

УДК 662.613

UDC 662.613

05.00.00 Технические науки

Engineering science

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА
РАСПЫЛИВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ
ФОРСУНКИ**

**DETERMINATION OF PARAMETERS FOR
EFFICIENT COMBUSTION OF LOW-SULFUR
FUEL OIL**

Попкова Оксана Сергеевна
канд. техн. наук, доцент кафедры «ТОТ»,
РИНЦ SPIN-код: 4884-0466,
Author ID: 635243
oksiniy@mail.ru

Popkova Oksana Sergeevna
Cand.Tech.Sci., associate Professor
RSCI SPIN-code: 4884-0466,
Author ID: 635243
oksiniy@mail.ru

Хайрутдинов Марат Айдарович
магистрант, maratik-kazan@mail.ru

Khairutdinov Marat Aidarovich
graduate student, maratik-kazan@mail.ru

Файзуллина Азалия Ильгизовна
магистрант, faizullinamyau@gmail.com

Faizullina Azaliya Ilgizovna
graduate student, faizullinamyau@gmail.com

Гильфанов Камилъ Хабибович
д.т.н., профессор, зав. кафедры «АТПП»,
Author ID: 153151
kamil.gilfanov@yandex.ru
*Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
энергетический университет», Казань, Россия*

Gilfanov Kamil Habibovich
Dr.Sci.Tech., professor, head of the Department
«ATPP», Author ID: 153151
kamil.gilfanov@yandex.ru
*Federal state budgetary educational institution of
higher professional education «Kazan state power
engineering University», Kazan, Russia*

В статье приведен расчет кривой спектра
распыливания, позволяющей определить долю
капель определенного фракционного размера в
результате распыливания топлива форсункой при
данных теплофизических и геометрических
параметрах

The article presents the calculation of combustion of
liquid fuel, which is determined by the air
consumption for combustion of fuel, then the number
and the composition of combustion products – flue gas
resulting from burning fuel and the flue-gas
temperature

Ключевые слова: ТОПЛИВО, РАСЧЕТ
ФОРСУНОК, ФОРСУНКИ, СПЕКТР
РАСПЫЛИВАНИЯ

Keywords: FUEL, CALCULATION OF INJECTORS,
SPRAYERS, SPRAY SPECTRUM

Doi: 10.21515/1990-4665-134-030

Для тепловых двигателей, применяемых в транспорте, основными видами топлива являются бензин, керосин, дизельное топливо, сжиженный природный газ. Для равномерного и быстрого их испарения, образования горючей смеси с лучшими для горения теплофизическими характеристиками, для увеличения скорости горения, перед попаданием в зону горения топливо распыливается и с необходимыми концентрациями распределяется в зоне горения.

В газотурбинных двигателях в камеры сгорания топливо подводится под некоторым давлением p_T к форсункам, через которые оно непрерывно впрыскивается в быстрый поток воздуха, протекающий через двигатель и камеру сгорания, в котором потом и сгорает. Кислород атмосферного воздуха служит окислителем для горючего.

В газотурбинных двигателях применяются в основном два типа форсунок – пневмомеханические (пневогидравлические) и пневматические.

В пневмомеханических форсунках топливо подается, как правило, под сравнительно большим перепадом давления $\Delta p_{T=}^* = (10 \dots 40) \cdot 10^5$ Па и распыливается с помощью центробежного распылителя. Вокруг центробежного распылителя, соосно с ним, располагаются 1-3 кольцевых лопаточных или канальных воздушных завихрителя. С помощью них улучшается процесс распыливания и обеспечивается нужное поле распределения топлива. То есть, в пневмомеханических форсунках топливо распыливается в основном за счет энергии самого подаваемого топлива [3,4,5].

