

РАЗМЕР КАПЕЛЬ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СВОЙСТВ ДИСПЕРГИРУЕМОЙ ЖИДКОСТИ

М. К. БАРАНЕВ, В. И. ТЕНЯКОВ

(Москва)

Анализируются эмпирические зависимости, предложенные для определения среднего диаметра капель; сделана попытка привести их к единой системе параметров, чтобы установить, в какой мере та или другая формула отражает параметры, влияющие на процесс дробления, т. е. геометрию форсунки и свойства жидкости, а также скорости истечения. На основе теории локально-изотропной турбулентности построена расчетная формула, постоянный коэффициент которой подобран из условия наилучшего совпадения с экспериментами разных авторов. Установлены пределы изменения параметров форсунки и скорости истечения маловязкой жидкости, в которых обеспечивается совпадение результатов расчета среднего диаметра капель по полученной формуле и соответствующей экспериментальной зависимости.

Показано, что данная формула может быть использована при расчетах диспергирования жидкостей в широком диапазоне изменения их физико-химических свойств.

1. Анализ эмпирических и критериальных зависимостей. Рассмотрим наиболее широко используемые зависимости по определению среднего диаметра капель, получаемых при дроблении жидкости центробежными форсунками.

А. Г. Блох и Е. С. Кичкина [1], исследовавшие спектры распыла центробежных форсунок оптическим методом, предлагают следующую критериальную формулу:

$$\frac{d}{D} = \frac{47.8}{A^{0.6} \Pi_1^{0.1} R^{0.7}} \quad \left(\Pi_1 = \frac{\eta^2}{\rho \sigma D}, R = \frac{\rho u_e D}{\eta} \right) \quad (1.1)$$

Здесь критерий Π_1 учитывает свойства диспергируемой жидкости; σ , ρ , η — поверхностное натяжение, плотность и динамическая вязкость; D — диаметр выходного сопла форсунки; R — критерий Рейнольдса для условий истечения из сопла форсунки; u_e — эквивалентная скорость истечения; A — геометрическая характеристика форсунки; d — средневесовой диаметр капель.

Диапазон исследованных параметров форсунки: $D = 0.38 \div 1.58$ мм, $A = 1.72 \div 9.51$; использованные жидкости: вода, растворы глицерина и глицеринового мыла в воде, газойль и керосин.

Найт [2] скорректировал большое количество данных нескольких работ, полученных на форсунках с углом распыливания 85° при давлениях подачи керосина до 14 атм, и вывел следующую зависимость:

$$d = 77.5 \quad p^{-0.458} \quad G^{0.209} \quad v^{0.215} \quad (1.2)$$

Здесь p — перепад давления на форсунке, G — весовой расход, v — кинематическая вязкость, d — средний диаметр капель по Заутеру.

Н. Н. Струлевич [3], распыливая парафин и пользуясь методом замораживания капель, пришел к следующей формуле:

$$\frac{\delta}{d} = 0.11 R^{0.34} \quad \left(R = \frac{u \delta \rho}{\eta} \right) \quad (1.3)$$

Здесь d — медианный диаметр капель, R — критерий Рейнольдса для пелены, u — скорость истечения жидкости, δ — толщина пелены

$$\delta = \frac{D}{2 \cos^{1/2} \alpha} (1 - \sqrt{1 - \mu \cos^{1/2} \alpha})$$

Здесь α — угол факела распыливания, μ — коэффициент расхода.

Рэдклиф [4], суммируя опытные данные ряда исследователей, рекомендует для вычисления среднего диаметра капель по Заутеру пользоваться зависимостью

$$d = \frac{9.58 v^{0.2} \sigma^{0.6} G^{0.25}}{p^{0.4}} \quad (1.4)$$

Степень влияния вязкости ($v^{0.2}$) на процесс дробления в формуле (1.4) взята по данным опытов Нидхема и Джойса, которые распыливали парафин, имитирующий при соответствующей температуре керосин. Влияние поверхностного натяжения ($\sigma^{0.6}$) рассмотрено по опытным данным Турнера и Маультона, которые показали, что размер капель для случая истечения струй из сопел двух различных типов пропорционален поверхностному натяжению в степени 0.594 и 0.713.

