

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Л. И. Мельникова

ГИДРАВЛИКА

ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области сельского хозяйства
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений, обеспечивающих получение
высшего образования I ступени по специальностям
1-74 05 01 Мелиорация и водное хозяйство,
1-74-04-01 Сельское строительство и обустройство территорий*

Горки
БГСХА
2020

УДК 532.5(075.8)

ББК 30.123я73

М34

*Рекомендовано методической комиссией
мелиоративно-строительного факультета 19.02.2020 (протокол № 6)
и Научно-методическим советом БГСХА 26.02.2020 (протокол № 6)*

Автор:

старший преподаватель *Л. И. Мельникова*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *И. В. Качанов*;
кандидат технических наук, доцент *А. С. Анженков*

Мельникова, Л. И.

М34

Гидравлика. Практикум : учебно-методическое пособие /
Л. И. Мельникова. – Горки : БГСХА, 2020. – 147 с.
ISBN 978-985-7231-84-3.

Приведены задания, описание конструкций лабораторных установок, средств измерений, последовательность проведения опытов и обработки результатов, контрольные вопросы.

Для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования I ступени по специальностям 1-74 05 01 Мелиорация и водное хозяйство, 1-74-04-01 Сельское строительство и обустройство территорий.

УДК 532.5(075.8)

ББК 30.123я73

ISBN 978-985-7231-84-3

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2020

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по гидравлике содержит пояснения по теории изучаемых вопросов, формулировку задач лабораторных исследований, описание опытных установок и применяемых средств измерений, последовательность проведения опытов и вычислений, контрольные вопросы.

Практикум предназначен для студентов инженерных специальностей сельскохозяйственных вузов как пособие при выполнении лабораторных работ по курсу «Гидравлика». Каждая лабораторная работа выполняется независимо от других работ, т. е. можно выполнять их избирательно, в соответствии с учебной программой для данной специальности в зависимости от объема курса гидравлики, читаемого на факультете, а также от возможностей гидравлической лаборатории.

Описание каждой лабораторной работы состоит из четырех основных частей:

- 1) общие сведения по теме, которой посвящена работа;
- 2) цель и задачи лабораторной работы;
- 3) описание опытной установки и порядок выполнения работы;
- 4) заполнение журнала измерений и обработка опытных данных с последующими выводами к лабораторной работе.

Методика и порядок проведения лабораторных работ описаны с расчетом на выполнение студентами полного объема работы самостоятельно. Обеспечению самостоятельности при проведении лабораторной работы и хорошему усвоению материала способствует условие, при котором состав группы, проводящей работу на экспериментальной установке, не превышает 10–12 студентов.

При составлении практикума предусматривалась простота изложения материала, чтобы он мог служить пособием также для студентов-заочников, самостоятельно изучающих курс гидравлики.

В практикуме набор лабораторных работ и описание лабораторных установок приводятся согласно имеющемуся оборудованию в лаборатории общей гидравлики УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».

ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Порядок выполнения и оформления работ

При проведении лабораторных работ студент должен иметь журнал, который может быть составлен по образцам, приведенным в практикуме.

Перед началом конкретной лабораторной работы необходимо уяснить ее содержание и последовательность наблюдений и измерений. Общие сведения по теме, приведенные в начале каждой работы, изъяснены кратко, конспективно, с расчетом на то, что поставленная в лабораторной работе тема теоретически рассмотрена и студентом усвоена. Если теоретический материал темы не усвоен, то рекомендуется перед началом лабораторной работы ознакомиться с ним подробнее по соответствующему разделу курса гидравлики.

В журнале, прежде всего, вычерчивается схема экспериментальной установки с ее основными деталями и размерами. Выписываются основные формулы и зависимости, необходимые для вычислений определяемых в работе величин.

При вычислениях надо внимательно следить за правильной размерностью величин, подставляемых в формулы. Следует заметить, что ошибки студентов при обработке опытных материалов чаще всего происходят из-за несоответствия размерности величины в уравнениях. В расчетах необходимо использовать размерность величин в международной системе единиц измерений (СИ).

Если определяемая опытным путем величина может быть вычислена по теоретической или эмпирической формуле, то полученный опытный результат надо сравнить с вычисленным по формуле (со ссылкой на автора формулы).

Все наблюдения, измерения и вычисления во время опыта проводятся студентами самостоятельно. Преподаватель контролирует проведение опыта, обработку материала наблюдений и измерений и принимает выполненную работу. При сдаче работы студент должен дать качественную оценку результатов лабораторной работы.

Точность измерений

При проведении опытов следует твердо знать, с какой погрешностью можно измерить величины, определяющие искомую характеристику, и какова будет их точность.

Известно, что при выполнении измерений могут допускаться ошибки трех видов:

1) грубые ошибки как следствие описки, просчета, неправильного использования измерительного прибора, несоответствия размерностей величин при вычислениях и т. п.;

2) систематические погрешности вследствие неточности постоянных прибора (смещение места нуля, наличие воздуха в подводящих трубках пьезометров и т. п.);

3) случайные погрешности, вызванные неточностью отсчетов в ту или другую сторону, неизбежно допускаемые наблюдателем. Ошибки первых двух видов могут быть сведены к минимуму при соответствующем внимании исполнителя, контроле записей и выверке инструментов. Снижение величин ошибок третьего вида достигается повторностью измерений.

