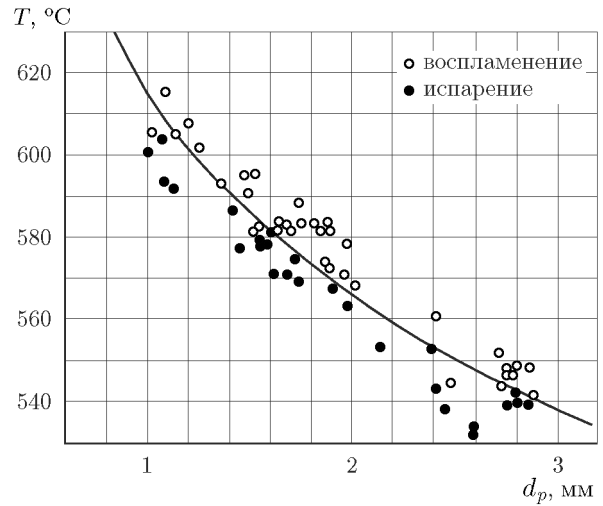


Рис. 5. Температура воспламенения одиночной капли в зависимости от размера капли: линия — теория, точки — эксперимент [22] с изоктаном

Из полученных выше теоретических результатов следует, что при постоянной температуре T_g имеем $u_\infty \sim d_p$, при постоянной скорости u_∞ — $d_p \sim T_g^{-n} \exp(E/RT_g)$.

Таким образом, относительная скорость газа, при которой воспламеняется одиночная капля, находится в прямо пропорциональной зависимости от размера капли, а температура воспламенения капли при увеличении размера капли уменьшается. Для проверки этих теоретических выводов было проведено сравнение результатов расчетов с данными экспериментов, полученными нами ранее в [20] (рис. 4), и с данными экспериментов [22] (рис. 5). Видно, что результаты расчетов находятся либо в

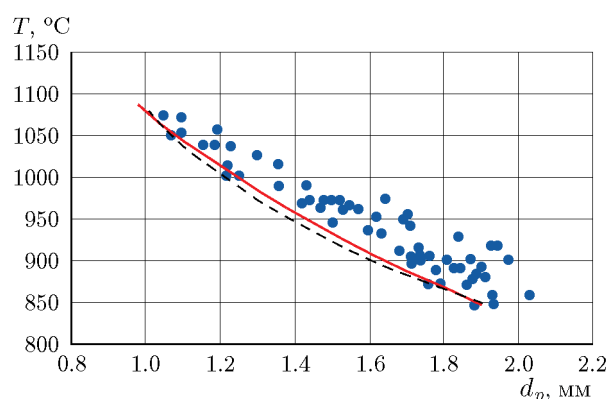


Рис. 6. Пределы воспламенения одиночной капли керосина RP3:

точки — эксперимент, сплошная линия — модель с учетом естественной конвекции, штриховая — модель с неподвижным воздухом

качественном, либо в количественном согласии с экспериментальными результатами.

Для дальнейшей проверки полученной модели воспламенения одиночной капли недавно [23] на установке для исследования воспла-

менения одиночных подвешенных капель были проведены эксперименты, в которых в качестве жидкого топлива использовался авиационный керосин RP3. Сравнение предсказаний модели с экспериментами [23] (рис. 6) показывает, что результаты расчетов и измерений хорошо согласуются между собой.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ВОЗДУХА И КЕРОСИНА ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ПРОПАНА

Схема экспериментальной установки для воспламенения струи распыленного керосина продуктами сгорания пропана изображена на рис. 7 [20]. Цифрами обозначены основные элементы: камера смешения и сгорания (1), пневматические форсунки (2), газовая горелка (3), баллон с пропаном (4), трубка Пито (5), нагнетатель холодного воздуха (6), емкость с керосином (7), насос для камеры сгорания газообразного топлива (8), компрессор для пневматических форсунок (9). Принцип воспламенения струи иллюстрирует рис. 8 [24]. На вы-