Лонгвелл [2] предлагает для вычисления медианного диаметра капель следующую формулу:

$$\frac{d}{D} = \frac{0.135e^{0.7v}}{p^{0.37} \sin^{1/2}\alpha} \quad (1.5)$$

Здесь перепад давлений p изменялся в опытах от 3.5 до 21 атм; кинематическая вязкость ν — от 0.08 до 0.8 см²/сек; диаметр выходного сопла D изменялся от 0.8 до 2.8 мм, геометрическая характеристика A — от 0.5 до 6.

М. М. Бондарюк и С. М. Ильяшенко [3], на основе обработки экспериментов Н. Н. Струлевича, предлагают следующую двучленную зависимость:

$$\frac{d}{D} = \frac{(\sigma/\sigma_0)^{0.77} + (\nu/\nu_0)^{0.44}}{41.5M^{0.817}} \left(\frac{760}{p_a}\right)^{1/3} \mu \quad (1.6)$$

Здесь $\sigma_0 = 24$ дин/см и $\nu_0 = 2$ сст — параметры эталонной жидкости (керосин при $t = 20^\circ\text{C}$); M — число Маха при движении капель относительно воздуха; p_a — давление окружающего воздуха в мм рт. ст.; d — медианный диаметр капель.

Для сравнительного анализа перечисленных формул проведем некоторые видоизменения. В качестве параметров, влияющих на процесс дробления жидкости, принимаем следующие величины: 1) скорость истечения u ; 2) физико-химические свойства жидкости: σ — поверхностное натяжение, η — динамическая вязкость, ρ — плотность (массовая); 3) конструктивные параметры форсунки: D — диаметр выходного сопла, λ — параметр пелены.

Тогда формулы (1.1) — (1.4) приводятся к виду

$$d = kD^n \frac{\lambda\sigma^t \eta^q}{u^m \rho^s} \quad (1.7)$$

Формулы (1.5) и (1.6) в принятых параметрах будут иметь соответственно следующий вид:

$$d = kD^n \frac{\lambda\sigma^t}{u^m \rho^s} e^{0.7\eta/\rho} \quad (1.8)$$

$$d = kD^n \frac{\lambda}{u^m} \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{0.77} + \left(\frac{\eta\rho_0}{\eta_0\rho}\right)^{0.44} \right] \quad (1.9)$$

Коэффициент пропорциональности k — постоянный для каждой исходной формулы (1.1) — (1.6).

Таблица 1

Первоначальные формулы	Показатели в видоизмененных формулах (1.7) — (1.9)				
	n	m	t	q	s
Блох (1.1)	0.4	0.7	0.1	0.5	0.6
Найт (1.2)	0.418	0.707	0	0.215	0.464
Струлевич (1.3)	0.66	0.34	0	0.34	0.34
Рэдклиф (1.4)	0.5	0.55	0.6	0.2	0.35
Лонгвелл (1.5)	1	0.74	0	—	0.37
Ильяшенко (1.6)	1	0.817	0.77	0.44	0.44

Значения показателей степени при соответствующих параметрах в формулах (1.7) — (1.9) представлены в табл. 1.

Сопоставление этих данных показывает, что степень влияния отдельных параметров на величину среднего диаметра капель различна в разных исследованиях.

При увеличении скорости истечения жидкости диаметр капель уменьшается, показатель степени m находится в пределах 0.34 ÷ 0.817, в большинстве работ он близок к 0.7.

Физико-химические свойства жидкости сказываются следующим образом:

а) увеличение поверхностного натяжения приводит к укрупнению капель; влияние этого фактора в ряде исследований (формулы (1.2), (1.3), (1.5)) вообще не учитывалось в связи с его малым изменением для различных сортов исследуемых жидких топлив;

б) увеличение вязкости существенно ухудшает распыливание; степень влияния различна ($q = 0.2 \div 0.5$) в зависимости от области изменения вязкости.