Пусть, например, при измерении уровня воды по пьезометру сделано n отсчетов: H_1, H_2, \dots, H_n . Тогда среднеарифметический результат $H = \sum H_i/n$, ошибка каждого измерения $\Delta H_i = H_1 - H$, средняя ошибка $\Delta H = \sum H_i/n$, а относительная погрешность измерений $\Delta H/H$.

В учебной лабораторной работе обычно из-за дефицита времени приходится ограничиваться двух- или трехкратной повторностью опыта, что соответствующим образом сказывается на точности измерения величины.

Если искомая характеристика зависит от нескольких измеряемых величин, то по теории ошибок относительная погрешность ее определяется как сумма относительных погрешностей этих величин. Рассмотрим это на примере определения коэффициента расхода μ при истечении жидкости через круглое отверстие в стенке или насадок. Как известно, в этих случаях

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH_0}},$$

где Q – расход;

$\omega = \pi d^2 / 4$ – площадь живого сечения, имеющего диаметр d ;

H_0 – расчетный напор;

g – ускорение свободного падения.

Поэтому относительная погрешность вычисления коэффициента расхода μ будет равна сумме относительных погрешностей измерения расхода, диаметра выходного сечения, расчетного напора:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{1}{2} \frac{\Delta H_0}{H_0}.$$

Цифры 2 и 1/2 учитывают степень соответствующей величины в формуле коэффициента расхода.

Если определяемая опытным путем величина может быть вычислена по теоретической или эмпирической формуле, то полученный опытный результат ($A_{\text{оп}}$) нужно сравнить с вычисленным по формуле ($A_{\text{т}}$), определив относительную разность (%):

$$\Delta A = (A_{\text{т}} / A_{\text{оп}} - 1) \cdot 100.$$

1. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Давлением называют физическую величину, характеризующую напряжение в жидкости, т. е. равную силе, приходящейся на единицу площади. В энергетическом смысле давление представляет собой энергию, содержащуюся в единице объема жидкости. За единицу давления в системе СИ принят паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Ньютон (Н) – сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

Различают давление атмосферное, избыточное, абсолютное, вакуумметрическое.

Атмосферное давление – это давление столба воздуха на уровне моря. Для измерения его применяются приборы, называемые барометрами.

Так как приборы для измерения давлений чаще всего используются в атмосферных условиях, то за точку отсчета удобно принимать атмосферное давление. Давление, отсчитываемое от атмосферного в положительную сторону (выше атмосферного), называется избыточным или манометрическим ($p_{\text{и}}$, $p_{\text{ман}}$). Для измерения избыточного давления применяются приборы, называемые манометрами.

Сумму атмосферного и избыточного давлений называют абсолютным или полным давлением ($p_{\text{полн}}$). Если абсолютное давление меньше атмосферного, то их разность называют вакуумметрическим давлением ($p_{\text{вак}}$). Приборы для измерения вакуумметрического давления называются вакуумметрами.

Давление в любой точке покоящейся однородной жидкости можно вычислить по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.1)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, так называемое внешнее давление;

ρgh – давление столба жидкости, так называемое весовое, или гидростатическое, давление;

ρ – плотность жидкости;

h – глубина погружения точки под уровень жидкости.

Если в уравнении (1.1) $p_0 = p_{ат}$, а $p > p_{ат}$, то избыточное давление $p_{и} = p - p_{ат} = \rho gh$. В случае когда $p_0 = p_{ат}$, то вакуумметрическое давление $p_{вак} = p_{ат} - p = \rho gh$. Поэтому небольшие величины как избыточного, так и вакуумметрического давления можно измерить по высоте h столба жидкости в стеклянной трубке, один конец которой присоединяется к месту, где определяется давление, а второй сообщается с атмосферой (рис. 1.1, а, б, в). Простейший жидкостный манометр, изображенный на рис. 1.1, а, называется пьезометром. При значительных величинах избыточного или вакуумметрического давлений применяются U-образные стеклянные трубки, заполненные ртутью (рис. 1.1, б, в). Избыточное давление в точке А (рис. 1.1, б) согласно основному уравнению гидростатики вычисляется по формуле

$$p_A = g(\rho_{рт} h - \rho h_1), \quad (1.2)$$

где $\rho_{рт}$, ρ – соответственно плотности ртути и жидкости, давление в которой измеряется.

Вакуумметрическое давление в газовой среде (рис. 1.1, в)

$$p_{вак} = \rho_{рт} gh. \quad (1.3)$$

Так как плотность газа составляет весьма мизерную долю от плотности ртути, то влиянием высоты его столба в соединительном трубопроводе пренебрегают.

Однотрубные (чашечные) манометры (рис. 1.1, г) аналогичны U-образным, но одна часть трубки у них заменена сосудом значительно большего диаметра (чашкой), что позволяет сглаживать колебания уровня и делает более удобным измерение (от нуля, расположенного на уровне свободной поверхности). При небольших давлениях для повышения точности отсчета применяются чашечные манометры с наклонной трубкой (микроманометры), что увеличивает длину шкалы. В этом случае измеряемое избыточное давление

$$p = \rho gl \sin \alpha. \quad (1.4)$$

Для измерения разности давлений в двух точках используется дифференциальный манометр (рис. 1.1, *д*). Он представляет собой U-образную трубку, заполненную жидкостью с значительно большей плотностью, чем в местах измерения давления (чаще всего ртутью). Разность давлений (рис. 1.1, *д*)

