

5. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

5.1 Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре

Истечение жидкости через отверстия и насадки характерно тем, что в процессе истечения запас потенциальной энергии, которым обладает жидкость в резервуаре, превращается с большими или меньшими потерями в кинетическую энергию свободной струи.

Основным вопросом в данном случае является **определение скорости истечения и расхода жидкости** для различных форм отверстий и насадков.

Возьмем большой резервуар с жидкостью (рис. 5.1), который имеет малое отверстие в стенке на достаточно большой глубине H от свободной поверхности. Через отверстие жидкость вытекает свободной струей.

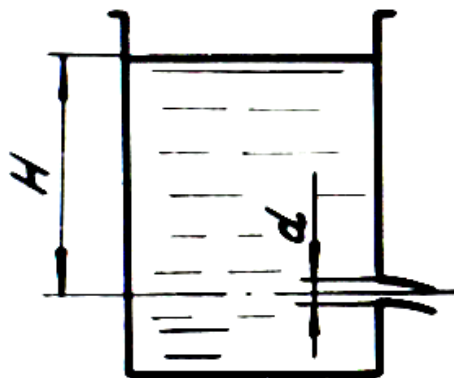


Рис. 5.1. Истечение жидкости из резервуара

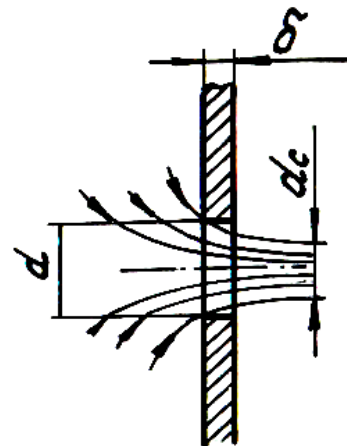


Рис. 5.2. Тонкая стенка

Малым отверстием называется такое, у которого диаметр d не превышает 0,1 величины напора H . При этом условии можно считать давление и скорость жидкости во всех точках отверстия одинаковыми.

Стенки подразделяются на тонкие и толстые. Тонкой стенкой (рис. 5.2) называют такую, толщина которой не влияет на характер истечения, т.е. отсутствуют путевые потери.

Опытами установлено, что толщина тонкой стенки не должна превышать 1,0...1,5 диаметра, т.е. $\delta < (1...1,5)d$.

Частицы жидкости (см. рис. 5.2) приближаются к отверстию из всего прилежащего объема, двигаясь ускоренно по различным плавным траекториям. Вытекающая из отверстия струя не сохраняет свою форму,

а постепенно деформируется, т.е. отрывается от стенки у кромки отверстия и несколько сжимается.

Цилиндрическую форму струя принимает на расстоянии $(0,5...1,0)d$ от плоскости отверстия. Сжатие струи обусловлено необходимостью плавного перехода от различных направлений движения частиц жидкости в резервуаре, в том числе от радиального направления движения по стенке, к осевому направлению движения в струе.

Коэффициентом сжатия называется отношение площади сжатого сечения струи S_c к площади отверстия S , т.е.

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S} = \left(\frac{d_c}{d} \right)^2. \quad (5.1)$$

Сжатие струи может быть полным и неполным. Полное сжатие – это всестороннее сжатие. Оно имеет место тогда, когда отверстие в достаточной мере удалено от боковых поверхностей стенок сосуда. Если же часть периметра отверстия совпадает с боковой стенкой или дном сосуда, то сжатие струи будет неполным. Полное сжатие может быть совершенным или несовершенным. Сжатие считается совершенным, если до ограждающих поверхностей будет не менее трех размеров отверстия, и несовершенным, если расстояние до стенок или дна – менее трех размеров отверстия.

Найдем скорость истечения и расход жидкости при истечении жидкости через малое отверстие в тонкой стенке (рис. 5.3).

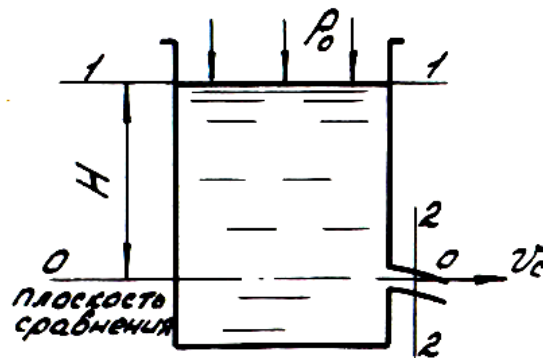


Рис. 5.3. Истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке

Возьмем сосуд с жидкостью. В стенке выполнено малое отверстие на глубине H от свободной поверхности жидкости. Возьмем два сечения 1–1 и 2–2 по свободной поверхности жидкости и в сжатом сечении струи соответственно.

