

## Расчет температуры испаряющегося слоя капли

*О.С. Попкова, И.Ф. Хабибуллина*

*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

**Аннотация:** Для расчета траектории и координат движения капель, времени их полета необходимо определить параметры испарения капель и их концентрации в потоке. После прохождения форсунки капли движутся по различным траекториям и образуют факел топлива. Траектория капель факела рассчитывается по заданным начальным параметрам капель, а также параметрам форсунки и с учетом их влияния на движение капли. Целью данной работы является расчет температуры испаряющегося слоя капли, необходимой для расчета траектории и времени движения капли в зависимости от термодинамических параметров топлива. По полученным параметрам воздуха и паров топлива находится температура испаряющегося слоя капли, необходимая для расчета траектории, координат и времени движения капель топлива после форсунки.

**Ключевые слова:** топливо, центробежная форсунка, спектр распыливания, траектория, температура испарения.

Для расчета траектории и координат движения капель, времени их полета необходимо определить параметры испарения капель и их концентрации в потоке. После прохождения форсунки капли движутся по различным траекториям и образуют факел топлива. Траектория капель факела рассчитывается по заданным начальным параметрам капель, а также параметрам форсунки и с учетом их влияния на движение капли. Решение задачи на первом этапе состоит из определения параметров и расчёта траектории движения одной изолированной капли. Далее полученные результаты обобщаются и используются для определения траектории капель в факеле за форсункой. Однако для расчета параметров движения капель необходимо определить параметры испарения, в частности температуру испаряющегося слоя капли.

Существует множество методов определения физических и термодинамических свойств веществ. Некоторые основаны на эмпирических зависимостях, другие на методах групповых вкладов, но в основном эти методы применяются на конкретных веществах, сложны в использовании или для их использования нужны дополнительные данные. В работе [1]

---

предложен метод, позволяющий определить температуру паров с помощью энтальпии испарения для большого интервала температур, но по давлению насыщенных паров, определить которое не всегда возможно.

В статьях [2] рассматривалась задача оценочного расчета процесса теплообмена между продуктами сгорания в топке камеры сгорания и омывающим ее теплоносителем с целью увеличения эффективности работы. Все расчеты проводились с помощью программного комплекса Ansys Fluent. Исследованы разные варианты исполнения камеры сгорания при изменении ее внутреннего диаметра. Однако использование пакета программ приводит к построению новой геометрии с рассмотрением нового геометрического пространства, а также необходимо учесть, что расчет процессов испарения сопряжен с рядом трудностей, таких как большие ресурсы расчетного компьютера и подключение отдельных модулей. Возможности численного моделирования движения частиц с помощью программного комплекса Ansys Fluent рассмотрены в [3-5]. В работе [6] приведена имитация рабочего процесса поршневых двигателей на основе моделей химических реакций, турбулентности и теплообмена.

В поток, поступающий в камеру сгорания газотурбинных двигателей, топливо направляется в виде цилиндрической струи, где для улучшения условий горения распыляется форсунками. На некотором расстоянии от расположения форсунки, расчет параметров струи топлива можно проводить как для совокупности отдельных частиц [9]. Расчет процессов распыла для решения задачи можно разбить на несколько этапов: распыл струи топлива, дробление ее на капли, спектр распределения по размерам, испарение и траектория движения полученных капель [7].

В работе [7, 8] приведен расчет и построение зависимости спектра распыливания капель от различных диаметров капель. Расчеты проводились

---

для центробежной форсунки, расположенной против потока, рабочей жидкостью является керосин.

Целью данной работы является расчет температуры испаряющегося слоя капли, необходимой для расчета траектории и времени движения капли в зависимости от термодинамических параметров рабочей жидкости. Расположение форсунки, ее вид и параметры топлива аналогичны приведенным в работе [7,8].

Изучение движения капли в среде с сопротивлением базируется на уравнении движения центра масс твердого шара, которое записывается в виде:

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{d\vec{v}}{d\tau} = -c_{ш} \cdot F_{ш} \Psi(D) \cdot \rho_B \frac{u_0}{2} \cdot \vec{u}_0 - \frac{1}{s} \cdot \int_s^{s_1} \frac{1}{g} \cdot \frac{dG}{d\tau} \cdot \vec{v}_{\Pi} dS ; \quad (1)$$

где  $u_0$ - скорость обдува капли;  $\vec{v}$  - абсолютная скорость капли (ее центра масс);  $\vec{v}_{\Pi}$ - скорость оттока паров от капли.