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (\rho_{рт} - \rho)gh. \quad (1.5)$$

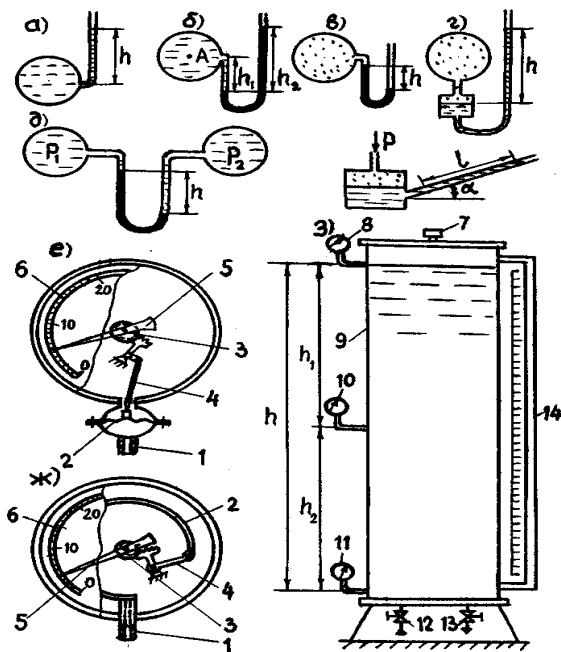


Рис. 1.1. Схема опытной установки

Для измерения больших давлений применяются механические манометры. Из них наиболее распространены пружинные манометры. На рис. 1.1, *ж* представлена схема манометра с трубчатой одновитковой пружиной. Трубчатая пружина имеет в сечении овальную форму, изготавливается из латуни или стали. Один конец витка ее закреплен в штуцере 1, соединенном с измеряемой средой. Второй, запаянный конец пружины, через тягу 4 и зубчатую передачу 3 соединен со стрел-

кой 5. При повышении давления в полости пружины она разгибается и поворачивает стрелку относительно шкалы 6. В приборах, самопишущих или с дистанционной передачей показаний, применяются многовитковые трубчатые пружины.

Манометр, схема которого представлена на рис. 1.1, *е*, отличается тем, что основной рабочий элемент его – пружина 2 – имеет пластинчатую форму. Пружина зажата между двумя половинами корпуса. Нижняя полость соединяется через штуцер 1 с измеряемой средой, верхняя – сообщается с атмосферой. При повышении давления в нижней полости пружина прогибается и через шток 4, зубчатую передачу 3 воздействует на стрелку 5, которая поворачивается по шкале 6.

Механические пружинные вакуумметры работают по тому же принципу, что и пружинные манометры. Различие лишь в том, что трубчатая или пластинчатая пружина под действием вакуума перемещается в противоположную сторону. Выпускаются также комбинированные приборы – мановакуумметры, позволяющие измерять как избыточное, так и вакуумметрическое давления. В них нуль расположен в середине шкалы. При избыточном давлении стрелка перемещается в сторону положительных, а при вакуумметрическом давлении – в сторону отрицательных значений.

Выпускаются также пружинные дифференциальные манометры. Принцип действия такого прибора можно пояснить, используя рис. 1.1, *е*. Если нижнюю камеру (под пружиной) соединить трубкой с одной точкой измеряемой среды, а верхнюю (над пружиной) – с другой точкой, то прогиб пружины будет соответствовать разности давлений в измеряемых точках, что и определится по положению стрелки 5 на шкале 6. Чтобы стрелка перемещалась по шкале в нужном направлении, штуцер с большим давлением помечается знаком «+», а с меньшим – знаком «-».

Для измерения небольших величин давления и разрежения выпускаются также механические сильфонные манометры и вакуумметры. Чувствительным элементом у них является сильфон, представляющий собой гофрированную тонкостенную трубку из высокопрочного сплава, которая помещена в корпус. При изменении давления меняется длина сильфона. Перемещение свободного конца сильфона посредством тяги передается стрелке прибора.

Для измерения давлений в различных пределах выпускаются также электрические манометры, принцип действия которых основан на ис-

пользовании различного рода электрических явлений: на способности пьезоэлектрических материалов создавать электродвижущую силу, тензорезисторов менять электрическое сопротивление под нагрузкой и др.

Такие приборы обычно имеют более сложную конструкцию.

Задачи исследования:

- 1) изучить конструкции приборов для измерения избыточного и вакуумметрического давлений;
- 2) создавая в лабораторной установке различные давления, измерить их применяемыми приборами;
- 3) используя основное уравнение гидростатики, вычислить давления в местах подключения приборов, сопоставить их с опытными величинами.

Лабораторная установка. Сосуд, представляющий собой вертикальную трубку 9 (рис. 1.1, з), закрытую с обоих торцов крышками, заполняется водой через вентиль 12 из напорного бака лаборатории или насосной станции, что позволяет создавать в нем избыточные давления различной величины. При выпуске части воды через вентиль 13 вверху сосуда образуется вакуум. Для измерения избыточных давлений в нижней и средней частях сосуда присоединены манометры 11 и 10, а в верхней – мановакуумметр 8. Уровень воды в сосуде определяется по пьезометру 14. Открыв пробку 7 в верхней крышке, можно создать атмосферное давление на свободной поверхности воды.

Проведение опытов. Всего проводятся три опыта, различающихся между собой величинами давлений в сосуде, в приведенном ниже порядке.