В пневматических форсунках наоборот, топливо подается под сравнительно низким перепадом давления $\Delta p_{T=}^* = (3 \dots 5) \cdot 10^5$ Па и выдавливается, как правило, на пленкообразующую поверхность. Кольцевая топливная пленка с наружной и внутренней стороны интенсивно обдувается двумя потоками воздуха, проходящими с закруткой после воздушных завихрителей. Если в такой форсунке имеется третий ярус завихрителей, то он, как правило, служит для лучшего перемешивания образующейся топливно-воздушной смеси и ее точного распределения по входу в зону горения. Таким образом, в пневматических форсунках распыливание топлива осуществляется, в основном, за счет энергии потока воздуха [4,5].

Пневмомеханические и пневматические форсунки устанавливаются в основные камеры сгорания, которые имеются на каждом двигателе и располагаются между компрессором и турбиной. Качество работы форсунок оценивается по форме и дальнобойности струй впрыскиваемого ими топлива, по обеспечению требуемого закона распределения массы топлива в пространстве и величине неравномерности этого распределения, а также по величине диаметров образующихся капель и их относительному количеству в факеле распыла.

При выполнении расчетов процессов смесеобразования и горения типичными являются задачи, в которых для начального сечения зоны горения в числе исходных данных по факелу распыла задаются:

- общий расход топлива;
- начальные диаметры капель, число их фракций по диаметрам, минимальный и максимальный диаметры капель в факеле распыла, количество капель в каждой выделенной размерной фракции (распределение капель по диаметрам);
- значения составляющих скоростей капель для каждой размерной фракции и распределение капель по скоростям;
- значения составляющих скоростей движения воздуха и их распределение в сечении, например, на входе в диффузор камеры сгорания или на входе в каналы воздушного завихрителя.

Далее производится расчет рабочего процесса в камере сгорания, в том числе траекторий движения испаряющихся капель. В результате расчета становятся известными траектории движения капель для каждой их размерной фракции, поля распределения испаренного топлива и массы жидкого топлива, которая содержится в недоиспарившихся каплях. Результаты расчетов должны быть достаточно детальными с целью их последующего сопоставления с экспериментальными данными и данными других расчетных методов.

Целью работы является расчет кривой спектра распыливания, позволяющей определить долю капель определенного фракционного размера в результате распыливания топлива форсункой при данных теплофизических и геометрических параметрах для центробежной форсунки, находящейся в прямолинейной трубе с равномерным потоком воздуха.

В работе рассматривается процесс распыливания топлива типа авиационный керосин ТС-1 центробежной форсункой против потока. Топливо в виде цилиндрической струи или пелены поступает в поток, проходящий через камеру. Обычно на малом расстоянии от места впрыска (0,5-10 мм) распад струи завершается. С этого момента капли начинают двигаться по определенным траекториям как система отдельных материальных частиц. Одновременно с увлечением капель потоком они нагреваются теплом окружающей среды и испаряются. При заданном расходе G_T рассматривается ряд номинальных фракционных размеров a_i капель -20,40,60, 80, 100 и 120мкм. Капли с данными принятыми размерами представляются как система движущихся частиц, которая определяет профиль концентраций или удельных потоков жидкого топлива, а пар, смешавшийся с воздухом, создает распределение концентраций газообразной горючей смеси. Смесеобразование представляет собой сложный комплекс отдельных элементарных процессов, взаимодействующих друг с другом.

Приводимая методика расчета основывается на рассмотрении процесса распыла топлива форсунками в виде следующих «элементарных процессов»:распад струи жидкости, дробление на капли; движение капель по траекториям в условиях топливного факела; рассеивание капель относительно их упорядоченных траекторий движения; испарение капель; унос паров от капель потоком турбулентного перемешивания их по сечению потока [2].