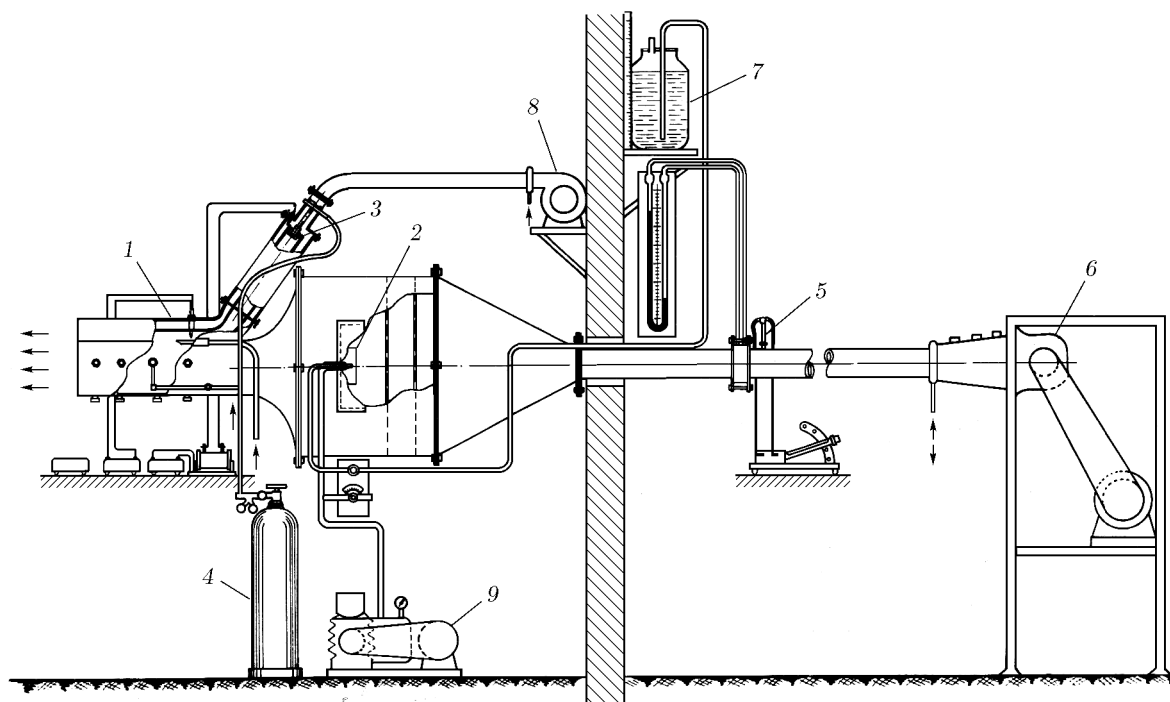


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для исследования воспламенения струи распыленного керосина [20]:

1 — камера смешения и сгорания, 2 — пневматические форсунки, 3 — газовая горелка, 4 — баллон с пропаном, 5 — трубка Пито, 6 — основной нагнетатель холодного воздуха, 7 — емкость с керосином, 8 — насос для камеры сгорания газообразного топлива, 9 — компрессор для пневматических форсунок

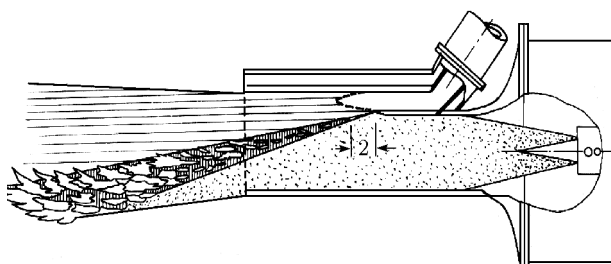


Рис. 8. Принцип воспламенения струи распыленного жидкого топлива [22]

