

## ГЛАВА V. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СТРУИ

### § 23. Сплошные водяные струи

Струей называется поток жидкости, не ограниченный стенками, движущейся в массе такой же или другой жидкости. В зависимости от условий водяная струя может быть затопленной, если она движется в массе капельной жидкости или в пространстве, заполненном водой, и незатопленной, если она движется в газовом пространстве. Наиболее широкое применение в практике пожаротушения нашли незатопленные водяные струи.

Водяные струи подразделяются на сплошные, получаемые от ручных и лафетных пожарных стволов,

с коническими и коноидальными насадками, и распыленные, образуемые от специальных насадков — распылителей.

Сплошные водяные струи отличаются компактностью, большой дальностью полета и сильным динамическим воздействием. Строго говоря, сплошную водяную струю при большом давлении у ствола получить невозможно. В этом случае в струе принято выделять две части: компактную и раздробленную. В компактной части в некоторой степени сохраняется сплошность потока, струя имеет цилиндрическую или близкую к ней форму; в раздробленной части сплошность потока нарушается, струя разрывается на все более мелкие части и расширяется. Понятие «компактная часть струи» является относительным, поскольку резкой грани между нею и раздробленной частью не существует.

Обычно применяют определение компактной части, впервые сформулированное Фриманом (1888 г.) в отношении струй, получаемых из насадков диаметром 26—38 мм. Он предложил за длину компактной части сплошной водяной струи принимать ту ее часть, которая несет 75% всей массы воды в круге диаметром 26 см или 90% воды — в круге диаметром 38 см. Практически струю можно разделить на компактную и раздробленную части на основании визуального наблюдения за струей, или при измерении плотности струи на различном удалении от насадка, а также на основании опыта использования струй в данной отрасли техники.

Величина компактной части струи позволяет оценить качество изготовления и свидетельствует о совершенстве конструкции стволов и насадков.

Разрушение струи происходит под влиянием действующих на нее сил тяжести, сопротивления воздуха и внутренних сил, вызываемых турбулентностью потока и колебательно-волновым характером движения жидкости в трубе. На определенной стадии распада струи в качестве дополнительных сил, способствующих распылению ее на капли, будут выступать силы поверхностного натяжения.

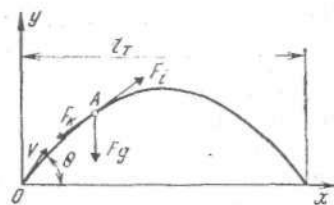


Рис. 32. Теоретическая траектория сплошной струи

## § 24. Расчет сплошной струи

Уравнение траектории сплошной струи получим, полагая, что все ее частицы движутся подобно твердому телу, брошенному под углом к горизонту (рис. 32). В этом случае уравнение траектории струи, вылетающей из насадка диаметром  $d$ , при наклоне ствола под углом  $\theta$ , с начальной скоростью  $v$ , на которую действуют силы инерции  $F_i$ , тяжести  $G$  и сопротивления воздуха  $F_k$ , в параметрической форме может быть представлено в виде:

$$x = v t \cos \theta - K \frac{x}{d} \frac{v^2}{2g}; \quad (47)$$

$$y = v t \sin \theta - K \frac{y}{d} \frac{v^2}{2g} - \frac{g t^2}{2}, \quad (48)$$

где  $x$  и  $y$  — координаты частицы струи в произвольно выбранной точке;  $t$  — время;  $K$  — коэффициент сопротивления трению в воздухе.

В уравнениях (47) и (48) первые члены  $vt \cos \theta$  и  $vt \sin \theta$  определяют координаты частиц струи по истечении времени  $t$  с момента вылета из ствола, если бы отсутствовали сила сопротивления воздуха и сила тяжести. Вторые члены учитывают влияние сил сопротивления воздуха, по своей форме они аналогичны формуле Дарси-Вейсбаха, в которой коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  заменен коэффициентом  $K$  — сопротивления трению в воздухе. Третий член уравнения (48) определяет уменьшение высоты подъема струи под действием силы тяжести.

