

Л. А. Каримов, В. А. Булкин

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЩЕЛЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ

Ключевые слова: водосливы, емкость-реактор, истечение.

Рассмотрена лабораторная установка, представляющая собой емкость-реактор, из которого производится непосредственно истечение (процесс смешивания); щелевая насадка, с заданными размерами установлена на стенке реактора, для изучения определенного вида истечения или смешивания жидкостей.

Keywords: spillways, capacity-reactor outflow.

Considered laboratory facility, which is a capacity reactor, from which the outflow directly (mixing process) crevice tool, of a given size is installed on the wall of the reactor to study a particular type or expiration mixing liquids.

Истечение жидкостей из круглых отверстий и насадок в процессах и аппаратах химической технологии рассмотрено достаточно широко, но недостаточная изученность теории истечения жидкостей из отверстий прямоугольного сечения сдерживает расчет и развитие проектирования гидродинамических смесителей, для смешивания трудносмешиваемых и несмешивающихся жидкостей, в которых отверстия такого вида используются.

Водосливом принято называть безнапорное отверстие (водосливное отверстие)- вырез, сделанный в гребне стенки, через который протекает жидкость. Часть стенки в пределах водосливного отверстия, через которую переливается жидкость, называется водосливной стенкой. Речные водосливы являются прототипом щелевых отверстий.

Водосливы классифицируются по ряду признаков.

В зависимости от геометрической формы водосливного отверстия различают: прямоугольные, треугольные, трапециевидные, круговые, параболические, с наклонным гребнем.

В зависимости от формы и размеров поперечного сечения водосливной стенки различают:

- водосливы с тонкой стенкой; в случае этих водосливов, струя воды переливающаяся через водосливную стенку, формируется под действием только верхней ее грани; остальные поверхности водосливной стенки не влияют на картину истечения; при наличии вертикальной стенки, водослив с тонкой стенкой имеет место, когда $\delta \leq (0.1-0.5)H$;

- водосливы с широким порогом, имеющие водосливную стенку любой высоты, гребень которой обычно представляет собой горизонтальную плоскость. В случае прямоугольных водосливов с широким порогом, толщина стенки лежит в пределах $2H \leq \delta \leq 8H$.

- водосливы со стенкой практического профиля.

В зависимости от очертания гребня водосливной стенки в плане. Различают водосливы с прямолинейным в плане гребнем: прямые (лобовые), косые, боковые.

В зависимости от влияния нижнего бьефа на истечение. Различают неподтопленные водосливы (Q и H не зависят от глубины h_n в нижнем бьефе), и подтопленные водосливы (Q и H зависят от глубины h_n в нижнем бьефе).

В зависимости от соотношения b и B_0 (относится лишь к прямоугольным водосливам):

- водосливы без бокового сжатия, когда $b = B_0$

- водосливы с боковым сжатием, когда $b < B_0$

В зависимости от наклона водосливной стенки:

- водосливы с вертикальной стенкой;

- водосливы с наклонной стенкой;

В зависимости от степени свободы доступа воздуха под струю жидкости, переливающуюся через водосливную стенку:

- водосливы со свободным истечением, со свободным доступом воздуха с боков в пространство под струю (или воды нижнего бьефа, в случае, если, уровень воды нижнего бьефа стоит выше гребня водослива)

- водослив с несвободным истечением, когда в подструйное пространство доступ воздуха (или воды нижнего бьефа) затруднен.

В данной работе предпринята попытка исследования вертикального водослива подтопленного и неподтопленного типа, для которых ширина отверстия на порядок меньше высоты.

Для исследования разработана лабораторная установка, представляющая собой емкость-реактор, из которого производится непосредственно истечение (процесс смешивания); щелевая насадка, с заданными размерами установлена на стенке реактора, для изучения определенного вида истечения или смешивания жидкостей; насосом осуществляется подача воды и создается требуемых расход. Кроме того, к установке подведена линия слива, для создания и поддержания необходимого уровня жидкости.

В процессе истечения жидкости в данной установке, отверстие предполагается малым, по сравнению с напором H и размерами резервуара и свободная поверхность жидкости не влияют на приток струи жидкости к отверстию, т.е.

наблюдается совершенное сжатие струи.

