

# О журнале

|  |  |
|--|--|
| <b>Инженерный вестник Дона</b>             |  |
| График выхода                              | 12 номеров в год   |
| Язык                                       | русский, английский  |
| Учредитель                                 | Ростовское региональное отделение Российской Инженерной Академии   |
| Издатель                                   | Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета  |
| Главный редактор                           | <a href="#">Панич Анатолий Евгеньевич</a> – д.т.н., профессор Южного федерального университета   |
| <b>Регистрационные данные</b>              |  |
| ISSN International Centre                  | ISSN 2073-8633<br>Key title: Inženernyj vestnik Dona (Rus)<br>Abbreviated key title: Inž. vestn. Dona  |
| Регистрация СМИ                            | Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций серия Эл № ФС77-75410 от 01 апреля 2019 г. Сетевое издание. Языки: русский, английский.   |
| Госрегистрация ФГУП ИТЦ «Информрегистр»    | 0421100096<br>(приказ министерства информационных технологий и связи РФ № 428 от 20 октября 2010 г.)   |
| РИНЦ                                       | Зарегистрирован в <a href="#">РИНЦ</a> (Российский индекс научного цитирования), основной библиографической базе данных научных публикаций российских ученых   |
| Список ВАК                                 | Входит в список ВАК « <a href="#">Перечень рецензируемых научных изданий</a> , не входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». |
| База данных Ульриха                        | Включен в базу данных Ульриха (Ulrich's Periodicals Directory), основной международный каталог сериальных изданий (Id: 747030).  |
| Академия Google                            | Сайт оптимизирован для взаимодействия журнала с поисковой системой научных публикаций Google Scholar (Академия Google)   |
| Полнотекстовые журналы в свободном доступе | <a href="#">в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU</a><br><a href="#">в научной электронной библиотеке КиберЛенинка</a>  |

## 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  $A = \frac{0,19\gamma_T a_0^{2/3}}{\sqrt{g\mu_B \nu_B}}$ .

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  $\text{C}_{12}\text{H}_{24}$  [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.
-