Второй член правой части уравнения (1) представляет реактивную силу, возникающую из-за неравномерного оттока паров с различных участков поверхности капли. При проведении расчета можно пренебречь реактивными силами, появляющимися в потоке при неравномерном оттоке от капли.

Таким образом, принимаем, что:

$$\frac{1}{s} \cdot \int_s^{s_1} \frac{1}{g} \cdot \frac{dG}{d\tau} \cdot v_{\Pi} dS = 0;$$

$$\omega = \text{const}$$

при  $d\vec{v} = d\vec{u}_0$ . (2)

В уравнении (1) можно отбросить второй член в правой части и сопоставив его с уравнением (2) получим, что  $d\vec{u}_0$  параллельно  $\vec{u}_0$ . Следовательно, относительная скорость остаётся постоянной при движении капли по равномерному потоку.

Влияние деформации на изменение миделя и коэффициента сопротивления капли является существенным и учитывается в уравнении движения введением функции:

$$\psi(D) = \frac{F_D c_D}{F_{Ш} c_{Ш}}$$

где  $F_{Ш}$ ,  $c_{Ш}$  - мидель и коэффициент сопротивления шарообразной капли;  $F_D$ ,  $c_D$  - мидель и коэффициент сопротивления деформированной капли, за  $D$  принят критерий равновесной деформации капли или критерий Вебера, определяющийся по формуле:

$$D = \frac{\rho_V u^2 \cdot a}{\sigma},$$

где  $a$  и  $\sigma$  - диаметр и коэффициент поверхностного натяжения капли;  $\rho_V$  - плотность воздуха;  $u$  - скорость потока, и, таким образом, представляет собой отношение величин, пропорциональных аэродинамическому давлению потока на каплю и давлению поверхностного натяжения.

Зависимость функции  $\psi(D)$  определяется из экспериментальных данных после серии проведенных опытов [10], согласно которой данную функцию в области  $D$  (0..10) можно аппроксимировать выражением:

$$\psi(D) = e^{0,03D^{1,5}}.$$

Уравнение (1) решается с учетом уменьшения диаметра испаряющейся капли:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^3 = \left(\frac{u}{u_0}\right)^k \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1) и разделяя переменные, получим:

$$\frac{1}{\psi\left(\frac{u}{u_0}\right)} \cdot \frac{d\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\left(\frac{u}{u_0}\right)^{\frac{3-k}{2}}} = -\frac{2\sqrt{u_0}}{A} d\tau; \quad (4)$$

или

$$\frac{1}{\psi\left(\frac{u}{u_0}\right)} \cdot \frac{d\left(\frac{u}{u_0}\right)}{\left(\frac{u}{u_0}\right)^{\frac{1-k}{2}}} = -\frac{2}{A\sqrt{u_0}} dL; \quad (5)$$

где  $dL = u d\tau$ ,  $L$  – координата капли, движущейся вместе с потоком со скоростью  $u$ , и принято следующее обозначение  $A = \frac{0,19\gamma_T a_0^{2/3}}{\sqrt{g\mu_V \nu_V}}$ .

Функция  $\psi\left(\frac{u}{u_0}\right)$  в интервале изменения  $\frac{u}{u_0} \left[1.. \left(\frac{u}{u_0}\right)_{D=10}\right]$  для случая  $u_0$  будет равна  $\psi\left(\frac{u}{u_0}\right) = \psi_{\text{ср}} = 1,78$ , а в интервале  $\frac{u}{u_0} \left[\left(\frac{u}{u_0}\right)_{D=10} .. 0\right]$  при  $D_0 \leq 10$   $\psi\left(\frac{u}{u_0}\right) = e^{0,03D^{1,5}}$ .

