

О СЖИГАНИИ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Ю.М. Голдобин, П.С. Кузнецов

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

На основе кинетического уравнения и полученной скорости горения одиночной капли определены текущая и начальная функции распределения частиц по радиусам для автотельного режима горения. Скорость горения капли получена для случая кондуктивного подвода теплоты к поверхности капли от фронта горения. Получено выражение для расчета доли несгоревшего к текущему моменту времени топлива, необходимое для расчетов горения полидисперсных систем капель.

Ключевые слова: горение, жидкое топливо, капли, полидисперсность, функция распределения, скорость горения, автотельные параметры.

Полидисперсность системы капель распыленного жидкого топлива можно учитывать на основании кинетического уравнения для функции распределения частиц по радиусам $f(r_s, t)$, аналогично рассмотренным в работах [1, 2]. Новым в таком подходе является то, что эволюция функции распределения зависит от кинетики процесса горения отдельной частицы, а не выбирается произвольным образом, что встречается в ряде работ.

Решение кинетического уравнения возможно при представлении скорости горения единичной капли в виде произведения двух функций $\Omega(r_s)$ и $\omega(t)$:

$$W(r_s, t) = \frac{dr_s}{dt} = \Omega(r_s) \times \omega(t), \quad (1)$$

где $W(r_s, t)$ – скорость горения единичной капли; r_s – радиус капли; t – время.

Тогда функция распределения частиц по радиусам также представляется в виде произведения двух функций, зависящих только от радиуса, и только от времени. Это позволяет получить функцию распределения для автотельных режимов горения в виде [2]

$$f(r_s, t) = A \Omega^{-1}(r_s) \exp[-a \int \Omega^{-1}(r_s) dr_s] \times \exp\left[a \int_0^t \omega(t) dt\right]. \quad (2)$$

Конкретный вид функций $\Omega(r_s)$ и $\omega(t)$ вытекает из рассмотрения кинетики горения единичной капли. Для определения скорости горения использован кондуктивный перенос теплоты на испарение и горение капли жидкого топлива, предложенный в работе [3].

Капли топлива впрыснуты в газ, содержащий окислитель, с температурой среды $T_{cp,0}$ выше температуры воспламенения, имеют сферическую форму, их массовая концентрация мала. В зоне горения (фронте пламени) весь окислитель расходуется и его концентрация равна нулю, так же как расходуются все пары топлива. Можно считать,

что зона горения очень мала и имеет радиус фронта пламени r_f [3].

В такой постановке задачи можно принять, что в пространстве между каплей и фронтом горения ($r_s < r < r_f$) находятся пары топлива, которые нагреваются от температуры поверхности капли T_s до температуры воспламенения, которая при горении быстро даёт температуру фронта пламени T_f , т. е. можно считать, что нагрев топлива происходит до температуры T_f . За фронтом пламени ($r > r_f$) происходит кондуктивная передача теплоты на нагрев среды, окружающей каплю, в которой находится окислитель и продукты горения, разбавленные инертным газом.

Из уравнений баланса энергии для областей ($r_s < r < r_f$) и ($r > r_f$) получается выражение для расчета массовой скорости горения, из которого получена скорость изменения радиуса капли. Её можно представить в виде произведения двух функций:

$$W(r_s, t) = \Omega(r_s) \times \omega(t), \quad \text{где } \Omega(r_s) = \frac{1}{r_s};$$
$$\omega(t) = -\left\{ \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \ln \left[1 + \frac{c_1}{L} (T_f - T_s) \right] \right\} +$$
$$+ \frac{\lambda_2}{\rho_1 c_2} \ln \left[1 + \frac{c_2 (T_f - T_{cp})}{Q_R - L - c_1 (T_f - T_s)} \right], \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности среды до и после фронта горения; c_1, c_2 – удельная теплоемкость среды до и после фронта горения; ρ_1 – плотность жидкого топлива; L – теплота испарения топлива; Q_R – теплота сгорания, r_s – радиус капли; T_f – температура фронта горения; T_s – температура поверхности капли.