1. При открытых вентиле 12 и пробке 7, закрытом вентиле 13 сосуд 9 заполняется водой полностью, затем пробка 7 закрывается, создается избыточное давление в точке присоединения мановакуумметра 8. Измеряются давления манометрами 10, 11 и мановакуумметром 8.
2. Открывается вентиль 13 и выпускается часть воды из сосуда 9, чтобы прибор 8 показывал вакуумметрическое давление и $h > h_2$, вентили 13 и 12 закрываются, проводится измерение давлений приборами 8, 10, 11, измеряется показание h пьезометра 14.
3. Открывается пробка 7 для сообщения верхней части сосуда с атмосферой; регистрируются показания всех приборов.

Результаты опытов и их обработки записываются в табл. 1.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 1.1. Результаты измерения и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Пьезометрический напор	мм			
2. Показания давления мановакуумметра p_m	Па			
3. Показания давления первого манометра $p_{m1}^{он}$	Па			
4. Вычисленное давление в точке подсоединения первого манометра $p_{m1}^в$	Па			
5. Относительная разность Δp_1	%			
6. Показания давления второго манометра $p_{m2}^{он}$	Па			
7. Вычисленное давление в точке подсоединения второго манометра $p_{m2}^в$	Па			
8. Относительная разность Δp_2	%			

Постоянные величины: $h_1 = \dots$ см; $h_2 = \dots$ см; $p_{ат} = \dots$ кПа.

Обработка результатов. По полученным результатам измерений выполняются следующие вычисления:

1) при отсутствии в сосуде свободной поверхности жидкости (в первом опыте) избыточные давления на уровнях 1–1 и 2–2 определяются по следующим формулам:

$$p_{m1} = p_{мв} + \rho g h_1, \quad (1.6)$$

$$p_{m2} = p_{m1} + \rho g h_2 = p_{мв} + \rho g (h_1 + h_2); \quad (1.7)$$

2) при наличии в сосуде свободной поверхности жидкости (во втором и третьем опытах) избыточные давления определяются по зависимостям

$$p_{m1} = p_{мв} + \rho g (h + h_2), \quad (1.8)$$

$$p_{m2} = p_{m1} + \rho g h_2 = p_{мв} + \rho g h; \quad (1.9)$$

3) определяются абсолютные (полные) давления жидкости в плоскостях 1–1 и 2–2

$$p_{n,i} = p_{m,i} + p_{ат}; \quad (1.10)$$

4) по каждому опыту определяется относительное отклонение (в %) расчетного значения давления от опытного:

$$\Delta p = \left(\frac{p_r}{p_{оп}} - 1 \right) 100. \quad (1.11)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютным (полным), избыточным, вакуумметрическим давлением?
2. Объясните устройство и принцип действия приборов для измерения и разности давлений.
3. Как вычислить давление в точке покоящейся жидкости, используя основное уравнение гидростатики?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКОЯ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ

В лабораторной работе изучается частный случай относительного покоя жидкости. Цилиндрический сосуд заполнен жидкостью и вращается с постоянной угловой скоростью. На единицу массы жидкости действуют центробежная сила инерции и сила тяжести. Проекция этих сил на соответствующие координатные оси равны:

$$F_x = \omega_0^2 x; \quad F_y = \omega_0^2 y; \quad F_z = -g, \quad (2.1)$$

где x, y, z – координаты точки жидкости.

Подставив значение проекций единичной массовой силы в дифференциальное уравнение поверхности равного давления

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz = 0, \quad (2.2)$$

получим

$$\omega_0^2 x dx + \omega_0^2 y dy - g dz = 0 \quad (2.3)$$

и в результате интегрирования

$$Z_{\text{св}} - Z_0 = Z' = \frac{\omega_0^2 r^2}{2g}, \quad (2.4)$$

где Z' – высота параболоида вращения;

$Z_{\text{св}}$ – координата свободной поверхности жидкости в произвольной точке;

Z_0 – то же для точки с координатами $x = 0, y = 0$;

ω_0 – угловая скорость вращения цилиндра;

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние произвольной точки свободной поверхности жидкости от оси вращения.

Уравнение (2.4) показывает, что в рассматриваемом случае поверхность равного давления представляет собой параболоид вращения. При известном радиусе цилиндра r_0 и его угловой скорости вращения ω_0 оно позволяет построить кривую свободной поверхности.

Из равенства объема жидкости до вращения и при вращении цилиндра (рис. 2.1) можем записать, что

$$W_{ДЕМN} = W_{АСMН} - W_{ABC}, \quad (2.5)$$

где $W_{ДЕМN} = \pi r_0^2 H$ – объем жидкости в цилиндре до вращения;

H – начальный уровень жидкости в цилиндре;

$W_{АСMН} = \pi r_0^2 h_{CT}$ – объем при наибольшей высоте подъема свободной поверхности жидкости у стенки цилиндра;

h_{CT} – максимальная высота подъема жидкости у стенки цилиндра.

Так как объем параболоида вращения

$$W_{ABC} = \frac{1}{2} \pi r_0^2 h', \quad (2.6)$$

тогда максимальная высота параболоида вращения будет равна:

$$h' = 2(h_{CT} - H) = 2h_{пов} \quad (2.7)$$

или

$$h' = 2(H - Z_0) = 2h_{пон}, \quad (2.8)$$

где $h_{пов}$, $h_{пон}$ – высоты наибольшего повышения и понижения свободной поверхности у боковой стенки и на оси вращения по сравнению с первоначальным уровнем жидкости в цилиндре.