Исходные данные для расчета: топливо – керосин ТС-1, расположение форсунки – против потока, температура потока $T_B = 473.15$ К, скорость потока $w = 86$ м/с, давление в потоке $p_B = 9.80665 \cdot 10^4$ Па, интенсивность турбулентности $\varepsilon_T = 0.05$, масштаб турбулентности $l_T = 0.018D'$, давление подачи топлива $\Delta p_T = 19.6133 \cdot 10^4$ Па, расход топлива $G_T = 8.73 \cdot 10^{-3}$ кг/с, температура топлива $T_{\text{топл}} = 318.15$ К, плотность топлива $\rho_T = 761.6$ кг/м³, поверхностное натяжение топлива $\sigma_T = 25.3 \cdot 10^{-3}$, плотность воздуха при $T_B = 473.15$ К, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_B = 0.12$, вязкость воздуха при $T_B = 473.15$ К, $\mu_B = 1.79 \cdot 10^{-6}$ Па/м², диаметр соплового отверстия форсунки $d_c = 1.2 \cdot 10^{-3}$ м, угол конуса распыливания форсунки $\alpha = 41^\circ$, угол наклона вектора относительной скорости к оси $\gamma = 172^\circ$, длина участка движения капель $x = 365 \cdot 10^{-3}$ м, начальный диаметр капель $a_{01} = 20 \cdot 10^{-6}$ м, $a_{02} = 40 \cdot 10^{-6}$ м, $a_{03} = 60 \cdot 10^{-6}$ м, $a_{04} = 80 \cdot 10^{-6}$ м, $a_{05} = 80 \cdot 10^{-6}$ м, $a_{06} = 120 \cdot 10^{-6}$ м.

Система основных размерных параметров, характеризующих процесс, включает восемь величин.

- Величина a – определенный средний диаметр, например медианный диаметр спектра a_M , соответствующий ординате 0.5 на статистической кривой суммарных относительных объемов.

- a_{max} -диаметр, соответствующий ординате 0.95 на кривой суммарных относительных объемов.

- ε - толщина пелены жидкости, измеренная по нормали к средней скорости жидкости V . Чем меньше ε данной форсунки, тем мельче образующиеся капли.

- μ - коэффициент расхода форсунки, учитывающий неполноту заполнения струей соплового сечения, поворот струи на угол распыливания, потери напора и профиль скоростей жидкости.

- $\bar{\alpha}$ - константа размера, чем больше ее значение, тем крупнее капли.
- n -константа распределения, чем больше ее значение, тем более равномерно капли распределяются по размерам. Данные константы изменяются в зависимости от форсунки и режима ее работы, то есть зависят от всех размерных параметров, определяющих процесс распыливания жидкости.
- u -начальная скорость истечения жидкости относительно системы координат, связанной с окружающим потоком.

По теоретическим и экспериментальным исследованиям[2] процесс распыливания определяется скоростью жидкости относительно воздуха в месте распада струи. Для случая распыливания в неподвижный воздух эта скорость совпадает со скоростью истечения. Для форсунки, установленной против потока, она равна геометрической разности векторов скорости истечения и скорости набегающего потока: $\vec{u}_0 = -(\vec{w} - \vec{v})$, \vec{u}_0 -скорость обдува капли.

При исследовании распыливания и смесеобразования широко используется эмпирическое уравнение для изображения кривой объемного (или массового спектра распыливания в координатах y, a, V_s (формулы Розина-Раммлера).

$$y = \frac{n}{\bar{\alpha}^n} \alpha^{n-1} e^{-\left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}}\right)^n}$$

$$V_s = 1 - e^{-\left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}}\right)^n}$$

где $\frac{\Delta V}{\Delta a_i V_0}$ - относительный объем капель, т.е. объем всех капель ΔV_i , приходящихся на данный (малый) интервал спектра размеров ($a_i; a_i + \Delta a_i$), отнесенный к объему всех капель V_0 на длине интервала Δa_i ; $\bar{\alpha}, n$ - константы размера и распределения; V_s^i - суммарный относительный объем,

то есть. сумма относительных объемов всех капель, с диаметром, меньшим или равным данной капле $a_i[1]$.

Расчет спектра распыливания начинаем с определения параметров топливоподачи, коэффициента расхода форсунки, толщины жидкой пелены и скорости истечения жидкости α_i .