Интересно сравнить, как в эмпирических формулах отражается взаимное влияние на распыл сил вязкости и поверхностного натяжения. Так, формула (1.4), обобщившая результаты экспериментов с жидкостями малой вязкости (керосин, бензин, спирт) приоритет отдает силам поверхностного натяжения ($t = 0.6$ и $q = 0.2$), в то время как формула (1.1), полученная на опытах с более вязкими жидкостями (растворы глицирина в воде, газойль), предпочтение отдает силам вязкости ($t = 0.1$ и $q = 0.5$).

Диаметр выходного сопла форсунки, который характеризует масштаб течения в целом, существенно влияет на процесс дробления капель, его увеличение приводит к укрупнению капель; показатель степени n различен у разных исследователей ($0.4 \div 1.0$).

Параметр пелены λ однозначно характеризует качество форсунки как распылителя. В эмпирических формулах он выражается по разному: через коэффициент расхода μ , угол распыливания α , относительную толщину пелены $\delta / 0.5D$, произведение геометрической характеристики A на коэффициент расхода. Однако все эти величины являются функциями только геометрической характеристики A , т. е. λ есть функция A . Приводим выражения параметра пелены λ в исходных формулах

$$\lambda = A^{-0.6} \mu^{-0.7} \quad (1.1) \quad \mu^{0.209} \quad (1.2) \quad (\delta / 0.5D)^{0.66} \quad (1.3) \quad \mu^{0.25} \quad (1.4) \quad -\text{csec } \alpha / 2 \alpha \quad (1.5) \quad \mu \quad (1.6)$$

С увеличением геометрической характеристики A параметр пелены уменьшается, что приводит к более мелкому дроблению.

2. Расчетно-теоретическая формула и ее сравнение с экспериментальными зависимостями. Основное ограничение указанных экспериментальных и критериальных зависимостей (1.1) — (1.5), не позволяющее распространять их на результаты распыливания вязких жидкостей, состоит в том, что зависимость среднего диаметра капель от свойств жидкости представлена в виде произведения коэффициентов вязкости и поверхностного натяжения. Однако естественно, что для жидкостей практически не обладающих вязкостью, капли не будут предельно малыми (в этом случае на процесс распыливания оказывают влияние силы поверхностного натяжения); для жидкостей большой вязкости капли также не будут предельно малыми за счет влияния сил вязкости. В действительности процесс распыливания зависит от одновременного действия этих сил.

Для вывода расчетно-теоретической зависимости воспользуемся теорией локально-изотропной турбулентности Колмогорова — Обухова. Согласно этой теории турбулентность потока рассматривается как результат наложения вихрей (возмущений) различных размеров. Наиболее крупные вихри возникают вследствие неустойчивости движения основного потока. Движение этих крупных вихрей также неустойчиво и порождает образование более мелких вихрей до тех пор, пока вихри не уменьшаются настолько, что движение в них становится ламинарным ($R \approx 1$). Только для этих мельчайших вихрей имеет значение вязкость жидкости, именно в них происходит превращение энергии движения в тепло, передача энергии потока молекулам движущейся среды (диссипация энергии).

При расчете процесса дробления жидкости на капли принимаем, что он продолжается до тех пор, пока кинетическая энергия (работа сил инерции) распадающихся частиц жидкости не станет равной или меньше работы сил вязкости и поверхностного натяжения, тормозящих распад. На этом дробление заканчивается и оставшиеся маленькие кусочки жидкости под действием поверхностного натяжения принимают форму сферических капель. Записывая с точностью до порядка величин это условие, получаем

$$l^3 \rho (\Delta u)^2 \sim l^2 \sigma + l^2 \eta \Delta u$$

Здесь l — линейный размер кусочков жидкости, Δu — разность скоростей в жидкости на расстоянии l .