Эти уравнения находят применение при решении практических задач.

Задачи исследования:

- 1) определить высоту параболоида вращения опытным путем;
- 2) вычислить высоту параболоида вращения по формуле (2.4) для условий опытов;
- 3) сопоставить опытную высоту параболоида вращения с вычисленной по формуле.

Лабораторная установка. Лабораторная работа проводится на специальной установке (рис. 2.1), состоящей из цилиндра *1* с прозрачными стенками, вращающегося с угловой скоростью ω_0 .

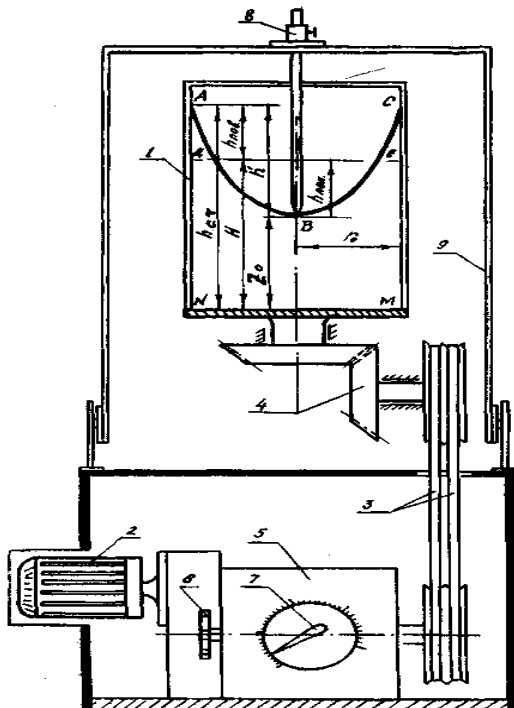


Рис. 2.1. Схема опытной установки

Вращение цилиндра *1* осуществляется от электродвигателя *2* через клиноременную передачу *3* и конические шестерни *4*. Регулировка частоты вращения осуществляется редуктором *5* (рукоятка *б*). На редукторе *5* имеется указатель *7* со шкалой частоты вращения цилиндра. Отметки свободной поверхности жидкости в цилиндре измеряются шпигмасштабом *8*, закрепленным на защитном кожухе *9*.

Проведение опытов.

1. Замеряется радиус цилиндра r_0 и отметка уровня жидкости при глубине H в нем до начала вращения.

2. Производится запуск установки и редуктором устанавливается необходимая частота вращения цилиндра.

3. При установившемся относительном покое замеряются отметки свободной поверхности жидкости на оси вращения и у стенки цилиндра.

Опыты проводятся при трех различных значениях частоты вращения цилиндра. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 2.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 2.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Частота вращения цилиндра n	с^{-1}			
2. Угловая скорость ω_0	рад/с			
3. Отметка свободной поверхности жидкости на оси вращения Z_0	см			
4. Отметка свободной поверхности жидкости у стенки цилиндра $h_{\text{ст}}$	см			
5. Высота параболоида вращения: опытная $h'_{\text{оп}}$ вычисленная h'_t	см см			
6. Относительная разность $\Delta h'$	%			

Постоянные величины: радиус цилиндра $r_0 = \dots$ см; отметка уровня жидкости до начала опыта $H = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Определяется высота параболоида вращения по данным опыта:

$$h'_{\text{оп}} = h_{\text{ст}} - Z_0.$$

2. Определяется угловая скорость вращения цилиндра $\omega_0 = 2\pi n$.

3. Определяется высота параболоида вращения по формуле (2.4).

4. Находится разница в процентах между вычисленной и опытной высотами параболоида вращения.

Техника безопасности при работе на установке

1. Не допускается частота вращения цилиндра более 5 с^{-1} (300 об/мин).

2. Опыты проводятся при опущенном защитном кожухе.

3. Регулировка частоты вращения цилиндра производится только после включения установки.

4. Запрещается касаться электропроводки и корпуса электродвигателя.

Контрольные вопросы

1. Что называется относительным покоем жидкости?
2. Как рассчитываются координаты свободной поверхности жидкости при вращении цилиндра?
3. Как определяется давление при относительном покое жидкости на дно и боковые стенки цилиндра?
4. Зависит ли высота параболоида вращения от плотности жидкости?

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Сила гидростатического давления жидкости на ограниченную плоскую поверхность для условий (рис. 3.1), когда внешнее давление равно атмосферному, определяется по формуле

$$F_p = \rho g h_{\text{ц.т}} \omega, \quad (3.1)$$

где $h_{\text{ц.т}}$ – глубина погружения центра тяжести рассматриваемой поверхности;

ω – площадь этой поверхности.

Так как плоская поверхность правильной формы имеет ось симметрии, то точка приложения силы, т. е. центр давления, будет находиться на ней и определяться одной ординатой относительно линии уреза жидкости (ось OX):

$$l_d = l_{\text{ц.т}} + \frac{I_0}{l_{\text{ц.т}} \omega}, \quad (3.2)$$

где $l_{\text{ц.т}}$ – ордината центра тяжести площади ω (при вертикальном расположении этой площади она равна $h_{\text{ц.т}}$);

I_0 – момент инерции площади ω относительно оси, проходящей через центр тяжести ее параллельно оси OX .