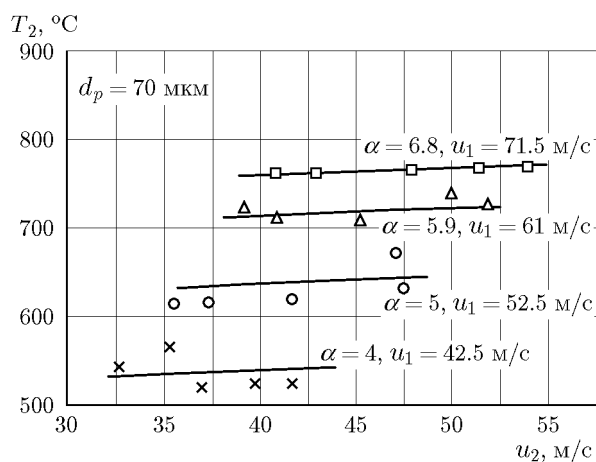


Рис. 9. Зависимость температуры воспламенения двухфазной смеси от скорости газа [25]

ходе из вспомогательной камеры сгорания (камеры сгорания газообразного топлива) температура продуктов сгорания пропановоздушной смеси составила $953 \div 1273$ К. Двухфазная смесь воздуха и керосина, создаваемая пневматическими форсунками, воспламенялась в камере смешения (основной камере сгорания). Распыленные капли керосина имели размер $10 \div 200$ мкм. Температура газообразных продуктов горения измерялась термопарой. Размер капель определялся по отпечаткам на закопченной пластинке. При проведении экспериментов сначала запускались насосы, подающие воздух во вспомогательную и основную камеры сгорания. Затем с помощью электрической искры воспламенялась пропановоздушная смесь. После стабилизации пламени пропановоздушной смеси начинал работать компрессор, подающий воздух в пневматические форсунки, распыляющие жидкое топливо. Температура и скорость продуктов сгорания газа регулировались путем изменения расхода пропана и воз-

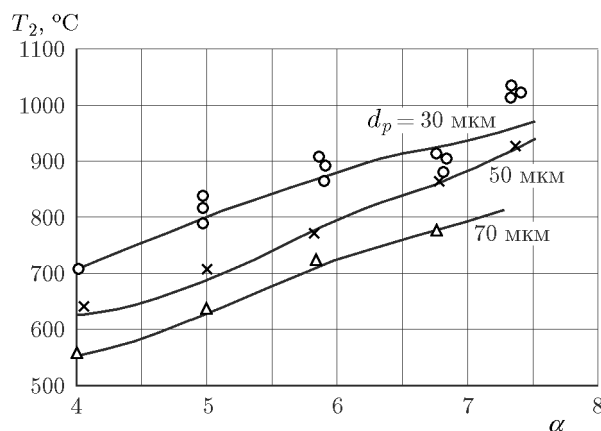


Рис. 10. Зависимость температуры воспламенения двухфазной смеси от коэффициента избытка воздуха [25]

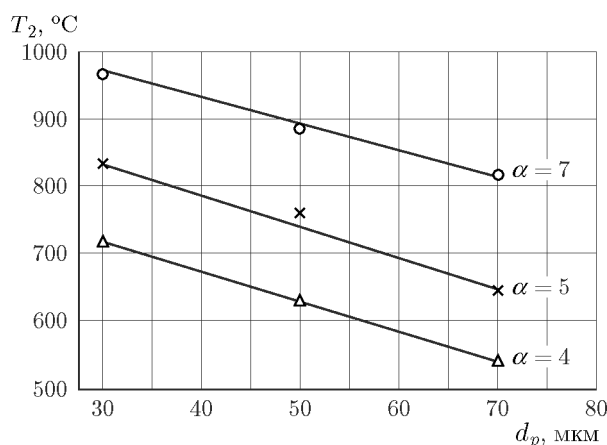


Рис. 11. Зависимость температуры воспламенения двухфазной смеси от размера капель [25]

духа. Размер капель регулировался путем изменения соотношения между топливом и воздухом в пневматических форсунках, а коэффициент избытка воздуха — путем изменения расхода жидкого топлива и основного воздушного потока. Критерием воспламенения служило возникновение пламени двухфазной смеси.

Изучено влияние скорости продуктов сгорания u_2 , коэффициента избытка воздуха α и размера капель d_p на температуру воспламенения. Полученные результаты приведены на рис. 9–11 соответственно [24, 25]. Видно, что скорость продуктов сгорания практически не влияет на температуру воспламенения. Температура воспламенения повышается при увеличении коэффициента избытка воздуха, но уменьшается при увеличении размера капель.