Из уравнения (47) определим время движения

$$t = \frac{x}{v \cos \theta} \left( 1 + \frac{K}{d} \frac{v^2}{2g} \right)$$

и, подставив в уравнение (48), получим значение ординаты

$$y = x \operatorname{tg} \theta - \frac{x^2 g}{2 v^2 \cos^2 \theta} \left( 1 + \frac{K}{d} \frac{v^2}{2g} \right). \quad (49)$$

Заменяя в выражении (49)  $v^2/2g = H$  (где  $H$  — напор у насадка), получим уравнение траектории струи, которая по своей форме представляет параболу:

$$y = x \operatorname{tg} \theta - \frac{x^2}{4 H \cos^2 \theta} \left( 1 + \frac{K}{d} H \right). \quad (50)$$

Полагая в формуле (50)  $y=0$ , определим  $x=l_T$  — теоретическую дальность полета струи

$$l_T = \frac{2 H \sin 2 \theta}{1 + \frac{K}{d} H}. \quad (51)$$

Из выражения (51) следует, что максимальная теоретическая дальность полета струи имеет место при угле наклона ствола  $\theta=45^\circ$

$$l_{\max} = \frac{2 H}{1 + K H/d}. \quad (52)$$

В действительности формула (52) дает результат, совпадающий с опытными данными лишь при напоре до 7 м. При напоре 10 м наибольшая дальность полета струи будет достигнута при  $\theta=35-40^\circ$ , а при напоре 35 м и более — при  $\theta=30-40^\circ$ . Несовпадение теоретических и практических данных особенно на раздробленном участке объясняется сложной структурой струи, в связи с чем движение ее частиц как отдельных материальных точек является несовершенной моделью. До сих пор не удалось получить аналитически уравнение траектории струи, отвечающее действительности, так как не изучены законы сопротивления, которое возникает при движении струи в воздухе. Поэтому для расчета струй используют эмпирические формулы.

## § 25. Вертикальные струи

Сплошная водяная струя при истечении из вертикально направленного ствола со скоростью  $v$  теоретически должна подняться на высоту  $H=v^2/2g$ , так как в насадке вся потенциальная энергия переходит в кинетическую (рис. 33). Однако при движении струи часть энергии расходуется на преодоление трения струи о воздух, поэтому струя поднимается на несколько меньшую высоту  $H_n$ . Разность величин  $H - H_n = h$  назовем потерей высоты. Ее можно определить по формуле

$$h = K \frac{H_n}{d} \frac{v^2}{2g},$$

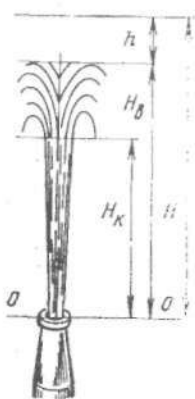


Рис. 33. Схема вертикальной струи

аналогичной формуле Дарси-Вейсбаха для потери напора по длине трубы при подстановке вместо  $\lambda$  коэффициента сопротивления трению в воздухе  $K$  и вместо  $l$  — высоты струи  $H_B$ .

Таким образом, теоретическую высоту струи можно установить из равенства

$$H = H_B + h = H_B \left( 1 + \frac{K}{d} \frac{v^2}{2g} \right)$$

или после подстановки из формулы:

$$H = H_B (1 + KN/d),$$

откуда определим высоту вертикальной струи

$$H_B = \frac{H}{1 + KN/d}.$$

Эта зависимость аналогична эмпирической формуле, предложенной Люгером (1895 г.) для расчета вертикальных струй

$$H_B = \frac{H}{1 + \varphi H}, \quad (53)$$

в ней коэффициент  $\varphi$  определяют из выражения

$$\varphi = \frac{0,25}{d + (0,1d)^3},$$

где  $d$  — диаметр выходного сечения насадка, мм.