За плоскость сравнения примем горизонтальную плоскость, проходящую через центр тяжести отверстия.

Составим уравнение Бернулли для сечений 1–1 и 2–2 в общем виде:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{пот}}, \quad (5.2)$$

где z_1 – геометрическая высота сечения 1–1, $z_1 = H$; P_1 – давление в сечении 1–1, $P_1 = P_0$; v_1 – скорость в сечении 1–1, скорость v_1 можно считать равной нулю, $v_1 = 0$, так как из уравнения расходов $v_1 S_1 = v_2 S_2$ следует, что $v_1 = \frac{v_2 S_2}{S_1}$, но так как $S_1 \gg S_2$, то $v_1 = 0$;

z_2 – геометрическая высота сечения 2–2, $z_2 = 0$; $P_2 = P_{\text{ат}}$; α_1 – коэффициент Кориолиса в сечении 1–1, $\alpha_1 = 1,0$; α_2 – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей в сжатом сечении, при равномерном распределении скоростей в струе $\alpha_2 = \alpha_c = 1,0$; v_2 – скорость в сжатом сечении струи, $v_2 = v_c$; $h_{\text{пот}}$ – потери напора при движении жидкости через отверстие.

Потери напора (удельной энергии) при движении жидкости через отверстие вызываются местными сопротивлениями, т.е. можно определять по формуле Вейсбаха:

$$h_{\text{пот}} = \xi \frac{v_c^2}{2g}, \quad (5.3)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления отверстия.

С учетом вышеизложенного уравнение Бернулли (5.2) запишется следующим образом:

$$H + \frac{P_0}{\gamma} = \frac{P_{\text{ат}}}{\gamma} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \frac{v_c^2}{2g},$$

$$\text{или} \quad H + \frac{P_0 - P_{\text{ат}}}{\gamma} = \frac{v_c^2}{2g} (\alpha_c + \xi). \quad (5.4)$$

Решим уравнение (5.4) относительно скорости v_c , получим

$$v_c = \frac{\sqrt{2g \left(H + \frac{P_0 - P_{\text{ат}}}{\gamma} \right)}}{\sqrt{\alpha_c + \xi}}. \quad (5.5)$$

Обозначим через φ выражение: $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \xi}}$, которое называется коэффициентом скорости.

Обозначим через H_0 (расчетный напор) величину: $H_0 = H + \frac{P_0 - P_{\text{ат}}}{\gamma}$.

После подстановки указанных выражений в формулу для скорости, v_c , получим

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH_0}. \quad (5.6)$$

Обычно коэффициент скорости принимает значения $\varphi = 0,97 \dots 0,98$ ($\xi = 0,06$). В случае истечения идеальной жидкости $\xi = 0$, $\varphi = 1,0$ и теоретическая скорость истечения равна $v_T = \sqrt{2gH_0}$.

Таким образом, коэффициент φ есть отношение действительной скорости истечения к теоретической:

$$\varphi = \frac{v_c}{\sqrt{2gH_0}} = \frac{v_c}{v_T}. \quad (5.7)$$

Действительная скорость истечения всегда меньше теоретической за счет сопротивления, следовательно, коэффициент φ всегда меньше 1,0.

Расход жидкости найдем как произведение действительной скорости истечения на фактическую площадь сечения струи:

$$Q = v_c S_c. \quad (5.8)$$

Подставив в формулу (5.8) выражения для S_c из формулы (5.1) и v_c из формулы (5.6) получим:

$$Q = \varepsilon S \varphi \sqrt{2gH_0}, \quad (5.9)$$

где S – площадь отверстия; ε – коэффициент сжатия струи.

Произведение ε и φ принято обозначать буквой μ и называть коэффициентом расхода:

$$\mu = \varepsilon \varphi. \quad (5.10)$$

Окончательно выражение для расхода жидкости запишется в виде

$$Q = \mu S \sqrt{2gH_0}. \quad (5.11)$$

Полученное выражение является основным для данного раздела. Оно решает основную задачу – определяет расход. Применимо для всех случаев истечения.

Экспериментально установлено, что значение коэффициента μ колеблется в пределах 0,59...0,63, составляя в среднем 0,61. Из уравнения (5.11) следует, что $\mu = Q/S\sqrt{2gH_0} = Q/Q_T$. Это значит, что коэффициент расхода есть отношение действительного расхода к теоретическому, т.е. к тому расходу, который имел бы место при отсутствии сжатия струи и сопротивления.