Коэффициент расхода через форсунку:

$$\mu = \frac{G_T}{\pi \cdot r^2 \sqrt{2 \cdot \Delta p_T \cdot \rho_B}}; \mu = 0.446589$$

Толщина пелены жидкости, м:

$$\varepsilon = \frac{1 - \sqrt{1 - \mu \cdot \cos(\alpha)}}{\cos(\alpha)} \cdot r; \varepsilon = 1.477 \cdot 10^{-4}$$

Скорость истечения, м/с:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_T}{\rho_B}}$$

Зная величины v , α , w , находим значение начальной относительной скорости u_0 . Для этого удобнее всего использовать графический метод треугольника скоростей

$$u_0 = \sqrt{u_{0x}^2 + u_{0y}^2}, \bar{u}_0 = -(\vec{v} - \vec{w}),$$

$$v_x = v \cdot \cos \alpha = 22 \cdot \cos 41^\circ = 16.65 \text{ м/с}$$

$$v_x = v \cdot \cos(90 - \alpha) = 22 \cdot \cos 49^\circ = 14.47 \text{ м/с}$$

$$v_{0x} = -v_x + w_x = -(-16.65) + 86 = 102.65 \text{ м/с}$$

$$v_{0y} = -v_y + w_y = -(-14.47) + 0 = -14.47 \text{ м/с}$$

$$u_0 = 103 \text{ м/с}$$

Располагая всеми необходимыми размерными параметрами, вычисляем безразмерные критерии процесса распыливания

$$\Pi_1 = \frac{\varepsilon \cdot \rho_B \cdot u_0}{\mu_0} \Pi_1 = 987;$$

$$\Pi_2 = \frac{\varepsilon \cdot \rho_B \cdot \sigma_T}{(\mu_B)^2} \Pi_2 = 13282.$$

Медианный, максимальный диаметр капель и характеристики спектра распыливания определяются по функциям, аппроксимирующим кривые зависимостей $\frac{a_M}{\varepsilon} = (\Pi_1)$, $\frac{a_{\max}}{\varepsilon} = (\Pi_2)$.

Медианный диаметр капель:

$$a_M = (135 + 3.67 \cdot 10^{-3} \cdot \Pi_2) \cdot (\Pi_1)^{-0.9} \cdot \varepsilon;$$

$a_M = 52.9$ мкм, принимаем $a_M = 53$ мкм.

Максимальный диаметр капель:

$$a_{\max} = (67 + 3.44 \cdot 10^{-3} \cdot \Pi_2) \cdot (\Pi_1)^{-0.7} \cdot \varepsilon;$$

$a_{\max} = 128.9$ мкм, принимаем $a_{\max} = 130$ мкм.

Исходя из принятых значений $a_{\max} = 130$ мкм, а также $a_{\min} = 10$ мкм, удобным способом разбивки капель на группы принимается деление на $i = b$ групп со средними диаметрами a_{0i} , ширина размерного диапазона - $\Delta a_{0i} = 20$ мкм[1].

Величина отношения $\frac{a_{\max}}{a_M} \approx 2.4$ является характерной для большинства форсунок. Крупность распыливания, полученная в расчете, может быть признана с точки зрения качества смесеобразования в потоке воздуха (испаряемость и т.д.) вполне удовлетворительной.

Константа распределения:

$$n = \frac{0.636}{\log \left(\frac{1 + 5.4 \cdot 10^{-5} \cdot \Pi_2}{2 + 5.4 \cdot 10^{-5} \cdot \Pi_2} \cdot \Pi_1^{0.184} \right)} = 1.8.$$

Кривая спектра распыливания $V_s = 1 - e^{-\left(\frac{a_0}{a}\right)^n}$

Константа размера

$$\bar{a} = \frac{a_M}{\ln(2)^{\frac{1}{n}}} = 64.8 \text{ мкм.}$$

Результаты расчета спектра распыливания представлены на рис. 1.