Значения коэффициента  $\varphi$  для различных насадков приведены в табл. 11

Таблица 11. Значения коэффициента  $\varphi$  для насадков

$d$ , мм	$\varphi$	$d$ , мм	$\varphi$	$d$ , мм	$\varphi$
13	0,0165	22	0,0077	32	0,0039
16	0,0129	25	0,0061	38	0,0028
19	0,0097	28	0,005	50	0,0014

Фриман для расчета высоты вертикальных струй, получаемых при напоре от 7 до 70 м, предложил формулу

$$H_B = H (1 - 0,000113 H/d), \quad (54)$$

где  $d$  — диаметр насадка, м.

Для практических расчетов формулы Люгера (53) и Фримана (54) можно считать равноценными.

Из формул (53) и (54) следует, что высота вертикальной струи находится в прямой зависимости от величины напора и диаметра насадка. Однако высота струи для каждого отдельного насадка с увеличением напора не может расти неограниченно, она достигает определенной максимальной величины, после чего не изменяется, как бы сильно ни увеличивался напор. Максимальную высоту сплошной струи можно определить, используя формулу Люгера.

$$H_{\max} = \lim_{H \rightarrow \infty} \frac{1}{1/H + \varphi} = \frac{1}{\varphi}.$$

Так как величина  $\varphi$  зависит только от диаметра, то при больших напорах увеличение высоты струи возможно только при увеличении диаметра насадка.

Предельную величину напора, при котором струя достигает максимальной высоты, найдем из формулы Фримана, приравнявая первую производную нулю:

$$dH_B/dH = 1 - 0,000226 H/d = 0,$$

откуда

$$H = d/0,000226.$$

Следует отметить, что предельные величины напоров, приведенные в табл. 12, значительно больше номинальных величин  $H$ , установленных для пожарных стволов в качестве рабочих режимов.

Таблица 12. Значения максимальных напоров для насадков

$d$ , мм	$H$ , м	$d$ , мм	$H$ , м	$d$ , мм	$H$ , м
13	58	22	97	32	142
16	71	25	110	38	168
19	84	28	124	50	221

Используя формулу Люгера, можно определить величину напора перед насадком, если известны другие параметры, зависимость будет иметь вид

$$H = \frac{H_B}{1 - \varphi H}.$$

Следует отметить, что рекомендуемые формулы Люгера и Фримана дают вполне удовлетворительные результаты при расчете струй, получаемых из ручных стволов, и ограниченно применимы в случае использования насадков большого диаметра.

Величину компактной струи для ручных стволов принято определять как часть всей вертикальной струи по формуле

$$H_k = f H_v,$$

где  $f$  — коэффициент, изменяющийся в зависимости от величины  $H_v$ , значения которого по опытным данным Лобачева В. Г. приведены в табл. 13.

Таблица 13. Значения коэффициента  $f$  для определения величины компактной струи

$H_v$ , м	7	10	15	20	25	30
$f$	0,84	0,83	0,81	0,76	0,67	0,54

Из приведенных данных видно, что с увеличением высоты струи, а следовательно, с увеличением напора перед насадком, доля компактной части струи по отношению ко всей струе уменьшается.

## § 26. Наклонные струи.

При тушении пожаров струи могут иметь самые различные углы наклона. Если при одном и том же напоре у насадка постепенно изменять угол наклона ствола, то компактная часть струи будет описывать траекторию  $abc$ , которую принято называть огибающей кривой компактной струи, а наиболее удаленные капли струи — траекторию  $a'b'c'$ , называемую огибающей кривой раздробленной струи (рис. 34). Расстояния по прямой от насадка до граничных кривых соответственно называются радиусом действия компактной струи  $R_k$  и радиусом действия раздробленной струи  $R_p$ .

