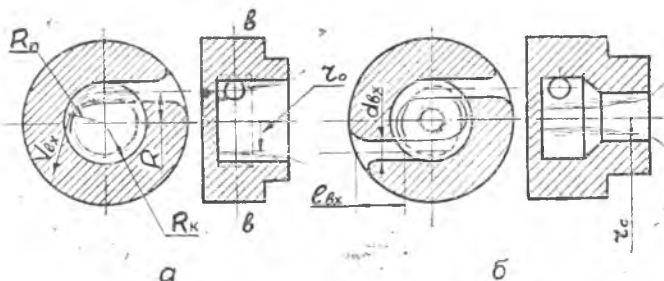


А. М. Керенский

О ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ С ДЛИННОЙ КАМЕРОЙ ЗАКРУЧИВАНИЯ

В настоящее время очень обстоятельно исследован [1] класс центробежных форсунок, имеющих длину камеры закручивания, равную диаметру входных (тангенциальных) отверстий. Что касается центробежных форсунок с длиной камеры закручивания в несколько раз большей диаметра тангенциальных отверстий, то по сравнению с первыми они имеют ряд особенностей, неучет которых при расчете иногда приводит к довольно значительным ошибкам. Одной из таких особенностей является свободное растекание струи при выходе ее из тангенциального отверстия. При этом наблюдается эффект деформации струи (см. фиг. 1). Впервые данный эффект



Фиг. 1. Вид экспериментальных форсунок.

был отмечен еще в 1952 г. Л. А. Клячко. Сравнительно недавно для рассматриваемого здесь класса форсунок Б. В. Новиков предложил учитывать [3] увеличение радиуса закрутки потока, происходящего вследствие деформации струи, коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{R}{R_{\pi}} = f\left(\frac{r_{\text{вх}}}{R}\right)$$

(обозначения понятны из фиг. 1). Основным критерием подобия форсунок при этом остается геометрическая характеристика, определенная через размер R :

$$A = \frac{Rr_c}{\pi r_{\text{вх}}^2}. \quad (1)$$

Однако, как это показано ниже, комплексы $\frac{Rr_c}{\pi r_{\text{вх}}^2}$ и $\frac{r_{\text{вх}}}{R}$ не сов-

сем точно соответствуют процессам, происходящим в камере закручивания. Гораздо ближе физическую сущность рассматриваемого

явления отражают комплексы $\frac{R_k r_c}{\pi r_{\text{вх}}^2}$ и $\frac{r_{\text{вх}}}{R_k}$. Это непосред-

ственно вытекает из рассмотрения следующей модели течения.

На выходе из тангенциального отверстия струя жидкости начинает взаимодействовать с основным потоком, вращающимся в камере закручивания. Однако (при достаточно длинных тангенциальных отверстиях) данное взаимодействие не распространяется на всю глубину струи. Основная масса струи пробивает набегающий на нее поток и устремляется к цилиндрической стенке камеры закручивания. При этом реакции стенки она еще не «чувствует»; частицы жидкости движутся прямолинейно, по инерции. Далее струя ударяется в криволинейную стенку, направление ее скорости меняется, частицы жидкости начинают двигаться по окружности, возникает центробежный эффект. Примерно через один оборот, а при нескольких тангенциальных отверстиях еще раньше, рассматриваемые частицы жидкости начинают вытесняться к центру форсунки более поздними порциями жидкости, вошедшими в камеру закручивания. С этого момента можно считать, что частицы жидкости находятся не только в поле действия центробежных сил, но и в поле действия центральных сил давления, обуславливающих их движение к центру. При этом, как известно, справедлив закон сохранения момента количества движения. Таким образом интересующая нас величина момента количества движения жидкости на входе в камеру закручивания будет обуславливаться не параметрами струи на выходе из тангенциального отверстия, а теми параметрами, которые имеет жидкость в момент возникновения центробежного эффекта. Поскольку рассматривается течение жидкости в длинной камере закручивания, где струя имеет возможность свободно растекаться, то определяющими параметрами для момента количества движения в камере закручивания будут скорость струи на выходе из тангенциального отверстия и радиус камеры закручивания. Отсюда следует, что основным критерием подобия рассматриваемого класса форсунок будет являться геометрическая характеристика, выраженная через размер R_k :

$$A_{\Gamma} = \frac{R_{\kappa} r_c}{\pi x} \quad (2)$$

Если же учесть то обстоятельство, что не весь поток начинает разворачиваться непосредственно у самой стенки, что средний радиус разворота потока (R_{Π}) несколько меньше радиуса камеры закручивания, то очевидно, что полученную выше геометрическую характеристику необходимо скорректировать на величину

$$\alpha = \frac{R_{\Pi}}{R_{\kappa}} \quad (3)$$

После корректировки получаем эквивалентную геометрическую характеристику.