Использование уравнения вида $V_s = 1 - e^{-\left(\frac{a_0}{\bar{a}}\right)^n}$ является первым приближением в решении сложной задачи о связи между распределением капель в спектрах распыливания и режимными параметрами, характеризующими распад струи жидкости. Результаты расчетов кривой спектра распыливания приведены на рис.1

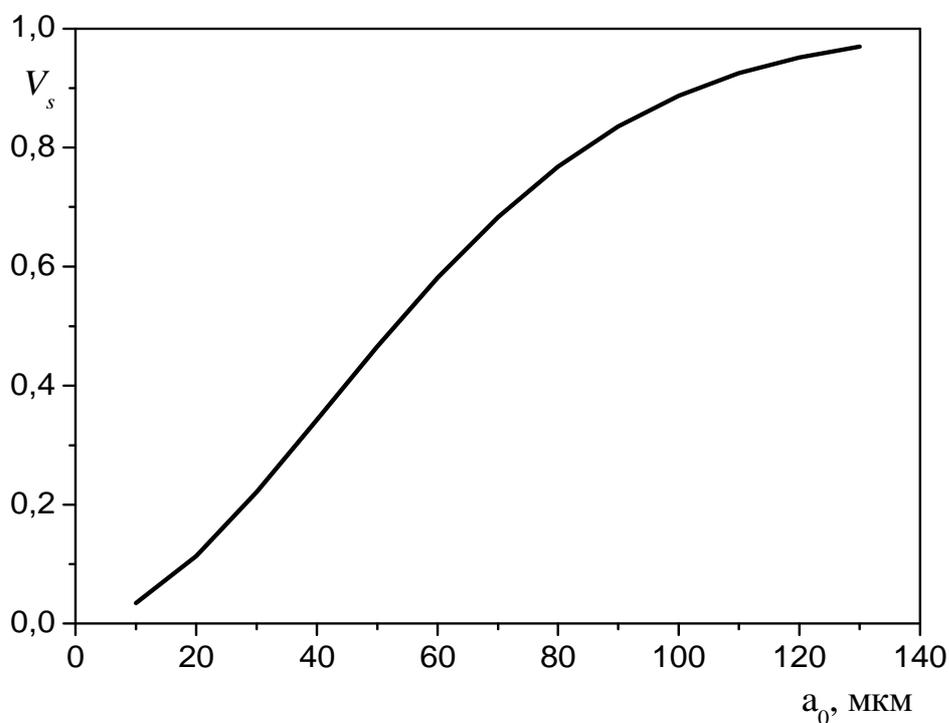


Рис. 1. Спектр распыливания

По результатам расчетов, можно определить долю капель определенного фракционного размера в результате распыливания топлива форсункой. Внешний вид кривой определяется тем, что количество капель с диаметрами $a_{0i} < a_{\min}$ и $a_{0i} > a_{\max}$ составляет:

$$V_{s \min} = 1 - e^{-\left(\frac{a_{\min}}{\bar{a}}\right)^n} = 0.034,$$

то есть приблизительно 3% от общего количества капель, поэтому ширина размерного диапазона капель ограничивается $a_{01} = 20\text{мкм} - a_{06} = 120\text{мкм}$ без значительной потери точности вычислений.

Литература

1. Кузнецов, Г. В., Саломатов, В. В., Сыродой, С. В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива // Физика горения и взрыва. - 2015.- № 4. 11-19 – с.
2. 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. Учебное пособие. -2011.115 - с.
3. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкостями форсунками – Книга. – 1962. 266 – с.
4. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – Книга. – 1986. 566 – с.

References

1. Kuznecov, G. V., Salomatov, V. V., Syrodoj, S. V. Chislennoe modelirovanie zazhiganiya chastic vodougol'nogo topliva // Fizika gorenija i vzryva. - 2015.- № 4. 11-19 – s.
2. Lukachev S.V., Didenko A.A., Zubrilin I.A, Mishenkov S.Ju., Nekrasova S.O. Matematicheskie modeli i raschet raspredelenija topliva v turbulentnom potoke vozduha za centrobezhnoj forsunkoj. Uchebnoeposobie. -2011.115 - s.
3. Vitman L.A., Kacnel'son B.D., Paleev I.I. Raspylivanie zhidkostjami forsunkami – Kniga. – 1962. 266 – s.
4. Lefevr A. Processy v kamerah sgoranija GTD. – Kniga. – 1986. 566 – s.