Расчет наклонных струй ведут по отношению к данным, полученным для вертикальных струй. Из рис. 34 видно, что огибающая кривая  $a'b'c'$  имеет эллиптическую форму, причем радиус действия раздробленной струи увеличивается с уменьшением угла наклона

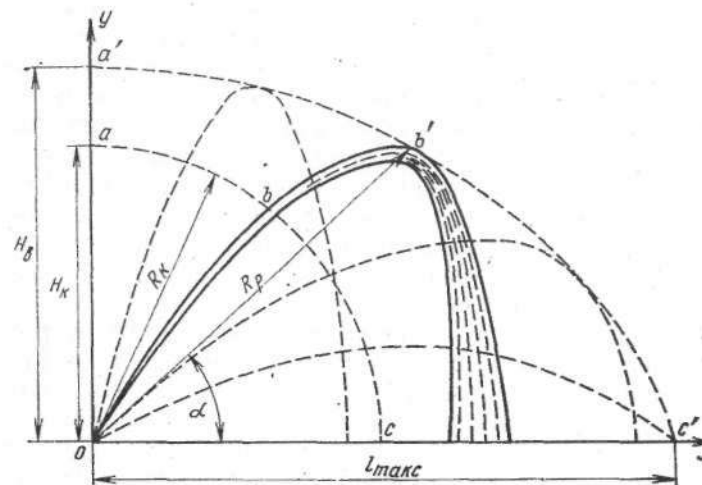


Рис. 34. Схема наклонных струй:

$a, b, c$  — траектория компактной части струи;  $a', b', c'$  — траектория раздробленной части струи

$R_k$  к горизонту. Отмеченная зависимость может быть выражена уравнением

$$R_p = \beta H_v,$$

где  $\beta$  — коэффициент, зависящий от угла наклона  $R_p$  к горизонту. На рисунке этот угол обозначен буквой  $\alpha$ .

Значения коэффициента  $\beta$  в зависимости от  $\alpha$  определены опытными путем и приводятся в табл. 14.

Таблица 14. Значения коэффициента  $\beta$  для определения  $R_p$

Угол наклона $R_p$ к горизонту $\alpha$ , град	0	15	30	45	60	75	90
$\beta$	1,4	1,3	1,2	1,12	1,07	1,03	1,0

Нельзя отождествлять угол наклона радиуса действия струи с углом наклона ствола. Последний для наклонных струй всегда больше угла наклона  $R_p$  к горизонту. Например, наибольшая дальность полета струи наблюдается при угле наклона ствола около  $30^\circ$ , а угол наклона радиуса действия струи при этом равен нулю.

Огибающая кривая компактной части струи для ручных стволов мало отличается от дуги окружности,

описанной радиусом  $R_k$ , равным высоте компактной части вертикальной струи  $R_k = H_k$ .

Для насадков больших диаметров, например для лафетных стволов и гидромониторов, линия *авс* более вытянута вдоль горизонтальной оси. Фактических данных из-за большой трудности постановки эксперимента для таких насадков немного. В справочной литературе обычно приводятся величины, отражающие зависимость между радиусом действия компактной струи, диаметром насадка, напором и расходом жидкости (табл. 15 и 16).

При пожаротушении применяют чаще всего не раздробленную, а компактную часть сплошной струи. Анализ фактических данных, проведенных ВНИИПО МВД СССР, позволил установить, что минимальная длина компактных струй, применяемых для тушения наружных пожаров при использовании ручных стволов, должна составлять не менее 17 м. Получение таких струй требует создания напора перед насадком от 25 до 33 м. Иногда для характеристики струи за основу берут не длину компактной части, а напор у насадка. Рабочие напоры для ручных стволов должны быть в пределах 30—50 м, для лафетных — пределы возрастают до 50—70 м. Дальнейшее увеличение напора неэффективно: после 70 м прирост дальности полета струи и ее компактной части заметно уменьшается.