$$A_{\Gamma\alpha} = \alpha \cdot A_{\Gamma} \quad (4)$$

и соответствующий ей эквивалентный коэффициент расхода μ , который определяется по зависимости

$$\mu = f(A), \quad (5)$$

найденной Г. Н. Абрамовичем [2] для случая истечения из форсунки идеальной жидкости.

Для определения поправочного коэффициента α рассмотрим течение жидкости в полностью раскрытой форсунке с одним тангенциальным отверстием (см. фиг. 1а). В сечении «в—в» устанавливается определенный уровень свободной поверхности, характеризующийся радиусом r_0 . Очевидно, что для радиуса закрутки потока будет справедливо неравенство

$$r_0 < R_{\Pi} < r_c.$$

Определение точного значения радиуса закрутки потока является довольно сложной задачей. Однако в данном случае можно ограничиться его приближенной оценкой

$$R_{\Pi} = \frac{r_c + r_0}{2} = r_c \frac{1 + \bar{r}_0}{2}.$$

Учитывая, что для полностью раскрытой форсунки $R_{\kappa} = r_c$, будем иметь

$$\alpha = \frac{R_{\Pi}}{R_{\kappa}} = \frac{1 + \bar{r}_0}{2}. \quad (6)$$

Величину $\bar{r}_0$ найдем исходя из следующих соображений. На свободной поверхности в сечении «в—в» скоростной напор равен полному давлению жидкости на входе в форсунку

$$P^* = \frac{\gamma V_{\text{вх}}^2}{2g}$$

(жидкость считаем идеальной, величиной осевой составляющей скорости пренебрегаем). Из условия постоянства момента количества движения имеем

$$V_{\text{вх}} = V_{\text{вх}} \frac{\alpha R_{\kappa}}{r_0} = V_{\text{вх}} \alpha \frac{r_c}{r_0} = \frac{V_{\text{вх}} \alpha}{\bar{r}_0}.$$

Следовательно.

$$P_0 = \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{V_{вх}^2 \alpha^2}{r_0^2}$$

откуда

$$r_0 = \frac{V_{вх} \alpha}{\sqrt{2g \frac{P^*}{\gamma}}} = \alpha \frac{Q}{\pi r_{вх}^2 \sqrt{2g \frac{P^*}{\gamma}}}$$

где Q — объемный расход жидкости через форсунку.
Поскольку

$$Q = \mu \pi r_0^2 \sqrt{2g \frac{P^*}{\gamma}},$$

где

$$\mu_0 = f(A_{г.0}),$$

то

$$r_0 = \mu_0 A_{г.0}. \quad (7)$$

Здесь

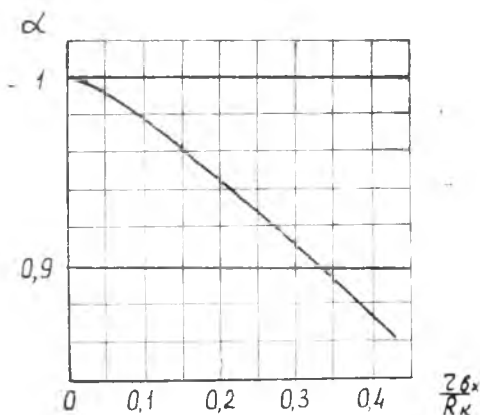
$$A_{г.0} = \alpha \frac{r_c^2}{r_{2x}^2} = \alpha \left(\frac{R_K}{r_{вх}} \right)^2. \quad (8)$$

Из (6), (7), (8) и (5) следует, что для полностью раскрытой форсунки с одним тангенциальным отверстием связь между α и $\frac{r_{вх}}{R_K}$ однозначна:

$$\alpha = f\left(\frac{r_{вх}}{R_K}\right). \quad (9)$$

Графически данная зависимость представлена на фиг. 2

Отметим одно обстоятельство: величина коэффициента α не зависит ни от величины давления, действующего на свободную поверхность, ни от величины перепада давлений на форсунке. Поэтому при двух и более тангенциальных отверстиях (см. фиг. 1б) можно считать, что характер растекания струн, вышедшей из тангенциального отверстия, остается таким же, как и при одном тангенциальном отверстии. Отличие



Фиг. 2. Расчетная зависимость $\alpha = f\left(\frac{r_{вх}}{R_K}\right)$.