Для определения координаты движения капли и времени ее движения от точки вылета до конца потока необходимо рассчитать температуру испаряющегося слоя капли. При решении задачи примем следующее допущение: так как рассматривается неравновесное испарение в процессе нагрева и испарения, увеличиваться будет температура только наружного

слоя капли. В первом приближении температура испарения  $t_p$  определяется по данным [10]. Тогда при заданных температуре и давлении воздуха  $t_B = 200^\circ\text{C}$ ,  $p_B = 10^5$  Па получим, что температура испарения  $t_p = 112^\circ\text{C}$ . Более точное определение температуры производится по формуле:

$$t'_p = t_B - \frac{l + c_T(t'_p - t_{\text{топл}})}{c_{p\text{см}}} \left[ \left( \frac{1 - c_\infty}{1 - c_0} \right)^\chi - 1 \right]; \quad (6)$$

где  $l$  - теплота испарения керосина, для равновесной температуры  $l = 318,6$  кДж/кг,  $c_T$  - теплоемкость топлива;  $c_{p\text{см}}$  - теплоемкость смеси паров топлива с воздухом;  $c_0$  - безразмерная концентрация паров на поверхности капли;  $c_\infty$  - безразмерная концентрация паров на удалении от капли;  $c_\infty = 0$ ,  $\chi$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

Под безразмерной концентрацией паров топлива понимают:

$$c = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot \frac{p_{\text{н.п.}}}{p_B}}{\rho_{\text{см}}}$$

Плотность смеси

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{н.п.}} \cdot \frac{p_{\text{н.п.}}}{p_B} + \rho_B \frac{p_B - p_{\text{н.п.}}}{p_B} \quad (7)$$

Для заданных температуры и давления  $\rho_B = \frac{p_B}{287,1 \cdot T_p} = 0,887 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Безразмерная концентрация на поверхности капли:

$$c_0 = \frac{\rho'_{\text{н.п.}} \cdot \frac{p_{\text{н.п.}}}{p_B}}{\rho_{\text{см}}} \quad (8)$$

где  $p_{\text{н.п.}} = 0,032$  МПа ;  $R_\mu = 8314,41 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$

$$\rho'_{\text{н.п.}} = \frac{p_{\text{н.п.}}}{\left(\frac{R_{\mu}}{\mu}\right)(t_p + 273,15)}. \quad (9)$$

Для формулы топлива  $C_{12}H_{24}$  [7]  $\mu_{\text{п.топл.}} = 12 \cdot 12 + 24 = 148 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{н.п.}} \cdot \frac{p_{\text{н.п.}}}{p_{\text{в}}} + \rho_{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{н.п.}}}{p_{\text{в}}}\right)$$

По формулам (9) и (7) получим  $\rho'_{\text{н.п.}} = 1,445748 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ ;  $\rho_{\text{см}} = 1,074132 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ .

Тогда по формуле (8)  $c_0 = 0,4352$ .

Значения теплоемкости смеси паров топлива с воздухом:

$$c_{p\text{см}} = c_{p\text{паратопл}} \cdot c_0 + c_{p\text{в}} \cdot (1 - c_0) \quad (10)$$

Термодинамические параметры при температуре  $t_p = 112^\circ\text{C}$  равны [7]:

$$c_{p\text{в}} = 1,009 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ} \cdot \text{К}}, c_{p\text{паратопл}} = 2,171 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ} \cdot \text{К}}, \rho_{\text{н.пара}} = 1,466 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

Теплоемкость смеси по выражению (10)  $c_{p\text{см}} = 1,5147 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ} \cdot \text{К}}$ .

Коэффициент теплопроводности

$$\chi = \frac{\rho_{\text{см}} \cdot D_{\text{п}} \cdot c_{p\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}}$$

где  $D_{\text{п}} = 8,434 \frac{\text{М}^2}{\text{с}}$  коэффициент диффузии паров топлива.

Теплопроводность смеси воздуха и топлива

$$\lambda_{\text{см}} = g_{\text{в}} \cdot \lambda_{\text{в}} + g_{\text{т}} \cdot \lambda_{\text{т}} - 0,72 \cdot (\lambda_{\text{т}} - \lambda_{\text{в}}) \cdot g_{\text{в}} \cdot g_{\text{т}}$$

Массовые доли компонентов и их теплопроводности в смеси керосин - воздух соответственно равны  $g_B = 0,93$ ,  $g_T = 0,07$ ,  $\lambda_B = 3,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  
 $\lambda_T = 0,099 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  [10].