## § 27. Реакция струи

При истечении струи из насадка возникает сила, направленная в сторону, обратную движению струи. Эту силу называют реакцией струи. Для определения ее величины воспользуемся законом об изменении количества движения. При движении потока жидкости от ствола к насадку изменяются количественные параметры движения массы жидкости от первоначальной величины  $mv_1$  перед насадком до  $mv_2$  после насадка. Это изменение приводит к появлению импульса силы  $Ft$ . Пренебрегая силами трения, можно записать зависимость:

$$mv_1 - mv_2 = Ft,$$

где  $m$  — масса жидкости, проходящая через выделенные сечения за время  $t$ ;  $v_1$  и  $v_2$  — средние скорости потока жидкости в двух различных сечениях;  $F$  — сила реакций струи.

Таблица 15. Значения напора ( $H$ ) и расхода жидкости ( $Q$ ) в зависимости от радиуса компактной струи  $R_k$

$R_k, м$	Диаметры насадков, мм											
	13			16			19			22		
	$H, м$	$Q, л/с$	$H, м$	$Q, л/с$	$H, м$	$Q, л/с$	$H, м$	$Q, л/с$	$H, м$	$Q, л/с$	$H, м$	$Q, л/с$
6	8,1	1,7	7,8	2,5	7,7	3,5	7,7	3,5	7,7	4,6	7,5	5,9
7	9,6	1,8	9,2	2,7	9,0	3,8	9,0	3,8	8,9	5,0	8,7	6,4
8	11,2	2,0	10,7	2,9	10,4	4,1	10,4	4,1	10,2	5,4	10,1	6,9
9	13,0	2,1	12,4	3,1	12,0	4,3	12,0	4,3	11,7	5,8	11,5	7,4
10	13,9	2,3	14,1	3,3	13,6	4,6	13,6	4,6	13,2	6,1	12,9	7,8
11	16,9	2,4	15,8	3,5	15,2	4,9	15,2	4,9	14,7	6,5	14,4	8,3
12	19,1	2,6	17,7	3,8	16,9	5,2	16,9	5,2	16,3	6,8	15,9	8,7
13	21,4	2,7	19,7	4,0	18,7	5,4	18,7	5,4	18,0	7,2	17,5	9,1
14	23,9	2,9	21,8	4,2	20,6	5,7	20,6	5,7	19,8	7,5	19,2	9,6
15	26,7	3,0	24,0	4,4	22,6	6,0	22,6	6,0	21,6	7,8	20,9	10,0
16	29,7	3,2	26,5	4,6	24,7	6,2	24,7	6,2	23,6	8,2	22,7	10,4
17	33,2	3,4	29,2	4,8	27,1	6,5	27,1	6,5	25,7	8,5	24,7	10,8
18	37,1	3,6	32,2	5,1	29,6	6,8	29,6	6,8	28,0	8,9	26,8	11,3
19	41,7	3,8	35,6	5,3	32,5	7,1	32,5	7,1	30,5	9,3	29,1	11,7
20	46,8	4,0	39,4	5,6	35,6	7,5	35,6	7,5	33,2	9,7	31,5	12,2
21	53,3	4,3	43,7	5,9	39,1	7,8	39,1	7,8	36,3	10,1	34,3	12,8
22	60,9	4,6	48,7	6,2	43,1	8,2	43,1	8,2	39,6	10,6	37,3	13,3
23	70,3	4,9	54,6	6,6	47,6	8,7	47,6	8,7	43,4	11,1	40,6	13,9
24	82,2	5,3	61,5	7,0	52,7	9,1	52,7	9,1	47,7	11,7	44,3	14,5
25	98,2	5,8	70,2	7,5	58,9	9,6	58,9	9,6	52,7	12,2	48,6	15,2
26	—	—	80,6	8,0	66,2	10,2	66,2	10,2	58,5	12,9	53,5	15,9
27	—	—	94,2	8,6	75,1	10,9	75,1	10,9	65,3	13,7	59,1	16,8
28	—	—	—	—	86,2	11,6	86,2	11,6	75,5	14,5	65,8	17,7