Следует иметь в виду, что $Q_T = S\sqrt{2gH_0}$ не есть расход при истечении идеальной жидкости, т.к. сжатие струи будет иметь место и при отсутствии гидравлических потерь.

5.2. Истечение жидкости через насадки

Насадком называют короткую трубу, присоединенную к отверстию в тонкой стенке. Длина насадка равна трем–шести диаметрам отверстия, т.е. $l = (3...6)d$.

По форме насадки бывают (рис. 5.6): внешние цилиндрические (I тип), внутренние цилиндрические (II тип), конические сходящиеся (III тип), конические расходящиеся (IV тип), коноидальные (V тип).

Расход жидкости через насадок определяется по формуле расхода через малое отверстие в тонкой стенке, где коэффициент расхода μ принимают в зависимости от формы насадок.

Насадки типов I, II, IV применяют для увеличения пропускной способности отверстия. Насадки типов III, V применяют для изменения кинетической энергии струи.

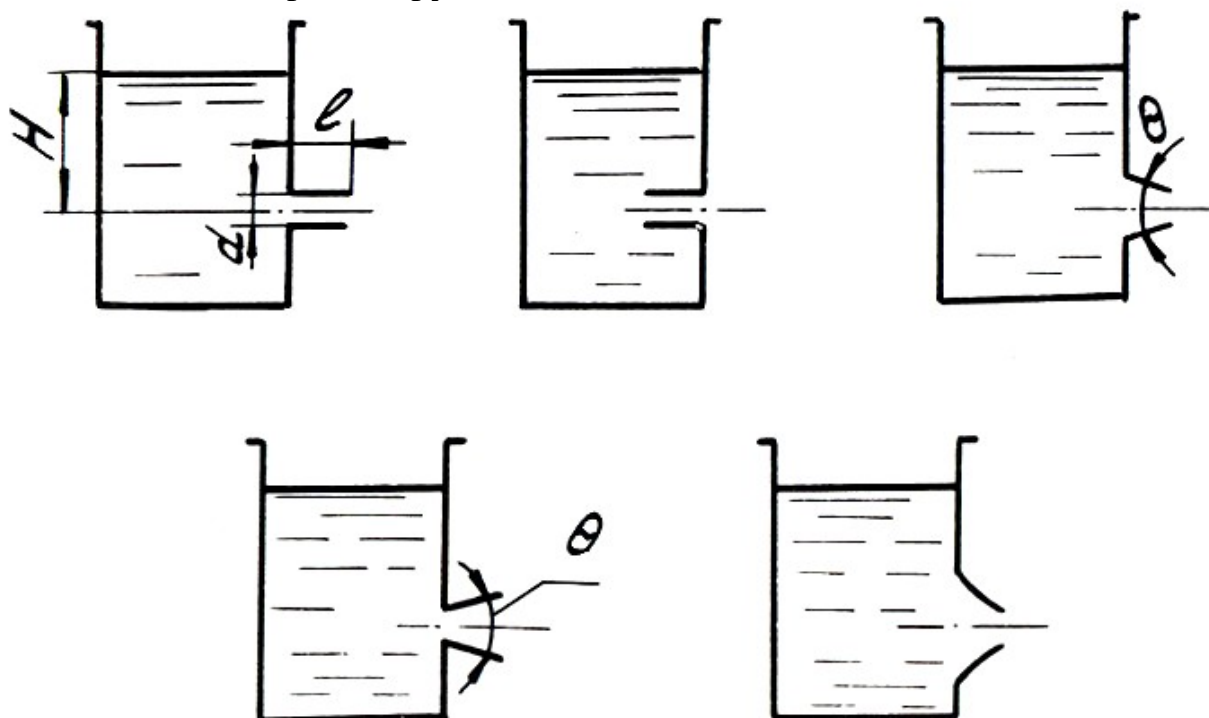


Рис. 5.6. Типы насадков

В табл. 5.1 приведены численные значения коэффициентов расхода μ , скорости φ , сжатия ε и сопротивления ξ для насадков различных типов.

Таблица 5.1

Тип насадков	Численные значения коэффициентов			
	μ	φ	ε	ξ
I – внешний цилиндрический	0,82	0,82	1,0	0,5
II – внутренний цилиндрический	0,71	0,71	1,0	1,0
III – конический сходящийся при $\theta = 13^{\circ}24'$	0,94	0,96	0,98	0,09...0,06
IV – конический расходящийся при $\theta \geq 5...7^{\circ}$	0,45...0,50	0,45...0,50	1,0	4...3
V – коноидальный	0,98	0,98	1,0	0,04
Малое отверстие круглого сечения в тонкой стенке	0,62	0,97	0,64	0,06