Отсюда средний диаметр капель d , пропорциональный линейному размеру l , выразится формулой

$$d \sim l \sim \frac{\sigma}{\rho (\Delta u)^2} + \frac{\eta}{\rho \Delta u}$$

Для того чтобы выразить l и d через скорость жидкости относительно воздуха u и начальные линейные размеры нераздробленных кусков жидкости L , нужно знать связь Δu , l , u и L . Эта связь, вообще говоря, сложная, может быть достаточно просто выражена только для предельных случаев

для очень вязкой жидкости

$$\Delta u \approx ul / L$$

для жидкостей, практически не обладающих вязкостью

$$\Delta u \approx u (l / L)^{1/2}$$

Отсюда получаем
для первого случая

$$l \approx \frac{\eta}{\rho \Delta u} = \frac{\eta L}{\rho u l} \approx \left(\frac{\eta L}{\rho u} \right)^{1/2}$$

для второго случая

$$l \approx \frac{\sigma}{\rho (\Delta u)^2} = \frac{\sigma L}{\rho u^2 l} \approx \left(\frac{\sigma L}{\rho u^2} \right)^{1/2}$$

Для промежуточных значений коэффициента вязкости можно в первом приближении полагать, что

$$d \sim l = \left[k_1 \left(\frac{\sigma}{\rho u^2} \right)^{1/2} + k_2 \left(\frac{\eta}{\rho u} \right)^{1/2} \right] \sqrt{L} \quad (2.1)$$

Постоянные коэффициенты k_1 и k_2 определяются опытным путем по результатам дробления жидкости, вытекающей в виде сплошной цилиндрической струи.

Если средний диаметр капель определять как средневесовой ($d = \Sigma g_i d_i / \Sigma g_i$), то эти коэффициенты будут равны соответственно $k_1 = 0.28$ и $k_2 = 1.07$, при этом значения σ , ρ , η — в системе СГС, d — в мм, L — в мм, u — в м/сек.

Зависимость (2.1) применительно к случаю вылива жидкости в виде цилиндрической струи была получена одним из авторов совместно с Е. Н. Теверовским и Э. М. Трегубовой [6].

В уравнении (2.1) способ вылива — мгновенный, в виде струи или пелены центробежной форсунки — выражается через величину L . В случае вылива жидкости в виде пелены начальный линейный размер «куска» жидкости, поступающего на дробление, удобно выразить через толщину пелены δ , т. е.

$$\sqrt{L} \sim \sqrt{\delta} = \sqrt{\delta / 0.5D} \sqrt{0.5D} = \lambda \sqrt{0.5D} \quad (2.2)$$

Здесь величина $\sqrt{\delta / 0.5D}$ есть функция геометрической характеристики форсунки A и ее можно представить в ранее принятых обозначениях как λ .

Окончательно зависимость (2.1) с учетом (2.2) запишется в виде

$$d = \left[0.28 \left(\frac{\sigma}{\rho u^2} \right)^{1/2} + 1.07 \left(\frac{\eta}{\rho u} \right)^{1/2} \right] k_3 \lambda \sqrt{D} \quad (2.3)$$

Здесь k_3 — постоянный коэффициент пропорциональности.

Покажем, что формула (2.3) правильно отражает влияние параметров форсунки, свойств жидкости и скорости истечения. Рассмотрим следующие

диапазоны изменения параметров: диаметр выходного сопла $D - 0.2 \div 10$ мм; геометрическая характеристика $A - 1 \div 12$; скорость истечения жидкости $u - 10 \div 250$ м/сек.