Таблица 16. Значения  $R_K$  и  $Q$  насадков в зависимости от напора  $H$  у ствола

Напор у ствола, $H$ , м	Диаметры насадков, мм											
	28		32		38		50		63		76	
	$R_K$ , м	$Q$ , л/с	$R_K$ , м	$Q$ , л/с	$R_K$ , м	$Q$ , л/с	$R_K$ , м	$Q$ , л/с	$R_K$ , м	$Q$ , л/с	$R_K$ , м	$Q$ , л/с
20	20,0	12,2	20,0	15,9	20,5	22,4	21,0	38,9	—	—	—	—
25	23,0	13,6	23,5	17,8	24,0	25,1	25,0	43,5	—	—	—	—
30	26,0	14,9	26,5	19,4	27,0	27,4	28,0	47,5	29,0	76,5	30,4	111,0
35	28,0	16,2	28,5	21,0	29,5	29,7	31,0	51,5	32,0	82,5	34,0	119,0
40	30,0	17,2	30,5	22,5	32,0	31,7	33,0	55,0	35,0	87,3	38,0	127,0
45	31,5	18,3	32,5	23,8	34,0	33,6	35,5	58,3	38,0	92,5	41,0	135,0
50	33,0	19,3	34,0	25,1	35,5	35,4	37,5	61,6	42,0	97,5	45,0	142,0
55	34,5	20,2	36,0	26,0	37,0	37,2	39,0	64,4	44,0	102,0	49,0	149,0
60	35,5	21,1	37,0	27,6	38,0	38,2	40,5	67,3	46,0	106,0	52,0	155,0
65	36,5	22,0	37,5	28,6	39,0	40,4	41,5	70,0	49,0	111	55,0	162,0
70	37,0	22,8	37,5	29,7	39,5	41,9	42,5	72,6	52,0	115	58,0	168,0
75	—	—	—	—	40,0	43,4	43,5	75,3	54,0	119	60,5	174,0
80	—	—	—	—	40,5	44,8	44,5	77,8	56,0	123	63,0	179,0
85	—	—	—	—	—	—	45,5	80,1	57,0	127	65,0	185,0
90	—	—	—	—	—	—	46,0	82,5	59,0	131	67,0	191,0
95	—	—	—	—	—	—	46,5	84,8	60,0	134	69,0	196,0
100	—	—	—	—	—	—	47,0	87,0	62,0	138	70,0	201,0

Учитывая, что  $v_1$  значительно меньше  $v_2$ , величиной  $mv_1$  можно пренебречь. Тогда получим

$$-mv^2 = Ft.$$

Выразим массу через объемный расход жидкости и подставим в это уравнение

$$F = -\rho v_2^2 \omega_2.$$

Преобразуем это выражение, умножая и деля левую часть на  $2g$  с последующей подстановкой  $v^2/g = H$ :

$$F = -2\rho g H \omega_2.$$

После замены  $\rho g H$  на  $p$  получим формулу для определения реакции струи

$$F = -2p \omega_2.$$

Из формулы видно, что сила реакции струи прямо пропорциональна давлению перед насадком и площади его сечения и направлена в сторону, противоположную движению струи.

Сила реакции струи для ручных стволов при рабочих давлениях перед насадком изменяется в пределах от 80 до 300 Н. Для лафетных стволов она может достигать чрезвычайно больших величин: 500—4000 Н. Управление такими стволами связано с большими трудностями, поэтому лафетные стволы снабжают специальными опорными приспособлениями или закрепляют в стационарном положении.