Степень сжатия оценивается коэффициентом сжатия \square , равным отношению площади поперечного сечения струи в месте сжатия к площади отверстия:

$$\varepsilon = w_c / w_0. \quad (1.1)$$

После преобразований находим:

$$v = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad (1.2)$$

где φ – коэффициент скорости (для отверстия в тонкой стенке $\varphi = 0,97$)

Обычно площадь реактора намного больше площади отверстия, поэтому скорость V_0 практически незначительна и ею можно пренебречь, тогда формула примет простой вид:

$$v = \varphi \sqrt{2gH} \quad (1.3)$$

Распределение скоростей по сечению струи является равномерным лишь в средней части сечения (в ядре струи), наружный же слой жидкости несколько заторможен вследствие трения о стенку. Как показывают опыты, скорость в ядре струи практически равна теоретической, поэтому введенный коэффициент φ следует рассматривать как коэффициент средней скорости. Если истечение происходит в атмосферу, то давление по всему сечению цилиндрической струи равно атмосферному.

Расход жидкости в сжатом сечении можно определить из уравнения неразрывности:

$$Q = w_{сж} V \quad (1.4)$$

Практически удобнее пользоваться вместо $w_{сж}$ произведение $w\varepsilon$ где ε коэффициент сжатия для малых отверстий, равный 0,6–0,64), таким образом, можно записать:

$$Q = \varepsilon \varphi \omega \sqrt{2gH} \quad (1.5)$$

Произведение ε на φ принято обозначать буквой μ и называть коэффициентом расхода, подставив $\mu = \varepsilon \varphi$ получим формулу для расчета расхода жидкости при истечении ее в атмосферу через отверстия и насадки:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} = \mu \omega \sqrt{2gp/r} \quad (1.6)$$

где p – расчетное давление, под действием которого происходит истечение жидкости.

На основе опытов установлено, что для малого отверстия в тонкой стенке μ колеблется от 0,59 до 0,63, или в среднем $\mu = 0,61$. Это выражение применимо для всех случаев истечения, трудность заключается в достаточно точной оценке коэффициента расхода μ . Из уравнения следует, что:

$$\mu = Q / \omega \sqrt{2gH} \quad (1.7)$$

Это значит, что коэффициент расхода также представляет собой отношение действительного расхода к теоретическому, который имел бы место при отсутствии сжатия струи и сопротивления, но теоретический расход не является расходом при истечении идеальной жидкости, так как, сжатие струи будет иметь место и при отсутствии гидравлических потерь.

Т.о. действительный расход всегда меньше теоретического, следовательно, коэффициент расхода всегда меньше 1 вследствие влияния двух факторов: сжатия струи и сопротивления. В одних

случаях больше влияет первый фактор, в других – второй.

При истечении жидкостей через затопленные отверстия, вся кинетическая энергия струи теряется на вихреобразование, как при внезапном расширении. Для затопленного отверстия формулы для определения скорости и расхода имеют тот же вид, что и для незатопленного отверстия. Разница заключается в том, что под величиной подразумевается в случае затопленного отверстия не глубина погружения, а разность уровней в резервуарах:

$$Q = \mu_{нec} \omega \sqrt{2g\Delta H_0} \quad (1.8)$$

где $\mu_{нec}$ – коэффициент расхода затопленного отверстия, определяемый по формуле А.Д.Альштуля:

$$\mu = \square / \mu_3 = \square / \sqrt{2\varepsilon^2 m^2 - \varepsilon^2 n^2 + \zeta + 1 - 2nm} \quad (1.9)$$

где $n = \omega / \Omega$ отношение площади отверстия к площади сечения потока выше отверстия, $m = \omega / \Omega_2$ то же ниже отверстия. Для отверстий малых размеров по сравнению с резервуарами ($n \rightarrow 0$, $m \rightarrow 0$):

$$\mu_3 = \square / \sqrt{2gH_0} \quad (2.0)$$

т.е. совпадает со значением коэффициента расхода при незатопленном истечении (истечении в атмосферу).

Коэффициент сжатия струи ε и коэффициент сопротивления ζ при истечении при затопленном отверстии практически не отличается от соответствующих коэффициентов при истечении через незатопленное отверстие. Опыт показывает, что коэффициент расхода μ при истечении через затопленное отверстие можно принимать равным коэффициенту μ для незатопленного отверстия.

На изображенной схеме, рис. 1, истечение происходит следующим образом: вода, скопившись перед стенкой водослива, переливается через щель, сделанную в стенке водослива.