В качестве исследуемых выбираем жидкости с разной степенью вязкости:

жидкость высокого поверхностного натяжения — ртуть

$$\sigma = 460 \text{ дин/см}, \quad \eta = 0.0157 \text{ пз}, \quad \rho = 1390 \text{ кг.сек}^2/\text{м}^4$$

жидкость малой вязкости — вода $\sigma = 72.75$ дин/см,

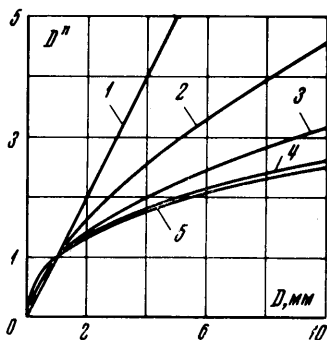
$$\eta = 0.0101 \text{ пз}, \quad \rho = 104.5 \text{ кг.сек}^2/\text{м}^4$$

жидкость высокой вязкости — вазелиновое масло

$$\sigma = 47 \text{ дин/см}, \quad \eta = 1.30 \text{ пз}, \quad \rho = 89.2 \text{ кг.сек}^2/\text{м}^4$$

На фиг. 1 через величину D^n выражена степень влияния диаметра выходного сопла на процесс дробления жидкости по данным разных исследований. Формула (2.3) правильно отражает влияние диаметра сопла, полностью совпадает с данными Рэдклифа.

На фиг. 2 представлена зависимость параметра пелены λ от геометрической характеристики форсунки. Расчетная зависимость (2.3) правильно показывает влияние геометрической характеристики A на процесс дробления капель, что свидетельству-



Фиг. 1 Кривая 1 — Лонгвелл и Ильяшенко, 2 — Струлевич, 3 — Рэдклиф и формула (2.3), 4 — Найт, 5 — Блох

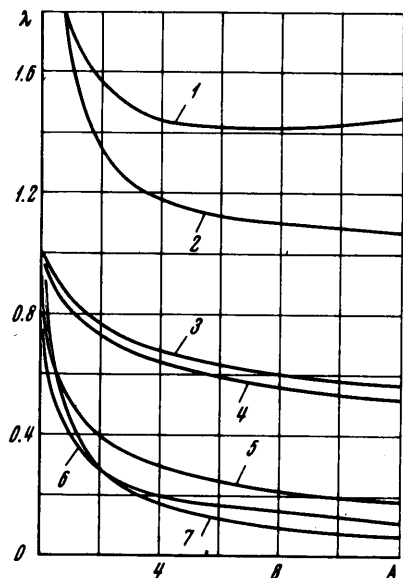
ет о правомочности сделанного допущения, что $L \sim \delta$. Наиболее близко параметр λ формулы (2.3) совпадает с данными экспериментов Н. Н. Струлевича.

На фиг. 3 через величину u^m показано влияние скорости истечения жидкости по данным разных исследований. Для формулы (2.3) параметр u^m определяется для выбранных жидкостей, так как он является еще и функцией свойств жидкости. Действительно, если сравнить формулу (2.3) с формулой (1.7), то

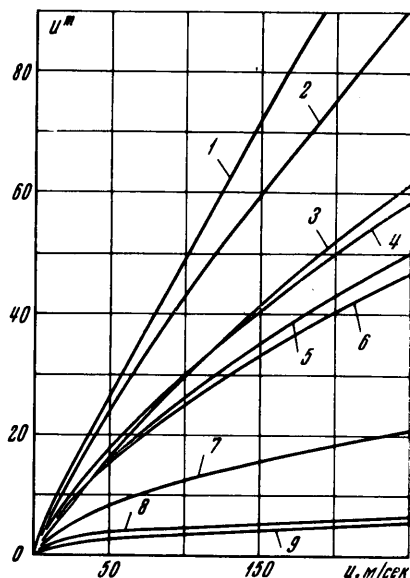
$$u^m = \frac{1}{0.28(\sigma/\rho u^2)^{1/2} + 1.07(\eta/\rho u)^{1/2}} = \frac{1}{(C_1/u + C_2/u^{1/2})}$$

Здесь постоянные C_1 и C_2 есть функции только физико-химических свойств жидкости.