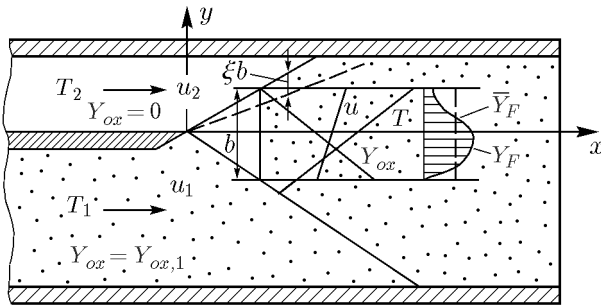


Рис. 12. Схема смешения потока двухфазной смеси с потоком продуктов сгорания [21]

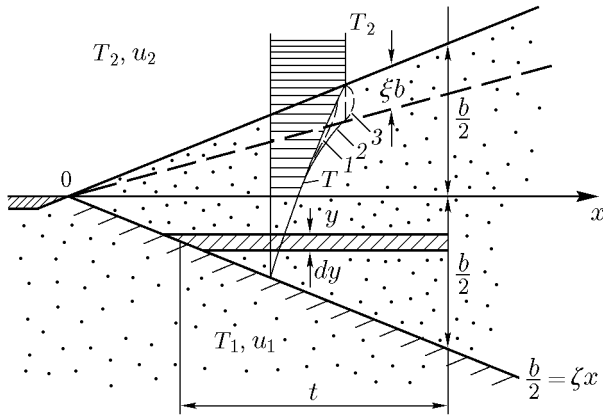


Рис. 13. Схема воспламенения в слое смешения [21]

4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Ниже представлена аналитическая модель воспламенения струи распыленного керосина горячими продуктами сгорания. Пусть полубесконечный поток двухфазной смеси воздуха и керосина смешивается с полубесконечным потоком продуктов сгорания газа, как показано на рис. 12, 13 [21].

Очевидно, что воспламенение может произойти только в слое смешения. Все переменные, используемые в одномерной модели, осреднены по поперечному сечению. Предположим, что (1) ширина слоя смешения прямо пропорциональна расстоянию вдоль оси x ; (2) профили скорости газа, температуры и концентрации кислорода линейны; (3) до воспламенения можно использовать закономерности, описывающие газовую струю, чтобы определить ширину слоя смешения; (4) константа испарения капель в слое смешения не изменяется. Рассмотрим изменение осредненной по поперечному се-

чению концентрации паров топлива, которая определяется только процессом испарения капель.

Уравнение сохранения для концентрации паров топлива вдоль направления потока имеет следующий вид:

$$\bar{u} \frac{d}{dx} (b \rho \bar{Y}_F) = \frac{d}{dt} (b \rho \bar{Y}_F) = \int_{y_1}^{b/2} 4\pi r^2 \rho_p \frac{dr}{dt} N_0 dy = \int_{y_1}^{b/2} \frac{\pi d}{4} K \rho_p N_0 dy, \quad (9)$$

где $\bar{u} = (\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2) / (\rho_1 + \rho_2)$, b — ширина струи, $\bar{Y}_F$ — осредненная по поперечному сечению концентрация топлива, ρ_p — плотность жидкости, N_0 — счетная концентрация капель, K — константа скорости испарения капель, y_1 — начальное значение поперечной координаты. Граница слоя смешения развивается следующим образом:

$$b = 2\zeta x = c x \frac{\rho_2 u_2 - \rho_1 u_1}{\rho_2 u_2 + \rho_1 u_1}, \quad (10)$$

где ζ — эмпирический коэффициент. Счетная концентрация капель равна

$$N_0 = \rho_\infty (1 - \psi_0) / (\rho_p \alpha L_0 \pi d^3 / 6), \quad (11)$$

где ψ_0 — степень предварительного испарения. Тогда получаем

$t < \tau_s$:

$$\bar{Y}_F = \frac{1}{\alpha L_0} \left\{ 1 + 2\tau_s \left[\frac{(1 - t/\tau_s)^{5/2}}{5t} - 1 \right] \right\}, \quad (12)$$

$t > \tau_s$:

$$\bar{Y}_F = \frac{1}{\alpha L_0} \left[1 - \frac{2\tau_s}{5t} \right],$$

где $\tau_s = d_0^2 / K$ — время жизни капель.