В условиях интенсивного горения температура поверхности капли T_s близка к температуре кипения [3]. Температура T_f незначительно отличается от теоретической T_a и может быть определена через неё, т. е. её можно считать известной и постоянной, поскольку она изменяется в процессе

Краткие сообщения

горения слабо. При постоянных средних коэффициентах теплопроводности и удельной теплоемкости временная часть скорости горения $\omega(t)$ будет зависеть только от температуры среды T_{cp} .

Подстановка в (2) конкретного вида функции $\Omega(r_s)$ из (3) даёт

$$f(r_s, t) = A r_s \exp\left[-\frac{a}{2} r_s^2\right] \exp\left[a \int_0^t \omega(t) dt\right], \quad (4)$$

где a – константа разделения; A – константа интегрирования.

Соотношение (4) позволяет получить в дальнейшем усредненные характеристики полидисперсной системы: среднюю поверхность, объем, температуру среды и т. д. На основании (4) доля несгоревшего топлива $y(t)$, как отношение несгоревшей массы капель $M_k(t)$ к их начальной массе M_{k0} получается в виде

$$y(t) = \frac{M_k(t)}{M_{k0}} = \exp\left[a \int_0^t \omega(t) dt\right]. \quad (5)$$

Из уравнения (5) получим дифференциальное уравнение для расчёта доли несгоревшего к данному моменту времени топлива y

$$\frac{dy}{dt} = -a\omega(t)y. \quad (6)$$

Для его решения необходимо связать температурный напор $(T_f - T_{cp})$, входящий в $\omega(t)$, с долей несгоревшего топлива y , что получается из уравнения теплового баланса системы капель. Предполагается, что горение паров топлива идёт до образования двуокси углерода, поэтому в нагреваемой среде содержится кислород и азот воздуха совместно с продуктами горения. Теплота реакции горения расходуется на испарение капель топлива, подогрев паров топлива от температуры поверхности капель T_s до температуры фронта горения T_f с добавлением теплоты, поступающей от продуктов сгорания в окружающую среду из фронта пламени.

Уравнение теплового баланса принимает вид:

$$\left(\alpha M_k c_k + \alpha M_{N_2} c_{N_2} + M_{пр} c_{пр}\right) \frac{dT_{cp}}{dt} = -\frac{dM_T}{dt} [Q_R - L - c_1(T_f - T_s) - c_{пр}(T_f - T_{cp})], \quad (7)$$

где α – коэффициент избытка воздуха; $M_k, M_{N_2}, M_{пр}, M_T$ – массы кислорода, азота, продуктов сгорания и топлива соответственно; $c_k, c_{N_2}, c_{пр}$ – теплоемкости кислорода, азота и продуктов сгорания.

Вводя обозначения

$$\mu = \frac{M_{T0}}{M_{N_2}}, \quad c_{пр} = \frac{\alpha m_k}{m_{N_2}} c_k + \frac{m_{пр}}{m_T} c_{пр},$$

где $m_T, m_k, m_{пр}$ – молекулярные массы топлива, кислорода и продуктов горения, с учетом, что горят пары топлива, уравнение (7) для доли несгоревшего топлива y приводится к виду

$$\left[1 + \mu \frac{c_{пр}}{\alpha c_{N_2}} (1 - y)\right] dT_{cp} = \frac{\mu}{\alpha c_{N_2}} [\beta + c_{пр}(T_f - T_{cp})] dy, \quad (8)$$

где $\beta = Q_R - L - c_{п1}(T_f - T_s)$ и $c_{п1}$ – теплоемкость паров топлива в области радиуса r ($r_s < r < r_f$).