Как видно из формулы (3.2), центр давления расположен ниже центра тяжести площади ω на величину эксцентриситета:

$$e = \frac{I_0}{l_{\text{ц.т}} \omega}. \quad (3.3)$$

Задачи исследования:

1) определить силу гидростатического давления на плоскую поверхность опытным путем;

2) вычислить эту силу для условий опытов по формуле (3.1);

3) сопоставить полученные результаты.

Лабораторная установка. Рассматриваемой плоской поверхностью является круглый клапан 2 (рис. 3.1), закрывающий отверстие в стенке резервуара 1, наполненного водой. Клапан посредством рычага 4 шарнирно прикреплен к стенке резервуара и может поворачиваться относительно оси K под действием грузов 8, подвешенных на тросе, который уложен на блоки 3 и присоединен к рычагу 4. Задвижки 6 и 7 предназначены соответственно для наполнения резервуара водой и сброса ее. Глубина погружения центра тяжести клапана измеряется пьезометром 5.

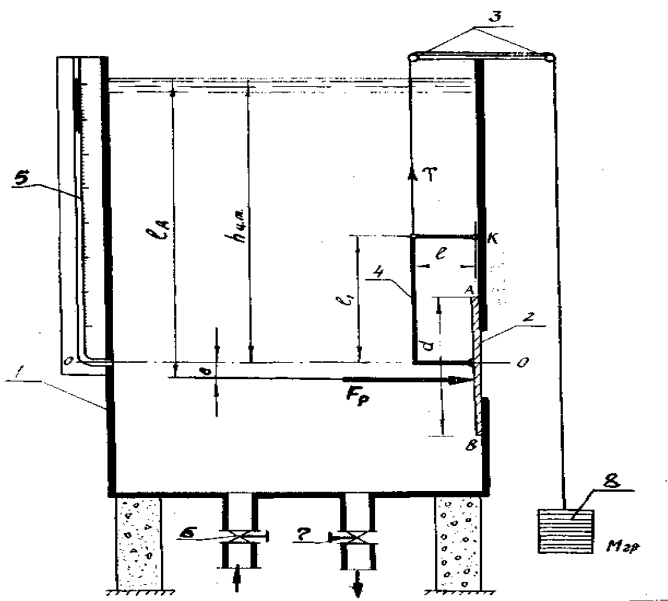


Рис. 3.1. Схема опытной установки

Проведение опытов.

1. Замеряются диаметр d клапана 2, плечи l и l_1 рычага 4.

2. Подбирается масса груза (противовеса) $m_{пр}$, достаточная для преодоления сил трения и веса клапанного устройства при его открытии при незаполненном резервуаре водой.

3. Резервуар заполняется водой.

4. На подвеску устанавливаются грузы массой $m_{гр}$.

5. Открывается задвижка 7, уровень воды в резервуаре понижается.

В момент открытия клапана, определяемый визуально по вылету струи из отверстия и падению грузов, фиксируется показание пьезометра 5, т. е. величина $h_{ц.т}$.

Опыты проводятся для трех различных значений массы грузов. Результаты измерений записываются в табл. 3.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 3.1. Результаты измерения и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Глубина погружения центра тяжести клапана $h_{ц.т}$	см			
2. Масса груза $m_{гр}$	кг			
3. Подъемное усилие T	Н			
4. Величина эксцентриситета e	см			
5. Сила гидростатического давления: опытная $F_{оп}$ вычисленная F_p	Н Н			
6. Относительная разность ΔF	%			

Постоянные величины: диаметр клапана $d = \dots$ см; площадь клапана $\omega = \dots$ см²; плечо $l = \dots$ см; $l_1 = \dots$ см; масса противовеса $m_{пр} = \dots$ кг.

Обработка результатов.

1. Определяется подъемное усилие открытия клапана:

$$T = (m_{гр} - m_{пр})g. \quad (3.4)$$

2. По формуле (3.3) вычисляется величина эксцентриситета, соответствующая полученному значению $h_{ц.т}$, при котором открылся клапан:

$$e = \frac{I_0}{l_{ц.т}\omega} = \frac{d^2}{16h_{ц.т}}. \quad (3.5)$$

3. Из уравнения моментов сил относительно оси K определяется опытное значение силы гидростатического давления на клапан:

$$F_{\text{оп}} = T \frac{\ell}{\ell_1 + e}. \quad (3.6)$$

4. По формуле (3.1) вычисляется расчетная величина силы гидростатического давления, соответствующая полученному в опыте значению $h_{\text{ц.т.}}$.

5. Относительное отклонение (в %) расчетного значения силы гидростатического давления от опытного определяется по формуле

$$F_{\text{оп}} = \left(\frac{F_p}{F_{\text{оп}}} - 1 \right) 100. \quad (3.7)$$

Все результаты вычислений также заносятся в табл. 3.1.

Контрольные вопросы

1. Как определяется сила гидростатического давления жидкости на плоскую поверхность расчетным и опытным путем?
2. Почему сила гидростатического давления определяется в момент открытия клапана?
3. Какой вид имеет эпюра гидростатического давления на плоскую поверхность?
4. Как найти центр давления?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВАНИЯ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ

В лабораторной работе будет изучаться только надводное плавание тел в жидкости – плавучесть и остойчивость.