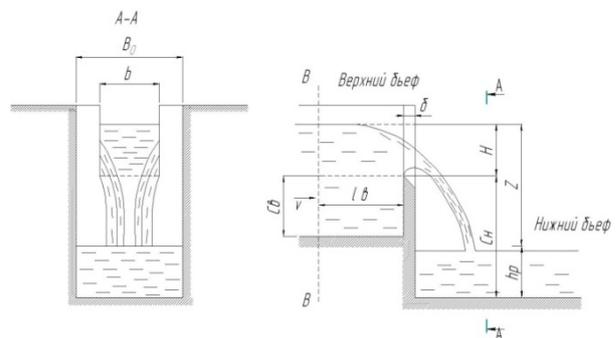


Рис. 1 - Геометрические размеры: b – ширина водосливного отверстия; δ – толщина водосливной стенки; $Св$, $Сн$ – высоты водосливной стенки в верхнем и нижнем бьефах; B_0 – ширина русла, в котором установлен водослив; Z – геометрический перепад на водосливе (разность горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах); v – скорость подхода, средняя скорость, измеряемая в указанном выше сечении В-В

Верхним бьефом называется область потока перед водосливной стенкой, нижним бьефом называется область потока за водосливной стенкой. Сечение В-В- сечение на расстоянии l_v , в котором начинается заметный спад свободной поверхности. Как правило, $l_v = (3-5)H$.

Величина H , измеряемая в сечении В-В, называется геометрическим напором на водосливе. Геометрический напор на водосливе представляет собой превышение над гребнем водосливной стенки горизонта воды в сечении В-В, где еще нет заметного спада свободной поверхности, обусловленного истечением воды через водослив.

В данной работе рассматривается прямоугольный водослив, с вертикальной тонкой стенкой. Рассматриваются подтопленные и неподтопленные водосливы с боковым сжатием.

Назначением данной лабораторной установки является изучение процессов истечения жидкостей из щелевых насадок, водосливов, а так же для изучения процессов смешивания не смешивающихся или трудносмешиваемых жидкостей.

Главным условием при проектировании установки для изучения истечения жидкостей из насадок, являлось создание и учет условий подтопления, влияния порога водослива, необходимого вертикального и бокового сжатия, совершенного сжатия струи, т.е. исключения влияния боковых стенок и дна резервуара на процесс истечения жидкости из затопленного и незатопленного щелевого отверстия.

При исследовании истечения жидкостей, одним из исследуемых параметров является анализ и изучение вида насадки, ее геометрии и расположение, определение коэффициента расхода, зависящего напрямую от геометрического напора (расхода подаваемой жидкости, относительного перепада бьефов), параметров и типа насадки (коэффициентов сжатия).

Установка состоит из емкости-реактора, из которой производится непосредственно истечение (процесс смешивания), щелевой насадки, с заданными размерами, для изучения определенного вида истечения или смешивания жидкостей, емкостей из которых происходит подача жидкостей для смешивания, и насоса для подачи воды и осуществления процесса циркуляционного перемешивания. Кроме того, к установке подведены линия подачи воды и линия слива, для создания и поддержания необходимого уровня жидкости.

Так же на линиях установлены регулирующие вентили для осуществления общей функциональности лабораторной установки и регуляции расхода компонентов при изучении процессов смешивания.

Достижение условий подтопления и неподтопления при исследовании достигалось изменением вариантов компоновки подачи жидкости в емкость-реактор. Для определения коэффициента расхода производится исследование истечения при различных величинах

геометрического напора на водосливе и расходах воды. Кроме того, при данном исследовании производится анализ вида истекающей струи и величина ее вылета, как факторов способных оказывать влияние на процесс истечения жидкости.

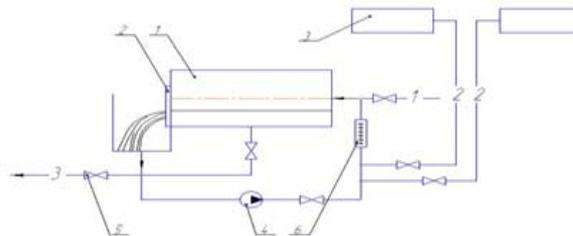


Рис. 2 - Схема изучения истечения жидкостей через неподтопленный водослив. 1 - емкость-реактор, 2 - насадка щелевая, 3 - резервуар для хранения подачи жидкостей для смешивания, 4 - насос на линии нагнетания, 5 - регулирующие вентили, 6 – ротаметр. -1- Линия подачи воды, -2- линия подачи жидкостей смешивания, -3- линия слива

В реактор 1 производится подача воды, по линии -1- до определенного уровня, из которого через насадку 2 происходит истечение жидкости. Вода циркулирует в установке по замкнутому контуру при помощи насоса 4. Измерение расхода производится при помощи ротаметра 6, регулирование осуществляется вентилем, находящимся на линии нагнетания.

Слив жидкости из установки осуществляется по линии слива -3-.