Теплопроводность смеси при температуре испарения  $t_p = 112^\circ\text{C}$

$$\lambda_{\text{см}} = 0,0346 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad \chi = 0,396.$$

Подставив полученные значения в (6) получим  $t'_p = 103,5^\circ\text{C}$ .

По термодинамическим параметрам воздуха и паров топлива определили температуру испаряющегося слоя капли, необходимую для расчета траектории, координат и времени движения капель топлива после форсунки.

### Литература

1. Гончарова И.К., Пестов С.М. Расчет физических свойств органических соединений, представляющих потенциальную опасность для окружающей среды: температура кипения, энтальпия испарения, давление паров // Вестник МИТХТ. Серия: социально-гуманитарные науки и экология. 2015. №2. С. 62-67.
2. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Гумерова Г.Х. Оценочный расчет процесса теплообмена в камере сгорания при сжигании природного газа // Вестник технологического университета. 2018. №3. С. 99-103.
3. Морозов В.А., Морозова О.Н. Совершенствование эффективности и экологичности двигателей внутреннего сгорания // Инженерный вестник Дона. 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503.
4. Soloveva O.V., Solovev S.A., Khusainov R.R., Popkova O.S., Panenko D.O. Investigation of the influence of the open cell foam models geometry on





hydrodynamic calculation // Journal of physics: conference series. 2018. P. 012113.

5. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Intensification of gas flow purification from finely dispersed particles by means of rectangular separator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 012211.

6. Ладоша Е.Н. Имитация рабочего процесса поршневых двигателей на основе моделей химических реакций, турбулентности и теплообмена // Инженерный вестник Дона. 2008. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/78.

7. Попкова О.С., Гайфутдинов А.Н., Файзуллина А.И. Распределение капель в спектре распыливания центробежной форсунки // Вестник технологического университета. 2018. №4. С. 111-114.

8. Попкова О.С., Файзуллина А.И., Гильфанов К.Х. Определение параметров для эффективного горения малосернистого мазута// Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. 2017. №132. С. 1267-1276.

9. Ламзина И.В., Голдов А.В., Князев Я.И., Полозова И.А. Желтобрюхов В.Ф. Получение и использование альтернативного топлива из твердых бытовых отходов для цементной промышленности // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2331

10. Лукачев С.В., Диденко А.А., Зубрилин И.А., Мишенков С.Ю., Некрасова С.О. Математические модели и расчет распределения топлива в турбулентном потоке воздуха за центробежной форсункой. Самара, 2011. 115 с.

## References

1. Goncharova I.K., Pestov S.M. Vestnik MITXT. Seriya: social`no-gumanitarny`e nauki i e`kologiya. 2015. №2. pp. 62-67.



2. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Gumerova G.X. Vestnik texnologicheskogo universiteta. 2018. №3. pp. 99-103.
  3. Morozov V.A., Morozova O.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3503).
  4. Soloveva O.V., Solovev S.A., Khusainov R.R., Popkova O.S., Panenko D.O. Journal of physics: conference series. 2018. P. 012113.
  5. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 012211.
  6. Ladosha E.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2008. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/78](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/78).
  7. Popkova O.S., Gajfutdinov A.N., Fajzullina A.I. Vestnik texnologicheskogo universiteta. 2018. №4. pp. 111-114.
  8. Popkova O.S., Fajzullina A.I., Gil'fanov K.X. Politematicheskij setevoy e`lektronny`j nauchny`j zhurnal kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. №132. pp. 1267-1276.
  9. Lamzina I.V., Goldov A.V., Knyazev Ya.I., Polozova I.A. Zheltobryuxov V.F. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2331](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2331)
  10. Lukachev S.V., Didenko A.A., Zubrilin I.A., Mishenkov S.Yu., Nekrasova S.O. Matematicheskie modeli i raschet raspredeleniya topliva v turbulentnom potoke vozduxa za centrobezhoj forsunkoj. [Mathematical models and calculation of the distribution of fuel in a turbulent air stream behind a centrifugal nozzle]. Samara, 2011. P. 115.
-