при этом состоит только в том, что на свободную поверхность растекающегося потока действуют силы давления от слоев жидкости, ранее вышедшей из остальных тангенциальных отверстий. По этой же причине характер растекания струи по стенке камеры закручивания принципиально не должен изменяться и в том случае, если мы от полностью раскрытой форсунки перейдем к рассмотрению закрытых форсунок, и, следовательно зависимость (9) будет справедливой не только для любого количества тангенциальных отверстий, но и для любой степени раскрытия сопла.

Для проверки высказанных положений было изготовлено 15 центробежных форсунок, охватывающих широкий диапазон геометрических характеристик ($A_r = 0,939 \div 50$) и имеющих различные значения отношения $\frac{r_{вх}}{R_k} = 0,1 \div 0,4$.

Вид форсунок показан на фиг. 1, размеры даны в таблице 1. Для устранения большого влияния трения на момент количества движения жидкости в форсунке длина камер закручивания была сделана равной $\sim 1,5 \div d_{вх}$. По этой же причине форсунки были сделаны со сравнительно большой степенью раскрытия сопла. Для устранения явлений кавитации в тангенциальных отверстиях вход в них был сделан очень плавным.

Проливка форсунок производилась водой, имеющей температуру $15 \div 20^\circ\text{C}$. Расход замерялся весовым способом. Давление — манометрами кл. 0,6. На каждом перепаде производилось три замера расхода. За окончательный результат принималось среднее арифметическое значение из трех замеров. Результаты проливок приведены в таблице 1. Там же даны результаты расчета форсунок по формулам (5), (4), (9). При расчете действительный коэффициент расхода форсунки определялся с учетом потерь полного давления в тангенциальных отверстиях по формуле:

$$\mu_{расч} = \frac{\mu_z}{\sqrt{1 + \xi \left(\frac{F_c}{nF_{вх}} \cdot \mu_z \right)^2}},$$

где F_c — площадь сопла форсунки;

$nF_{вх}$ — суммарная площадь тангенциальных отверстий;

ξ — коэффициент потерь полного давления, отнесенный к скоростному напору в тангенциальных отверстиях.

Коэффициент $\xi = f(Re_{вх}; \bar{\Delta})$ вычислялся по обычным формулам гидравлики в зависимости от числа Рейнольдса в тангенциальных отверстиях (Re_x и величины относительной шероховатости $\bar{\Delta}$).

Из приведенных в таблице 1 результатов видно, что расчеты вполне удовлетворительно согласуются с экспериментами. Это косвенно подтверждает правильность высказанных предположений. Для непосредственного подтверждения был сделан следующий эксперимент. Камера закручивания форсунки № 2 была увеличена с 20 до

