



УДК 621.1.016 + 536.423.1

## О СЖИГАНИИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

## BURNING OF LIQUID FUEL IN FURNACE EQUIPMENT

**Поротников Николай Сергеевич**, магистрант каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: 7778840@mail.ru, Тел.: +7(961)777-88-40

**Голдобин Юрий Матвеевич**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: 7778840@mail.ru, Тел.: +7(912)606-55-80

**Nikolay I. Porotnikov**, Master student, Department «Heat power engineering and thermotechnics», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: 7778840@mail.ru. Тел.: +7(961)777-88-40

**Yuriy M. Goldobin**, Doctor Sc., Prof., Department «Heat power engineering and thermotechnics», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: 7778840@mail.ru. Тел.: +7(912)606-55-80

**Аннотация:** На основе кинетического уравнения и полученной скорости испарения одиночной капли определены текущая и начальная функции распределения частиц по радиусам для автомодельного режима испарения полидисперсной системы капель жидкого топлива. Получены автомодельные параметры системы, уравнение для расчета доли неиспарившегося, а также несгоревшего к текущему моменту времени топлива и изменения температуры среды в процессе испарения капель в инертной среде и их горения в окислительной среде.

**Abstract:** The current and initial particle radius distribution functions for the automodel regime of polydisperse liquid fuel droplet system were derived based on the kinetic equation and single droplet evaporation rate. The automodel system parameters and equation for modelling the fraction of currently unevaporated and unburned fuel and ambient temperature change during evaporation of the droplets were obtained.

**Ключевые слова:** испарение; горение; капли; жидкое топливо; полидисперсность; автомодельные параметры; функция распределения.

**Key words:** evaporation; combustion; drops; liquid fuel; polydispersity; automodel parameters; distribution function.

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы взаимодействия нагретого газа и системы испаряющихся частиц используются во многих установках – испарительное охлаждение, расширительная сушка, сжигание жидких углеводородных топлив и др.

При сжигании жидких топлив нагрев капли до температуры кипения и ее испарение может происходить за счет различного подвода теплоты к поверхности капли: излучением, конвективным теплообменом или кондуктивным подводом от фронта горения. Горят пары топлива, которые должны прогреться до температуры воспламенения. При впрыске топлива в какую-либо среду всегда имеем полидисперсную систему капель, поэтому задача расчета испарения и горения существенно усложняется. В этом случае описание процессов теплообмена необходимо проводить на основе функции

распределения частиц по радиусам с выделением автомодельного режима испарения или горения.

В работе решена задача горения в окислительной среде и испарения в инертной среде полидисперсной системы капель углеводородного топлива с целью определения времени горения и испарения, а также изменения температуры среды. Предполагается, что в объеме осуществляется идеальное перемешивание, система адиабатическая, капли сферические и испаряются независимо друг от друга, дробление отсутствует.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

При описании процесса испарения полидисперсность системы капель распыленного жидкого топлива учитывается путем введения функции распределения частиц по радиусам  $f(r_s, t)$ , которая определяется на основании

решения кинетического уравнения с учетом скорости испарения единичной капли [1].

Считаем, что испаряются капли, взвешенные в горячей среде и не имеющие скольжения относительно потока газов, из этого следует что  $Nu = 2$ . На основании этого решение кинетического уравнения может быть представлено в виде

$$w(r, t) = \frac{dr}{dt} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\lambda_r(T_{cp} - T_0)}{\rho_\kappa L} = \Omega(r) \cdot w(t) \quad (1)$$

где  $\Omega(r) = \frac{1}{r}$ ;  $r$  – радиус капли;  $t$  – время;  $L$  – теплота парообразования.

Здесь скорость испарения является произведением двух функций  $\Omega(r)$ , зависящей только от координаты капли, и  $w(t)$ , зависящей от температуры среды, то есть от времени испарения.

В таком случае функцию распределения частиц по радиусам  $f(r, t)$  можно представить в виде произведения двух функций, зависящих только от координаты и времени. Такое представление позволит решить кинетическое уравнение для функции распределения  $f(r, t)$

$$\frac{\partial f(r, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} [w(r, t) \cdot f(r, t)] = 0. \quad (2)$$

Подстановка уравнения (1) в (2) позволяет получить методом разделения переменных Фурье общее решение функции распределения  $f(r, t)$ , записанное в виде ряда, а через некоторое время  $t_0$  поведение функции распределения будет определяться только первым членом ряда, то есть наступит автомодельный режим испарения и функция распределения примет вид [1]

$$f(r, t) = A\Omega^{-1} \cdot \exp\left[-a \int \Omega^{-1} dr\right] \cdot \exp\left[a \int_{t_0}^t w(t) dt\right]. \quad (3)$$

где  $A$  и  $a$  – константы интегрирования и разделения, требующие определения.