Плавучестью тела называется способность тела плавать в полупогруженном состоянии. Условие плавания тела выражается равенством

$$F_A = gM = G, \quad (4.1)$$

где M – масса тела;

F_A – результирующая сила давления жидкости на погруженное в нее тело – архимедова сила, которая направлена вверх и проходит через центр тяжести водоизмещения.

Архимедова сила F_A находится по формуле

$$F_A = \rho g W, \quad (4.2)$$

где ρ – плотность жидкости, в которую погружено тело;

W – объем жидкости, вытесненный телом, или водоизмещение.

Остойчивостью называется способность плавающего тела при отклонении в заданных пределах от положения равновесия возвращаться в это положение после прекращения действия отклоняющих сил. В изучаемом курсе гидравлики рассматривается остойчивость при надводном плавании тел, при малых углах крена ($\alpha < 15^\circ$). В этом случае считается, что центр водоизмещения D перемещается по некоторой дуге, проведенной из точки пересечения линии действия силы F_A с осью плавания 0–0. Эта точка называется метацентром (рис. 4.1, точка M).

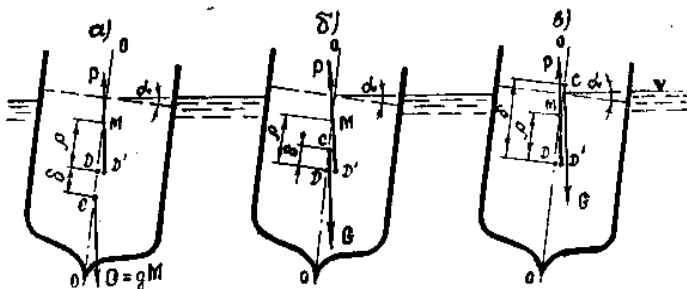


Рис. 4.1. Схема к расчету остойчивости плавающего тела

Остойчивость плавающего тела зависит от положения центров тяжести C и водоизмещения D , а также метацентра M . Рассмотрим различное расположение этих центров:

а) центр тяжести C плавающего тела расположен ниже центра водоизмещения D . Тогда восстанавливающий момент равен (рис. 4.1, а):

$$M_B = F_A \rho_0 \sin \alpha + G \delta \sin \alpha, \quad (4.3)$$

где ρ_0 – метацентрический радиус, т. е. расстояние между центром водоизмещения D и метацентром M ;

δ – расстояние между центрами тяжести C и водоизмещения D .

Метацентрический радиус находится по формуле

$$\rho_0 = \frac{I_0}{W}, \quad (4.4)$$

где I_0 – момент инерции плоскости плавания относительно продольной оси (рис. 4.2).

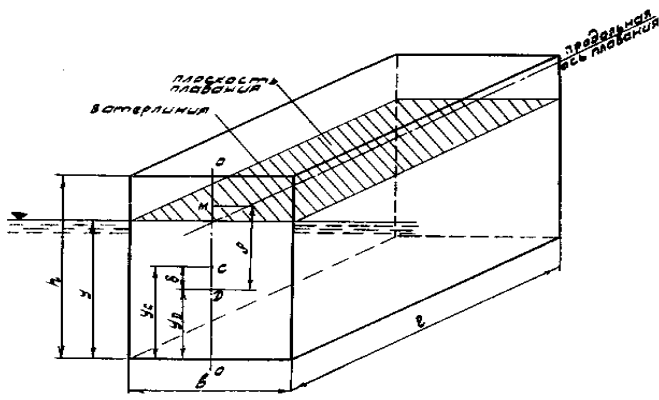


Рис. 4.2. Схема к расчету плавучести тела

Из уравнения (4.3) следует, что в этом случае плавающее тело всегда устойчиво, так как силы F_A и G стремятся восстановить плавающее тело в первоначальное положение;

б) центр тяжести C плавающего тела расположен выше центра водоизмещения D . Тогда восстанавливающий момент равен (рис. 4.1, б):

$$M_v = F_A \rho_0 \sin \alpha - G \delta \sin \alpha. \quad (4.5)$$

Плавающее тело будет устойчивым, если восстанавливающий момент будет положительным. Так как $F_A = G$, то из уравнения (4.5) следует, что тело будет устойчивым при условии

$$\rho_0 - \delta > 0 \text{ или } \rho_0 > \delta; \quad (4.6)$$

в) если центр тяжести C плавающего тела расположен выше метacentра M , то тело неустойчиво; возникающая пара сил G и F_A стремится увеличить крен (рис. 4.1, в), т. е.

$$\rho_0 - \delta < 0 \text{ или } \rho_0 < \delta. \quad (4.7)$$

Задачи исследования:

- 1) определить плавучесть и остойчивость тела в жидкости опытным путем;
- 2) вычислить плавучесть и остойчивость тела в жидкости для условный опытов;
- 3) сопоставить опытные и вычислительные величины по плавучести и остойчивости тела.

Оборудование для проведения опытов. Для проведения опытов имеется резервуар с жидкостью, набор образцов плавающих тел простой геометрической формы (параллелепипед, призма, цилиндр), выполненных из материалов различной плотности, весы для определения массы образцов.

Проведение опытов. В работе предусматривается три опыта, которые отличаются между собой формой плавающего тела и плотностью материала.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) замеряются размеры плавающего тела и определяется его масса;
- 2) образец опускается в жидкость и определяется его осадка y (глубина погружения в жидкость наинизшей точки смоченной поверхности);
- 3) создается крен плавающего тела в пределах $10-15^\circ$ и фиксируется его возможность возвращения в первоначальное положение.