Формула (2.3) достаточно правильно отражает влияние скорости истечения жидкости на крупность капель центробежной форсунки; по-видимому, она более правильно показывает взаимосвязь скорости истечения с процессом дробления реальной (вязкой) жидкости.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Кривая 1 — Блох, 2 — Лонгвелл, 3 — Найт, 4 — Рэдклиф, 5 — формула (2.3), 6 — Струлевич, 7 — Ильяшенко

Фиг. 3. Кривая 1 — формула (2.3) — ртуть, 2 — Ильяшенко, 3 — формула (2.3) — вода, 4 — Лонгвелл, 5 — Найт, 6 — Блох, 7 — Рэдклиф, 8 — Струлевич, 9 — формула (2.3) — вазелиновое масло

Пелена жидкости с малым значением коэффициента вязкости и большим коэффициентом поверхностного натяжения (ртуть) гораздо легче дробится на капли за счет высоких значений поверхностной энергии (раздробленные куски жидкости стремятся принять форму шаровой капли). Пелену жидкости с большим значением коэффициента вязкости значительно труднее раздробить на капли, так как вязкость противодействует стремлению куска жидкости свернуться в каплю. Поэтому для ртути показатель степени m при скорости существенно больше, чем для вазелинового масла (≈ 0.817 для ртути и ≈ 0.34 для ВМ). Для воды этот показатель равен ≈ 0.75 и близок к результатам экспериментов Лонгвелла.

Таким образом, расчетно-теоретическая формула (2.3) правильно отражает влияние геометрии форсунки и скорости истечения жидкости на процесс дробления капель и может быть использована в широком диапазоне изменения свойств диспергируемой жидкости.

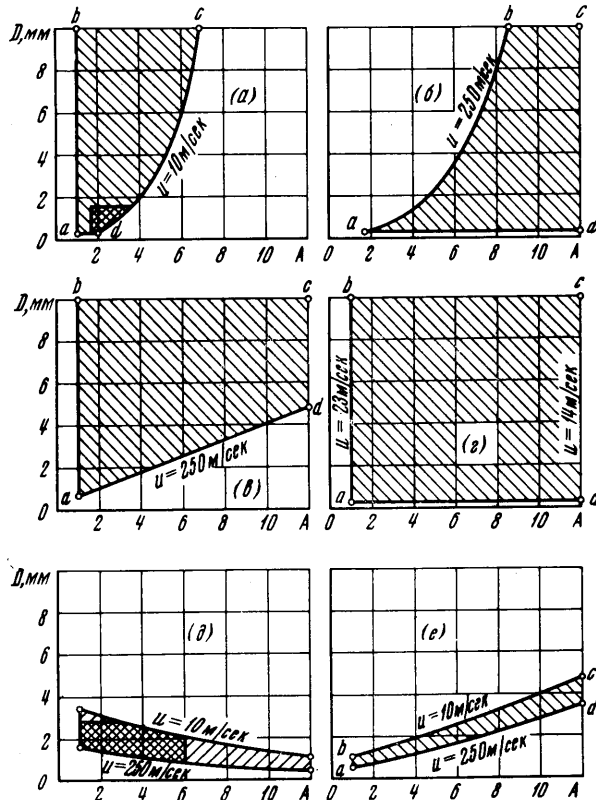
На основании многочисленных расчетов на ЭВМ среднего диаметра капель по данным разных исследователей в принятых диапазонах изменения параметров форсунки, скорости истечения маловязкой жидкости (воды) и сравнения этих данных с формулой (2.3) было получено, что наилучшее совпадение эта формула имеет с

результатами экспериментов различных исследователей при значении коэффициента $k_3 = 4$, т. е.

$$d = \left[0.28 \left(\frac{\sigma}{\rho u^2} \right)^{1/2} + 1.07 \left(\frac{\eta}{\rho u} \right)^{1/2} \right] 4\lambda \sqrt{D} \quad \lambda = \sqrt{\delta/0.5D} \quad (2.4)$$

Здесь σ — дин/см, η — пз, ρ — г/см³, u — м/сек, d , D — мм.