При  $t = 0$  имеем начальную функцию распределения частиц по радиусам

$$f(r, 0) = f_0(r) = A\Omega^{-1} f(r) \cdot \exp\left[-a \int \Omega^{-1} dr\right] \quad (4)$$

Тогда текущая функция распределения может быть записана в виде

$$f(r, t) = f_0(r) \cdot \exp\left[a \int_{t_0}^t w(t) dt\right] \quad (5)$$

Зная функцию распределения  $f(r, t)$ , можно получить основные характеристики автомодельной полидисперсной системы, которые приводятся ниже. Доля неиспарившегося топлива

$$y(t) = \frac{M_\kappa}{M_{\kappa 0}} = \frac{N(t) \langle r^3 \rangle}{N_0 \bar{r}_0^3} = \frac{1}{\bar{r}_0^3} \int_0^\infty r^3 f(r, t) dr = \exp\left[a \int_0^t w(t) dt\right], \quad (6)$$

где  $M_\kappa$ ,  $M_{\kappa 0}$  – текущая и начальная массы капель топлива;  $N(t)$ ,  $N_0$  – текущее и начальное число капель в системе;  $\bar{r}_0$  – средний начальный радиус капли.

Текущее число капель, не испарившихся к моменту времени  $t$ , определяется как

$$N(t) = N_0 \int_0^\infty f(x, t) dx = N_0 y(t). \quad (7)$$

Подстановка в (3) и (4) конкретного вида функции  $\Omega(r)$  из (1) позволяет получить начальную

$$f_0(r) = A \cdot r \cdot \exp\left[-\frac{a}{2} r^2\right] \quad (8)$$

И конечную

$$f(r, t) = A \cdot r \cdot \exp\left[-\frac{a}{2} r^2\right] \cdot \exp\left[a \int_{t_0}^t w(t) dt\right] \quad (9)$$

функции распределения.

Из уравнения (6) получается дифференциальное уравнение для расчета доли неиспарившегося к заданному моменту времени топлива  $y$ .

$$\frac{dy}{dt} = -a \cdot \vartheta \cdot y \quad (10)$$

Для его решения необходимо подставить в него, текущую температуру среды  $\vartheta$ , выраженную из теплового баланса системы (11) и связанную с долей неиспарившегося топлива  $y$

Теплота идущая на испарение капель топлива отбирается от теплоты смеси инертного газа и уже образовавшихся паров топлива, прогретых от температуры насыщения до температуры инертной среды. Уравнение теплового баланса имеет вид

$$(M_g c_g + M_n c_n) \frac{d\vartheta}{dt} = L \frac{dM_k}{dt} \quad (11)$$

где  $M_g$ ,  $M_n$  - массы газа и пара;  $c_g$ ,  $c_n$  - теплоемкости газа и пара.

Из рассмотрения теплового баланса системы (11) и дифференциального уравнения (10) получается связь доли неиспарившегося топлива  $y(t)$  с избыточной температурой паров топлива (температурой среды)  $\vartheta(t)$ , что позволяет получить решение для  $y(t)$  в виде

$$y(t) = (\vartheta_0 - \vartheta^*) \cdot \{ \vartheta_0 \cdot \exp[a^* \cdot (\vartheta_0 - \vartheta^*) \cdot t] - \vartheta^* \}^{-1} \quad (12)$$

где  $\vartheta_0 = (T_{cp,0} - T_s)$ ;  $T_{cp,0}$  - начальная температура среды;  $T_s$  - температура кипения жидкого топлива;  $\vartheta^* = \frac{\mu \cdot L}{c_g}$ ;  $a^* = \frac{a \cdot \lambda_g}{\rho_{жс} \cdot L}$ ;  $a = \frac{2 \cdot \Gamma(3/2)}{r^2}$ ;  $\mu$  - начальная концентрация капель топлива;  $\Gamma$  - гамма функция;  $\lambda_g$  - коэффициент теплопроводности газа,  $\rho_{жс}$  - плотность жидкости.

Зависимость температуры среды от доли испарившегося топлива

$$\vartheta = \vartheta_0 - \frac{L_{эф}}{c_n} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\mu \cdot c_n}{c_g} (1 - y) \right] \quad (13)$$

Расчеты по полученному уравнение для средней температуры среды в процессе испарения капель показали, что температура среды падает незначительно, и всегда превышает температуру воспламенения паров топлива. При впрыске полидисперсной системы капель в окислительную среду пары топлива сразу воспламеняются. Теплота реакции горения расходуется на испарение капель топлива и подогрев паров топлива от температуры насыщения до температуры фронта горения, принимаемой равной средней температуре среды в процессе горения капель. Из-за подвода теплоты сгорания паров топлива баланс системы принимает вид.