Таблица 1

N_{Φ}	A_r	r_c	r_{bx}	n	$\frac{l_{bx}}{d_{bx}}$	Результаты проликов								Результаты расчёта		
														$\mu_{\text{расч. ср.}}$	$\mu_{\text{расч.}}$	$\Delta\mu\%$
1	50	10	1	2	8	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	1	2	4	8	0,01771	0,01764	0,01761	0,01766	0,01688	-4,40
2	33,33	10	1	3	8	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	1	2	4	8	0,02512	0,02494	0,02491	0,02498	0,02492	-0,25
3	25	10	1	4	8	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	1	2	4	8	0,03236	0,03220	0,03243	0,032231	0,03275	+1,36
4	10	6	1	6	8	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	2	4	8	16	0,0780	0,0781	0,0783	0,0781	0,0806	+3,20
5	12,5	10	2	2	5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$		1	2	4		0,06390	0,06465	0,0647	0,0664	+2,63
6	8,35	10	2	3	5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,5	1	2	4	0,0910	0,0912	0,0904	0,09095	0,09490	+4,35
7	4,17	10	2	6	5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,5	1	2	4	0,1616	0,1641	0,1638	0,1625	0,1595	+4,31
8	2,5	6	2	6	5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	1	2	4	8	0,2505	0,2485	0,2505	0,2515	0,2535	+1,20
9	5,56	10	3	2	4,5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,25	0,5	1	2	0,1327	0,1355	0,1360	0,1347	0,1394	+3,49
10	2,78	10	3	4	4,5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,25	0,5	1	2	0,2227	0,2281	0,2259	0,2255	0,2381	+5,60
11	1,667	6	3	4	4,5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,5	1	2	4	0,3380	0,3420	0,3390	0,3391	0,3417	+3,42
12	2,08	10	4	3	4	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,25	0,5	1	2	0,2965	0,2953	0,2915	0,2944	0,3030	+3,26
13	1,875	6	4	2	4	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,5	1	2	4	0,3240	0,3280	0,3265	0,3254	0,3270	+0,49
14	0,937	6	4	4	4	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	0,5	1	2	4	0,510	0,510	0,518	0,5075	0,4840	-4,44
2 доп.	40	10	1	3	6,5	ΔP $\mu_{\text{расч}}$	1	2	4	8	0,02215	0,02222	0,02221	0,02220	0,02202	-0,80

24 мм, так, как это показано пунктиром на фиг. 1а. При этом, очевидно, что комплексы $\frac{Rr_c}{nr_{вх}^2}$ и $\frac{r_{вх}}{R}$ остались прежними, а комплексы $\frac{R_k r_c}{nr_{вх}^2}$ и $\frac{r_{вх}}{R_k}$ изменились на 20%. Из графика фиг. 2 следует, что изменение величины $\frac{r_{вх}}{R_k}$ на 20% (с 0,1 до 0,083) изменяет коэффициент α всего лишь на 0,4%, т. е. практически не меняет его. Коэффициент ε также остается постоянным, поскольку не меняется величина $\frac{r_{вх}}{R}$. Таким образом фактически противопоставляются друг другу два комплекса $\frac{Rr_c}{nr_{вх}^2}$ и $\frac{R_k r_c}{nr_{вх}^2}$.

Если основным критерием подобия рассматриваемого класса форсунок является первый комплекс, то увеличение диаметра камеры закручивания не должно существенно отразиться на коэффициенте расхода доработанной форсунки.

Если основным критерием подобия является второй комплекс, то указанная доработка должна уменьшить коэффициент расхода (из-за увеличения геометрической характеристики) примерно на 11,5%.

Проливка доработанной форсунки показала уменьшение коэффициента расхода на 11% (см. таблицу 1; форсунку № 2 дор.). Отсюда можно заключить, что наиболее правильным геометрическим критерием подобия центробежных форсунок с длинными камерами закручивания является геометрическая характеристика $\frac{R_k r_c}{nr_{вх}^2}$, а не $\frac{Rr_c}{nr_{вх}^2}$.

В заключение отметим, что рассмотренный выше вопрос представляет не только академический интерес. В настоящее время форсунки с длинными камерами закручивания, как правило, изготавливаются с жестким допуском на размер R и свободным допуском на размер R_k . (Это является следствием того, что основным геометрическим фактором, влияющим на расход, считается характеристика $\frac{Rr_c}{nr_{вх}^2}$). Исходя же из представленных здесь результатов

следует, что для обеспечения стабильного получения расхода необходимо, наоборот, более точно выполнять размер R_k , а не размер R .

Последнее к тому же является технологически более выгодным.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально показано, что геометрическую характеристику центробежной форсунки с длинной камерой закручивания следует определять через радиус камеры закручивания.

2. Аналитически найдена зависимость, позволяющая достаточно точно оценить истинный радиус закрутки потока в длинной камере закручивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бородин, Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, В. И. Ягодкин. Распыливание жидкостей. Издательство «Машиностроение», Москва, 1967.
2. Г. Н. Абрамович. «Прикладная газовая динамика», Госиздаттеорет. литературы, М., 1953.
3. Б. В. Новиков. Некоторые вопросы расчета центробежной форсунки. «Теплоэнергетика» № 5, 1966.