Воспламенение происходит в тонком слое шириной ξb (причем значение коэффициента ξ невелико). Ниже представлено уравнение сохранения энергии в этом тонком слое, прилегающем к горячей границе слоя смешения:

$$\begin{aligned} \xi b \rho_2 c_p \frac{dT}{dx} &= Q_1 - Q_2 - Q_3 = \\ &= \xi b Q_s k_{0s} \rho_2 \bar{Y}_F \bar{Y}_{ox} \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) - \\ &- \xi S_0 c_p (T - T_2) - \kappa \xi (\rho_2 u_2 - \rho_1 u_1) (T - T_2). \end{aligned} \quad (13)$$

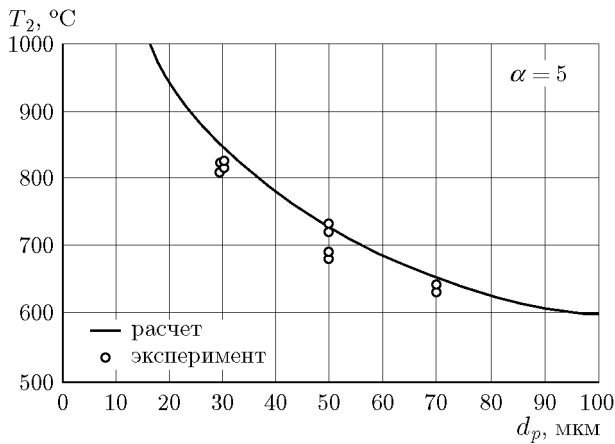


Рис. 14. Зависимость температуры воспламенения от размера капель [25]

Здесь κ , ξ — эмпирические коэффициенты, k_0 — предэкспоненциальный множитель, S_0 — количество испаренного вещества в поперечном сечении двухфазной струи. Условие воспламенения:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad \frac{\partial Q_1}{\partial T} = \frac{\partial (Q_2 + Q_3)}{\partial T}.$$

Наконец, для $t > \tau_s$ закон воспламенения можно сформулировать следующим образом:

$$k_{0s} Q_s \rho \left(t - \frac{2\tau_s}{5} \right) Y_{ox,\infty} E \times \\ \times \exp \left(\frac{E}{RT_2} \right) \frac{1}{R^2 T_2^2} = A \alpha L_0 c_p, \quad (14)$$

где A — эмпирическая константа. Видно, что температура воспламенения двухфазной смеси горячими продуктами сгорания T_2 связана с размером капель (через время жизни капель τ_s) и коэффициентом избытка воздуха. Рис. 14 [25] показывает, что теоретическая и экспериментальная зависимости температуры воспламенения от размера капель находятся в хорошем согласии друг с другом. При увеличении размера капель температура воспламенения уменьшается. Этот результат согласуется с полученным законом воспламенения капель, что означает, что горение двухфазной смеси происходит в режиме диффузионного горения капель.

Влияние коэффициента избытка воздуха на температуру воспламенения двухфазной смеси иллюстрирует рис. 15 [25]. Как теория,

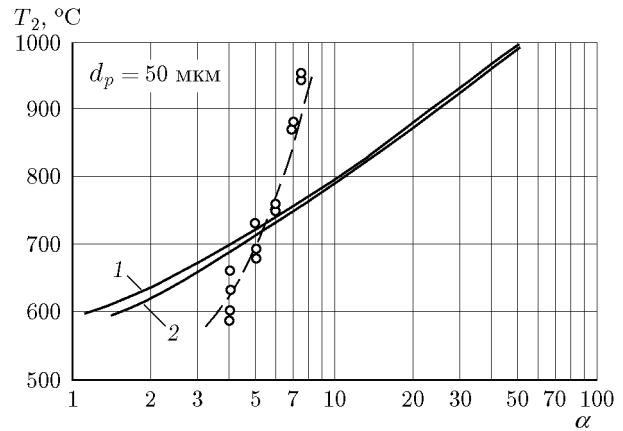


Рис. 15. Зависимость температуры воспламенения от коэффициента избытка воздуха [25]:

1 — расчет для не полностью испаренного топлива, 2 — расчет для полностью испаренного топлива, точки — эксперимент

так и эксперимент показывают, что температура воспламенения двухфазной смеси повышается при увеличении коэффициента избытка воздуха. Однако экспериментальная зависимость сильнее зависимости, предсказываемой теорией. Это связано с тем, что представленная теоретическая модель описывает смешение двух полубесконечных потоков (горячего и холодного), а на практике происходит смешение двух потоков конечного размера, истекающих в холодную среду. По мере увеличения коэффициента избытка воздуха все больше и больше холодного воздуха попадает в продукты сгорания, что приводит к повышению температуры воспламенения.

ВЫВОДЫ

1. Температура воспламенения одиночной капли уменьшается при увеличении размера капли.
2. Относительная скорость газа, при которой происходит воспламенение одиночной капли, находится в прямо пропорциональной зависимости от размера капли.
3. Температура воспламенения двухфазной смеси воздуха с керосином горячими продуктами сгорания уменьшается при увеличении размера капель.
4. Температура воспламенения двухфазной смеси воздуха с керосином горячими продуктами сгорания увеличивается при увеличении коэффициента избытка воздуха.

Данное исследование проведено при поддержке National Natural Science Foundation of China (grant 51390493).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Law C. K.** Asymptotic theory for ignition and extinction in droplet burning // *Combust. Flame.* — 1975. — V. 26. — P. 89–98. — DOI: 10.1016/0010-2180(75)90131-5.
2. **Law C. K.** Theory of thermal ignition in fuel droplet burning // *Combust. Flame.* — 1978. — V. 31. — P. 285–296. — DOI: 10.1016/0010-2180(78)90141-4.
3. **Wong S.-C., Liao X.-X., Yang J.-R.** A simplified theory of the ignition of single droplets under forced convection // *Combust. Flame.* — 1997. — V. 110, N 3. — P. 319–334. — DOI: 10.1016/S0010-2180(97)00076-X.
4. **Schnaubelt S., Morieue O., Coordest T., Eigenbrod C., Rath Zarm H. J.** Detailed numerical simulations of the multistage self-ignition process of *n*-heptane, isolated droplets with their verification by comparison with microgravity experiments // *Proc. Combust. Inst.* — 2000. — V. 28, N 1. — P. 953–960. — DOI: 10.1016/S0082-0784(00)80301-X.
5. **Stauch R., Maas U.** The ignition of methanol droplets in a laminar convective environment // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 153, N 1-2. — P. 45–57. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.12.001.
6. **Awasthi I., Pope D. N., Gogos G.** Effects of the ambient temperature and initial diameter in droplet combustion // *Combust. Flame.* — 2014. — V. 161, N 7. — P. 1883–1899. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.01.001.
7. **Saitoh T., Ishiguro S., Niioka T.** An experimental study of droplet ignition characteristics near the ignitable limit // *Combust. Flame.* — 1982. — V. 48. — P. 27–32. — DOI: 10.1016/0010-2180(82)90113-4.
8. **Takei M., Tsukamoto T., Niioka T.** Ignition of blended-fuel droplet in high-temperature atmosphere // *Combust. Flame.* — 1993. — V. 93, N 1-2. — P. 149–156. — DOI: 10.1016/0010-2180(93)90089-L.
9. **Aggarwal S. K.** Single droplet ignition: Theoretical analysis and experimental findings // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2014. — V. 45. — P. 79–107. — DOI: 10.1016/j.pecs.2014.05.002.
10. **Karimkashi S., Kahila H., Kaario O., Larimi M., Vuorinen V.** Numerical study on tri-fuel combustion: Ignition properties of hydrogen-enriched methane-diesel and methanol-diesel mixtures // *Int. J. Hydrogen Energy.* — 2020. — V. 45, N 7. — P. 4946–4962. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.033.