При использовании установки по рис.1 вентиль на линии нагнетания воды в реактор, при работе насоса всегда должен быть открыт

Достоинством установки является возможность имитации работы смесительных устройств в аппаратах типа «Смекон» [6, 7], применяющихся для получения эмульсий и суспензий из трудно смешивающихся компонентов.

Действительный расход, теоретический расход, коэффициент расхода и число Рейнольдса при свободном истечении жидкости определяются следующим образом:

$$Q_d = V/t, \quad (2.1)$$

где Q_d - действительный расход($м^3/сек$); t - время истечения($сек$); V -объем истечения($м^3$).

$$Q_T = \frac{2}{3} \mu b H \sqrt{2gH} \quad (2.2)$$

где Q_T - теоретический расход($м^3/сек$), μ - коэффициент расхода, b - ширина щели($м$), H - высота уровня жидкости($м$)

$$\mu = Q_d/Q \quad (2.3)$$

$$w_{cp} = Q_d/ba \quad (2.4)$$

$$d_{эKB} = b \cdot a / 2(b \cdot a) \quad (2.5)$$

$$Re = w_{cp} \cdot d_{эKB} \cdot \rho / \mu \quad (2.6)$$

где a - высота щели ($м$), w_{cp} - средняя скорость($м/с$), $d_{эKB}$ -эквивалентный диаметр щели($м$), ρ -плотность жидкости($кг/м^3$), μ -динамический коэффициент вязкости($МПа \cdot с$).

На основе расчетов получены следующие графики:

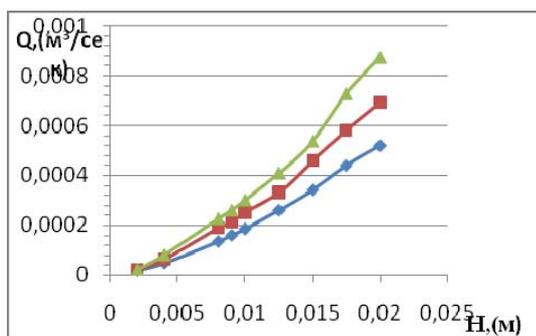


Рис. 3 - График зависимости расхода от высоты уровня жидкости для щелей размерами: ♦-2x100 ■-2,7x100 ▲-3,4x100(мм)

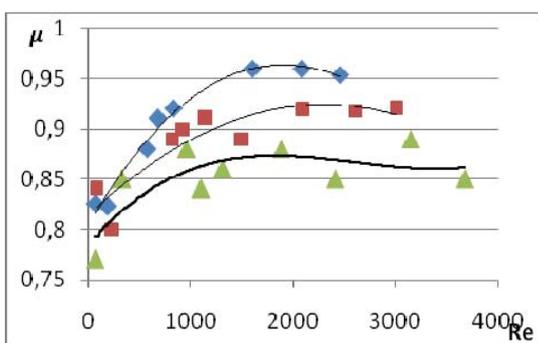


Рис. 4 - График зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса для щелей размерами: ♦-2x100 ■-2,7x100 ▲-3,4x100(мм)

Из графиков видно что с увеличением высоты уровня жидкости расход практически линейно возрастает. А при $Re \approx 2000$ стабилизируется

коэффициент расхода, что вероятно является признаком перехода истечения в турбулентный режим.

Литература

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. -4е изд., доп. и перераб.- Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. -672 с.
2. Касаткин Г.К. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М: «Химия», 1973.-754 с.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М: «Химия», 1981.
4. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник / Под общ. Ред. А.М. Курганова. - 3-е изд., перераб. И доп. - Л.: Стройиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986. - 440с.
5. Примеры расчета по гидравлике. Учеб. Пособие для вузов. Под ред. А.Д. Альштуля. - М.: Стройиздат, 1976. - 255 с.
6. Смирнов С.А., Реут В.И., Егоров А.Г., Булкин В.А. Коэффициент расхода при истечении идеальной жидкости из вертикального щелевого отверстия. Тепло- и массообменные процессы, энергетика // Вестник КГТУ. 1998. №2.
7. Смирнов С.А., Реут В.И., Яшин Ю.Н., Булкин В.А. Расчет и проектирование щелевого смесителя для гомогенизации ингибиторных растворов. Нефтяное хозяйство. 1999. № 1
8. Валеев С.И., Степанов Н.И., Иванов Н.В., Булкин В.А. Гидродинамика цилиндрических гидроциклонов с малым расходом через верхний слив // Вестник КГТУ. 1998. № 2.

© Л. А. Каримов - магистрант каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, karimov-lenar@mail.ru;
В. А. Булкин – д-р техн. наук, проф. той же кафедры.