Для жидкости малой вязкости (воды), на которой практически были установлены все перечисленные выше экспериментальные зависимости, можно установить об-



Фиг. 4. а) Блох, б) Найт, в) Струлевич, г) Рэдклиф, д) Лонгвелл, е) Ильяшенко

ласти изменения параметров форсунки и скорости истечения, в которых (2.4) дает точное совпадение с результатами расчетов по этим формулам.

Для воды зависимость (2.4) имеет вид

$$d = 4 \left(\frac{2.36}{u} + \frac{0.107}{\sqrt{u}} \right) \lambda \sqrt{D} \quad (2.5)$$

Формулы (1.7)–(1.9) для конкретной жидкости можно представить в виде

$$d = k_i \frac{D^n \lambda_i}{u^m} \quad (2.6)$$

Приравнивая формулы (2.5) и (2.6), получаем

$$4u^m \left(\frac{2.36}{u} + \frac{0.107}{\sqrt{u}} \right) \frac{\lambda D^{1/2}}{D^n} = k_i \quad (2.7)$$

ИЛИ

$$4k_u k_\lambda k_D = k_i$$

Здесь коэффициент k_u — функция скорости истечения, k_λ — функция геометрической характеристики, k_D — функция диаметра выходного сопла форсунки, коэффициент k_i — постоянный для конкретной жидкости и исходной формулы. Значения этого коэффициента для различных экспериментальных зависимостей представлены в табл. 2, причем в величину k_i вошел и коэффициент пересчета характерного среднего диаметра (заутеровского или медианного) в средневесовой диаметр, который определялся по константе распределения, равной 2,5, при условии, что распределение капель по размерам подчиняется уравнению Розина — Раммлера.

Таблица 2

	Блох	Найт	Струлевич	Рэдклиф	Лонгвелл	Ильяшенко
Ртуть	0.364	0.960	0.276	2.16	0.372	28.0
Вода	1.16	1.41	0.562	1.74	0.965	8.82
Вазелиновое масло	13.7	4.36	3.08	3.74	2.89	23.8

На фиг. 4 области совпадения формулы (2.4) с какой-либо из зависимостей (1.1) — (1.6) заштрихованы. Величина диаметра выходного сопла, геометрической характеристики и скорости истечения на границах области совпадения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Точки		a	b	c	d
Блох	D, мм	0.2	10	10	0.2
	A	1	1	6.9	2
	u, м/сек	18	200	10	10
Найт	D, мм	0.2	10	10	0.2
	A	1.8	8,5	12	12
	u, м/сек	250	250	106	16
Струлевич	D, мм	0.65	10	10	4.7
	A	1	1	12	12
	u, м/сек	250	108	186	250
Лонгвелл	D, мм	1.6	3.5	1	0.5
	A	1	1	12	12
	u, м/сек	250	10	10	250
Рэдклиф	D, мм	0.2	10	10	0.2
	A	1	1	12	12
	u, м/сек	23	23	14	14
Ильяшенко	D, мм	0.6	0.8	4.6	3.3
	A	1	1	12	12
	u, м/сек	250	10	10	250

Таблица 4

	Вода	Ртуть	Вазелиновое масло
Блох (1.1)	10÷20	10÷40	не совпадает
Найт (1.2)	60÷250	60÷200	не совпадает
Струлевич (1.3)	180÷250	250	100÷250
Рэдклиф (1.4)	10	не совпадает	10÷250
Лонгвелл (1.5)	10÷40	60÷250	40÷250
Ильяшенко (1.6)	10÷40	не совпадает	10÷80

Для зависимостей Блох и Лонгвелла (фиг. 4, а, в) двойной штриховкой показаны области, обследованные экспериментально этими авторами при скоростях истечения более 10 м/сек и геометрической характеристике $A \geq 1$. Как видно из графиков, интервалы экспериментальных исследований полностью находятся в области совпадения.

Для формул других авторов не удалось найти сведений о границах областей экспериментальных данных, на основании которых получены эти формулы.