Формула (8) связывает искомую температуру T_{cp} с долей несгоревшего топлива y . Определив T_{cp} из (8) и упростив полученное выражение, на основании (3) и (6) получим дифференциальное уравнение для степени выгорания топлива:

$$\frac{dy}{dt} + a(a^* + d^*)y - ad^*y^2 = 0, \quad (9)$$

где введены обозначения:

$$a = \frac{2\Gamma^2(3/2)}{\bar{r}_{s0}^2}; \quad a^* = \frac{\lambda_1}{\rho_T c_1} \ln\left[1 + \frac{c_1}{L}(T_f - T_s)\right];$$

$$d^* = \frac{\lambda_2}{c_{N_2} \rho_T M_{N_2}^0}; \quad \bar{r}_{s0} - \text{средний начальный радиус частиц; } \Gamma(3/2) - \text{неполная гамма-функция.}$$

Уравнение (9) решается в конечном виде. На рис. 1 и 2 представлены выгорание паров топлива во времени (см. рис. 1) и степень выгорания по длине камеры сгорания в одномерном стационарном режиме.

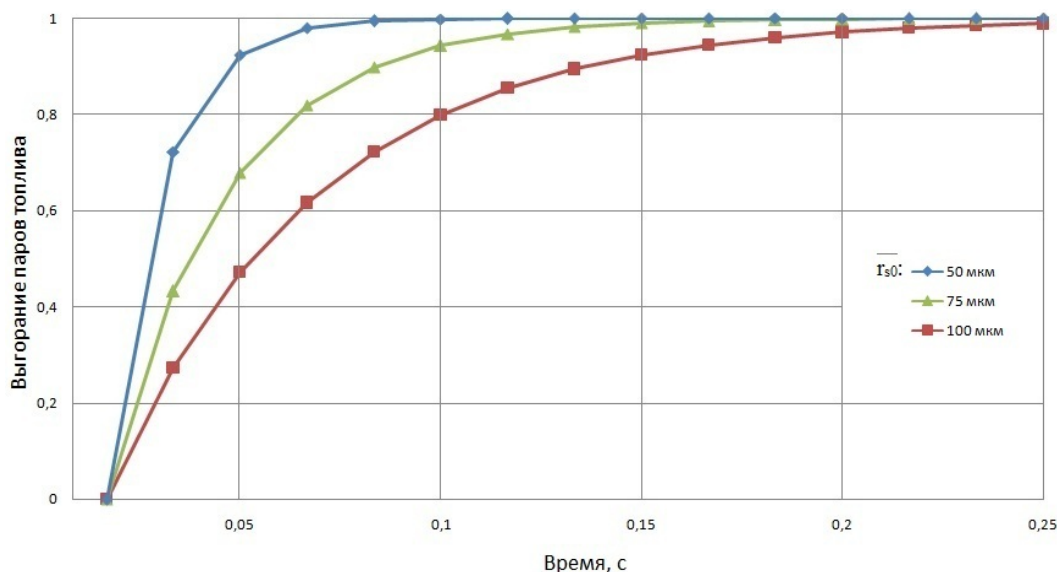


Рис. 1. Выгорание паров топлива во времени

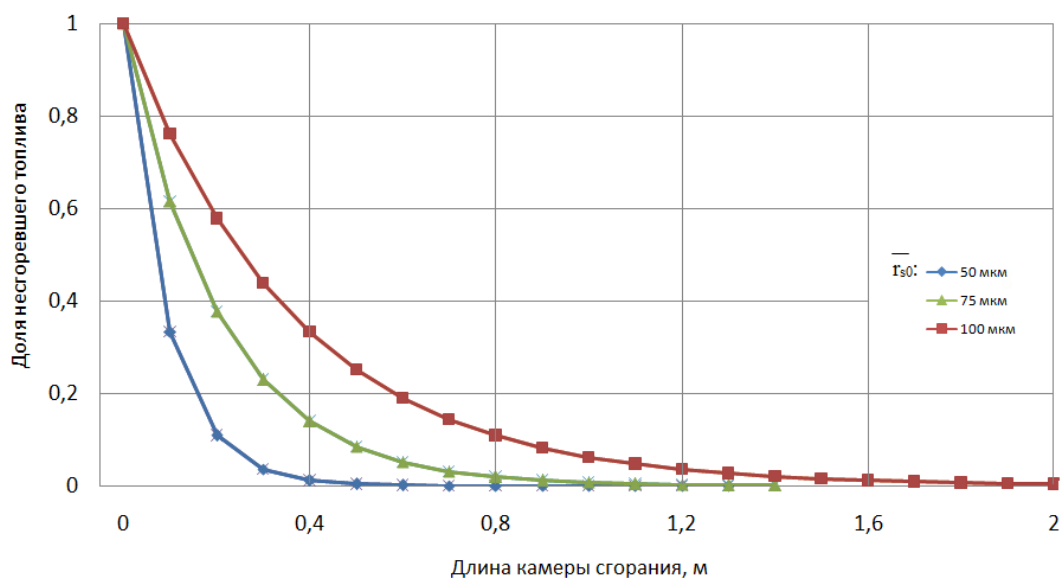


Рис. 2. Изменение доли несгоревшего топлива по длине камеры сгорания

нарном потоке при средней скорости движения капле 6 м/с (см. рис. 2). Увеличение скорости ведёт к увеличению длины факела. Зависимости рассчитаны для дизельного топлива со следующими характеристиками: $L = 189$ кДж/кг, $T_f = 1973$ К, $T_s = 426$ К, $\lambda_1 = 0,06$ Вт/м·к, $\lambda_2 = 0,08$ Вт/м·к.

Выводы

1. Для проведения расчётов необходимо экспериментально определить или задаться средним начальным размером частиц \bar{r}_{s0} .

2. Предлагаемая методика расчёта адекватно описывает выгорание полидисперсного топлива по длине камер сгорания и может быть рекомендована для предварительной оценки длины камер при сжигании различных жидких топлив.

3. Методику расчёта можно уточнить, учитывая внешний теплообмен к стенкам камеры сгорания.

Литература

1. Буевич, Ю.А. О кинетике массообмена полидисперсной системы частиц с окружающей средой / Ю.А.Буевич // ПМТФ. – 1966. – № 1. – С. 50–57.
2. Ясников, Г.П. О кинетике автотермического режима испарения полидисперсной системы капле / Г.П. Ясников // ИФЖ. – 1982. – Т. 42, № 2. – С. 243–250.