11. **Shi Z.-C., Lee C.-F., Wu H., Li H.-Y., Wu Y., Zhang L., Bo Y.-Q., Liu F.-S.** Effect of injection pressure on the impinging spray and ignition characteristics of the heavy-duty diesel engine under low-temperature conditions // *Appl. Energy.* — 2020. — V. 262. — 114552. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114552.
12. **Tekgul B., Kahila H., Kaario O., Vuorinen V.** Large-eddy simulation of dual-fuel spray ignition at different ambient temperatures // *Combust. Flame.* — 2020. — V. 215. — P. 51–65. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.01.017.
13. **Wei H.-Q., Chen X., Zhou L., Chen R.** Effects of the turbulence model and the spray model on predictions of the *n*-heptane jet fuel-air mixing and the ignition characteristics with a reduced chemistry mechanism // *Proc. Inst. Mech. Eng., Pt D: J. Automobile Eng.* — 2017. — V. 231, N 14. — P. 1877–1888. — DOI: 10.1177/0954407016687478.
14. **Glushkov D. O., Kosintsev A. G., Kuznetsov G. V., Vysokomorny V. S.** Numerical simulation of ignition of a typical gel fuel particle, based on organic polymer thickener, in a high-temperature air medium // *Acta Astronaut.* — 2021. — V. 178. — P. 272–284. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.09.004.
15. **Moiz A. A., Cung K. D., Lee S.-Y.** Ignition, lift-off and soot formation studies in *n*-dodecane split injection spray-flames // *Int. J. Engine Res.* — 2017. — V. 18, N 10. — P. 1077–1087. — DOI: 10.1177/1468087417700778.
16. **Alhikami A. F., Yao C.-E., Wang W.-C.** A study of the spray ignition characteristics of hydro-processed renewable diesel, petroleum diesel, and biodiesel using a constant volume combustion chamber // *Combust. Flame.* — 2021. — V. 223. — P. 55–64. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.09.033.
17. **Alhikami A. F., Wang W.-C.** Experimental study of the spray ignition characteristics of hydro-processed renewable jet and petroleum jet fuels in a constant volume combustion chamber // *Fuel.* — 2021. — V. 283. — 119286. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119286.
18. **Valiullin T., Vershinina K., Strizhak P.** Ignition of slurry fuel droplets with different heating conditions // *Energies.* — 2019. — V. 12, N 23. — 4553. — DOI: 10.3390/en12234553.
19. **Valiullin T. R., Vershinina K. Yu., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** An experimental investigation into ignition and combustion of groups of slurry fuel droplets containing high concentrations of water // *Fuel Process. Technol.* — 2020. — V. 210. — 106553. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106553.
20. **Чжоу Ли-Син.** Испарение и горение отдельных капель и совокупности распыленного жидкого углеводородного топлива в воздухе: дис. . . . канд. техн. наук / Ленинградский политехн. ин-т им. М. И. Калинина. — Ленинград, 1961.

21. **Zhou L.-X.** Combustion Theory and Dynamics of Reacting Fluid Flows (in Chinese). — Beijing: Sci. Press, 1986.
22. **Клячко Л. А., Истратова З. В.** К теории нижнего предела распространения пламени в двухфазной смеси // 3-е Всесоюз. совещание по теории горения. — М.: Наука, 1960. — С. 48–57.
23. **Wang F. et al.** Ignition of mixed-fuel droplets in high-temperature air (in Chinese) // Presentation at Chinese National Symposium on Combustion, Ma'anshan, China, October 21–23, 2016. — Paper N 164144.
24. **Теория** топочных процессов / под ред. Г. Ф. Кнорре, И. И. Палеева. — М.: Энергия, 1966.
25. **Zhou L.-X. Wang F.** Thermal ignition of kerosene spray (in Chinese) // Presentation at Chinese National Symposium on Combustion, Shamen, China, November 12–15, 2020. — Paper N 204069.

Поступила в редакцию 22.12.2021.

После доработки 21.03.2022.

Принята к публикации 22.06.2022.