Расчеты по (2.7) и графики фиг. 4 показывают, что для конкретной форсунки с определенным диаметром выходного сопла и геометрической характеристикой существует всего лишь одна скорость истечения, при которой формула (2.4) совпадает полностью с той или иной зависимостью (1.1) — (1.6). Наибольшие области совпадения формула (2.4) имеет с экспериментальными зависимостями Блох, Найта и Струлевича, наименьшие — с зависимостями Рэдклифа, Лонгвелла и Ильяшенко.

Для форсунки с параметрами $D = 2.25$ мм и $A = 4.75$ в табл. 4 указаны пределы изменения скорости истечения исследуемых жидкостей, в которых зависимости (1.1) — (1.6) совпадают с формулой (2.4) с точностью не менее 80%. Для выбранной форсунки имеется полное совпадение результатов расчета по формулам (1.1), (1.5), (1.6) и (2.4) при скорости истечения воды 10 м/сек. Из данных табл. 4 следует, что для этой форсунки наибольший диапазон совпадения с результатами расчетов по формуле (2.4) имеют зависимости: Найта (при распыливании воды), Лонгвелла (при распыливании ртути) и Рэдклифа (при распыливании вазелинового масла). Если для воды формула (2.4) имеет диапазоны совпадения по скорости истечения со всеми экспериментальными зависимостями, то для ртути уже нет совпадения с формулами Рэдклифа и Ильяшенко, а для вазелинового масла — с формулами Блох и Найта.

Для форсунок с другой геометрией диапазоны совпадения по скорости истечения, конечно, будут несколько другие.

Таким образом, при определении средневесового диаметра капель, получаемых при распыливании центробежными форсунками жидкостей с разными физико-химическими свойствами, рекомендуется формула (2.4) в следующем диапазоне изменения параметров:

диаметр выходного сопла $D = 0.2-10$ мм, геометрическая характеристика $A = 1 \div 12$, скорости истечения жидкости $u = 10 \div 250$ м/сек;
жидкости: ртуть вода и вазелиновое масло.

Поступило 7 V 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох А. Г., Кичкина Е. С. Средний диаметр капель при распыливании жидкого топлива центробежными форсунками. Теплоэнергетика, 1955, № 9.
2. Основы горения углеводородных топлив. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. М., Госэнергоиздат, 1959.
4. Design and performance of gas Turbine Power Plants. Princeton, No. 4, Princeton Univ. Press, 1960. (Рус. перев.: Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей. М., Машиностроение, 1964).
5. Бондарюк М. М., Ильяшенко С. М. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. М., Оборонгиз, 1958.
6. Баранав М. К., Твердовский Е. Н., Трегубова Э. М. О размере минимальных пульсаций в турбулентном потоке. Докл. АН СССР, Нов. сер., 1949, т. 66. № 5.

К РАСЧЕТУ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В УДАРНОЙ ТРУБЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

М. Я. ИВАНОВ (Москва)

Известное аналитическое решение задачи о течении в ударной трубе, которое возникает после разрыва диафрагмы [1], ограничено случаем постоянного поперечного сечения трубы. Однако и это решение справедливо лишь до того момента, когда начинается взаимодействие центрированной волны разрежения со стенкой или с отраженным скачком. Что касается нестационарных течений в каналах переменной площади, то здесь известные автору результаты были получены лишь с использованием одномерного приближения [2-5].

Ниже для расчета нестационарного двумерного течения в осесимметричной ударной трубе применен численный метод, предложенный С. К. Годуновым, А. В. Забродным и Г. П. Прокоповым [6]. Ранее при помощи этого метода был выполнен анализ расчетных и нерасчетных режимов течения в соплах различных типов [7, 8]. Особенностью данной разностной схемы является сквозной счет без выделения сильных разрывов, которые представляют собой области с резкими градиентами параметров. С целью оценки эффектов «размазывания» для цилиндрической ударной трубы проведено сравнение с точным решением, а также с результатами, полученными в [9] с использованием разностных схем типа Лакса — Вендрова. Сравнение показало, что для достаточно интенсивных ударных волн размазывание незначительно.