3. Хайкин, Б.И. Гетерогенное горение / Б.И. Хайкин // Теплообмен в процессах горения: сб. – Черногловка, 1980. – С. 58–79.

Голдобин Юрий Матвеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; prohor555@list.ru.

Кузнецов Прохор Сергеевич, магистрант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; prohor555@list.ru.

Поступила в редакцию 24 ноября 2016 г.

ABOUT ATOMIZED LIQUID FUEL BURNING

Yu.M. Goldobin, P.S. Kuznetsov, prohor555@list.ru

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation*

Based on the kinetic equation and the resulting burning rate of a single drop, current and initial function of particle radius distribution for the self-similar burning mode have been developed. The drop burning rate has been obtained for the case of conductive heat supply from the combustion front to the drop surface. The obtained equation is used to calculate the percentage of unburned fuel at the current moment and the polydisperse drop system combustion.

Keywords: combustion, liquid fuel, drops, polydispersity, distribution function, combustion rate, self-similar parameters.

References

1. Buevich Yu.A. [On Kinetics of Drop System Mass Exchange with Environment]. *PMTF*, 1966, no. 1, pp. 50–57. (in Russ.)
2. Yasnikov G.P. [On Kinetics of Self-similar Evaporation Mode of Drop Polydisperse System]. *IFZh*, 1982, vol. 42, no. 2, pp. 243–250. (in Russ.)
3. Khaykin B.I. [Heterogeneous Combustion]. *In Sc. P. Coll. Heat Exchange during Burning*, Chernogolovka, 1980, pp. 58–79. (in Russ.)

Received 24 November 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Голдобин, Ю.М. О сжигании распыленного жидкого топлива / Ю.М. Голдобин, П.С. Кузнецов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 91–94. DOI: 10.14529/power160412

FOR CITATION

Goldobin Yu.M., Kuznetsov P.S. About Atomized Liquid Fuel Burning. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 91–94. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160412