$$(M_g c_g + M_n c_n) \frac{d\vartheta}{dt} = -\beta \frac{dM_k}{dt} \quad (14)$$

где  $\beta = Q - L$ ;  $Q$  - теплота сгорания топлива. По этой же причине уравнение доли несгоревшего топлива принимает вид

$$y(t) = (\vartheta_0 + \vartheta^*) \cdot \{ \vartheta_0 \cdot \exp[a^* \cdot (\vartheta_0 + \vartheta^*) \cdot t] + \vartheta^* \}^{-1} \quad (15)$$

где  $\vartheta^* = \frac{\mu \cdot \beta}{c_g}$ ;  $a^* = \frac{a \cdot \lambda_g}{\rho_{жс} \cdot \beta}$

Функция температуры среды также изменяется

$$\vartheta = \vartheta_0 + \frac{\beta}{c_n} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\mu \cdot c_n}{c_g} (1 - y) \right] \quad (16)$$

На рис. 1 представлены зависимости долей неиспарившегося и несгоревшего топлива от времени. Зависимости рассчитаны для керосина со следующими характеристиками:

$L = 220 \text{ кДж/кг}$ ,  $T_{cp} = 1473 \text{ К}$ ,  $T_s = 477 \text{ К}$ ,  $\rho_{жс} = 685 \text{ кг/м}^3$ ,  $Q = 42,9 \text{ МДж/кг}$ .

Точками показаны расчетное время выгорания и испарения капли солярового масла с начальным радиусом  $r_0 = 50 \text{ мкм}$  в газовых потоках с температурой  $T_{cp} = 1470 \text{ К}$  [2].

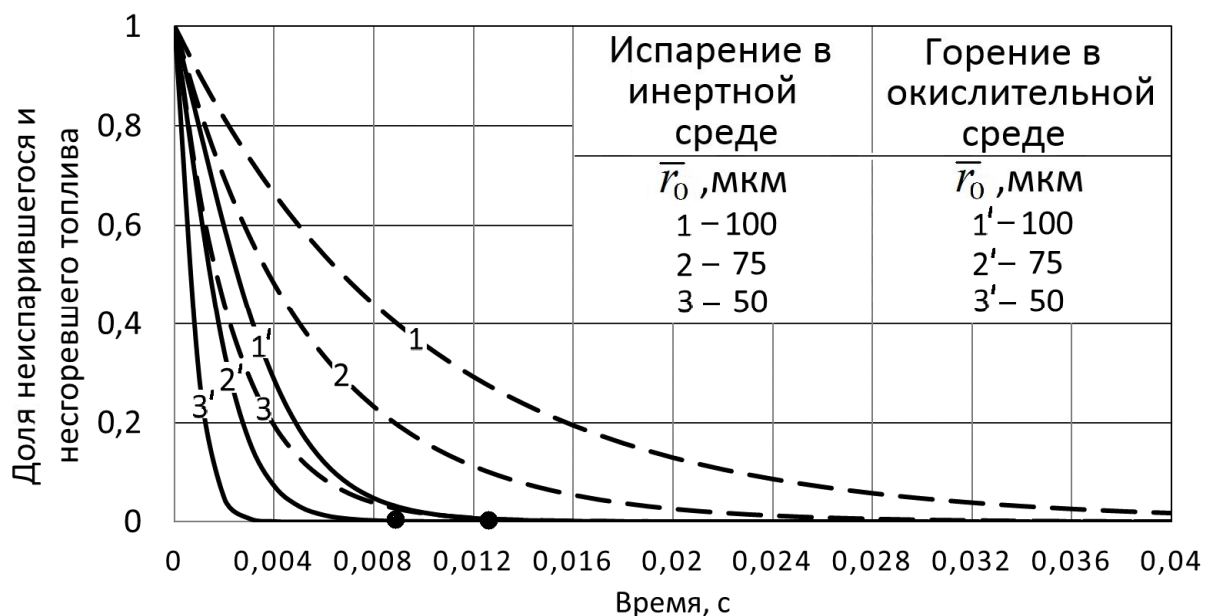


Рис. 1. Зависимость долей неиспарившегося и несгоревшего топлива  $y$  от времени  $t$

**ВЫВОДЫ**

1. Для проведения расчётов необходимо экспериментально определить или задаться средним начальным размером частиц.
2. Предлагаемая методика расчёта адекватно описывает эволюцию капель жидкого топлива в инертной среде и окислительной среде.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Г.П. Ясников. О кинетике автомодельного режима испарения полидисперсной системы капель. Минск, ИФЖ, том XLII, №2, 1982, 243-250с.
2. В.В. Померанцев. Основы практической теории горения. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., Ленинград, Энергоатомиздат, 1986, 299,300с.