## § 28. Распыленные струи и способы их получения

Распыленная водяная струя представляет собой массу отдельно летящих капель. Для всесторонней характеристики ее служит ряд параметров: форма струи, дальность, угол конусности, размеры капель и их распределение по сечению потока, величина напора перед насадком и соответствующий ему расход. Для ее получения применяют специальные насадки, которые обычно называют распылителями.

Капля жидкости при движении испытывает воздействие сил сопротивления воздуха, сил тяжести и сил поверхностного натяжения. При этом в разных точках ее поверхности создается различное давление. Вследствие разности давлений внутри капли возникает движение жидкости, капля меняет форму и разрушается на более мелкие части. Разрушение капель происходит до тех пор, пока не установится равновесие между силами по-

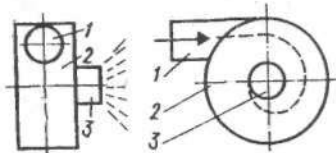
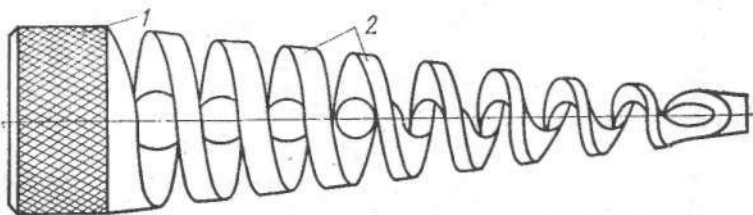


Рис. 35. Схема центробежного распылителя

1 — входное отверстие; 2 — вихревая камера; 3 — выходное отверстие

Рис. 36. Схема винтового распылителя

1 — соединительная гайка; 2 — винт переменного шага



верхностного натяжения и динамическим действием воздуха на поверхность капли.

Диаметр капель, вылетающих из насадка, и другие параметры, характеризующие струю, зависят в основном от способа получения распыленных струй. Наибольшее распространение нашли три способа получения распылительных струй: центробежный, пневматический и механический.

При центробежном способе поток жидкости поступает в вихревую камеру распылителя тангенциально и, вращаясь, перемещается по направлению к выходному отверстию, находящемуся на торцевой стенке распылителя (рис. 35). При истечении жидкости из отверстия распылителя вследствие прекращения действия центростремительных сил на поток частицы жидкости разлетаются по направлениям, касательным к цилиндрической поверхности выходного отверстия.

Расход жидкости из центробежного распылителя определяют по общей формуле  $Q = \mu \omega \sqrt{2gH}$ , где коэффициент расхода  $\mu$  принимается равным от 0,24 до 0,64 и определяется эмпирически.

Центробежные распылители применяются в теплотехнике и энергетике — в устройствах для подачи топлива в камеры сгорания. Такие распылители используют также в пенных генераторах и в быстродействующих установках типа БАПС.

При пневматическом способе струи распыляют воздухом или паром, которые подаются под давлением или

подсасываются. Такие распылители используются в основном для получения пенных и газоводяных струй.

При механическом способе дробление струи происходит вследствие удара о преграду. Этот способ нашел широкое применение в стационарных установках для тушения пожара, а также в конструкции стволов-распылителей. Например, винтовой распылитель ударного действия представляет собой полый винт с переменным шагом и изменяющимся наклоном плоскостей (рис. 36). Каждый виток спирали на пути потока срезает с водяной струи тонкую пленку, которая, срываясь с плоскости, разрывается на отдельные капли. При напоре 60—80 м распылитель обеспечивает получение капель диаметром 100—120 мк.

Перечисленные способы не исчерпывают всех возможных методов получения распыленных струй. Часто применяют способ деления сплошного потока на отдельные струйки путем просверливания в насадке малых отверстий или придают струе в выходном сечении такую форму, при которой происходит быстрый распад потока на отдельные капли (шаровые и щелевые распылители). Широкое применение находят также комбинированные распылители, в которых сочетаются сразу несколько способов распыливания воды, что позволяет получить струю с нужными параметрами.