Результаты измерений и наблюдений заносятся в журнал лабораторных работ (табл. 4.1).

Обработка результатов. В качестве примера показан расчет условия плавания однородного тела формы параллелепипеда (рис. 4.2). При этом рекомендуется следующий порядок вычислений:

- 1) вычисляется плотность образца

$$\rho_m = M / W_0,$$

где W_0 – объем образца;

2) исходя из условия плавания тела ($F_A = G$) вычисляется осадка образца:

$$y = \frac{\rho_r}{\rho} h, \quad (4.8)$$

где ρ – плотность жидкости;

h – высота образца;

Т а б л и ц а 4.1. Результаты измерений и обработка опытных данных

Наименование	Единица измерения	Форма образца		
1. Размер образца:				
длина ℓ	см			
ширина b	см			
высота h	см			
2. Объем образца W_0	см ³			
3. Масса образца M	г			
4. Плотность материала образца ρ	г/см ³			
5. Осадка образца:				
опытная $y_{оп}$	см			
вычисленная $y_{выч}$	см			
6. Расстояние до центра тяжести y_c	см			
7. Расстояние до центра водоизмещения y_p	см			
8. Расстояние между центром тяжести и центром водоизмещения δ	см			
9. Момент инерции плоскости плавания I_0	см ⁴			
10. Объем водоизмещения W	см ³			
11. Метацентрический радиус ρ_0	см			
12. Условие остойчивости:				
опытной				
по данным вычислений				

3) вычисляется метацентрический радиус:

$$\rho_0 = \frac{I_0}{W} = \frac{b^2}{12y}; \quad (4.9)$$

4) вычисляется расстояние между центрами тяжести и водоизмещения:

$$\delta = y_c - y_d = 0,5(h - y); \quad (4.10)$$

5) сравниваются значения метацентрического радиуса ρ_0 и δ . При

$$\rho_0 > \delta - \text{тело остойчиво,}$$

$$\rho_0 < \delta - \text{тело нестойчиво;}$$

6) в результате проведенных опытов и вычислений дается заключение об остойчивости плавающего тела.

Контрольные вопросы

1. Как определяется плавучесть тела и от чего она зависит?
2. Что называется ватерлинией, плоскостью плавания и осадкой плавающего тела?
3. Как определяется метацентрический радиус плавающего тела?
4. От чего зависит осадка плавающего тела и как она определяется?
5. Чем определяется условие остойчивости плавающего тела? Объяснить физический смысл этого условия.
6. Почему определяется остойчивость плавающего тела только относительно продольной оси плавания?

5.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Если в потоке несжимаемой жидкости действуют из массовых сил только сила тяжести, то выражение полной удельной энергии в любой точке можно представить в следующих трех вариантах:

$$E_G = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}, \quad (5.1)$$

$$E_w = \rho g z + p + \frac{u^2}{2} \rho, \quad (5.2)$$

$$E_m = g z + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}, \quad (5.3)$$

где z – превышение рассматриваемой точки над выбранной плоскостью отсчета (сравнения);

p , u – соответственно гидростатическое давление и скорость движения жидкости в этой точке.

Формула (5.1) выражает энергию, приходящуюся на единицу веса (м), (5.2) – на единицу объема (Па), (5.3) – на единицу массы жидкости ($\text{м}^2/\text{с}^2$). Тогда удельной энергией в сечении потока называется энергия, приходящаяся на единицу количества (веса, объема, массы) жидкости.

В гидравлике широко применяется запись (5.1). Три составляющие правой части этого уравнения имеют следующий физический смысл:

z – удельная потенциальная энергия положения точки над плоскостью сравнения (геометрический напор);

$\frac{P}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия давления жидкости в точке (пьезометрический напор);

$\frac{u^2}{2g}$ – удельная кинетическая энергия (скоростной напор).

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии в потоке жидкости. Оно устанавливает связь между удельными энергиями в двух любых сечениях потока. Если использовать запись (5.1) применительно не к точкам, а к сечениям потока, то уравнение Бернулли представляется в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{тр}, \quad (5.4)$$

где V_1, V_2 – средние скорости движения жидкости в первом и втором сечениях потока;

α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии в этих сечениях;

$h_{тр}$ – потери энергии при движении жидкости от первого сечения ко второму.

Полная удельная энергия в первом сечении потока отличается от полной удельной энергии во втором сечении на величину потерь $h_{тр}$.

При изменении положения и площади сечения потока происходит преобразование одного вида энергии в другой. Уравнение (5.4) позволяет находить одну из неизвестных составляющих полной удельной энергии, если известны все остальные.

Задачи исследования:

1) на лабораторной установке определить по показаниям трубок Пито и пьезометров составляющие полной удельной энергии в центрах тяжести трех различных по площади сечениях потока;

2) проанализировать визуально во время опытов и по подсчетам преобразование одного вида энергии в другой при изменении положения и площади сечения потока;

3) построить по результатам опытов схематично линии, показывающие изменение полной и потенциальной удельных энергий в сечениях потока вдоль пути его движения.

Лабораторная установка. В наклонный трубопровод 4 (рис. 5.1) переменного сечения поступает вода из резервуара 1, питаемого через

завдвижку 3; постоянный уровень воды в резервуаре поддерживается с помощью переливного устройства 2.

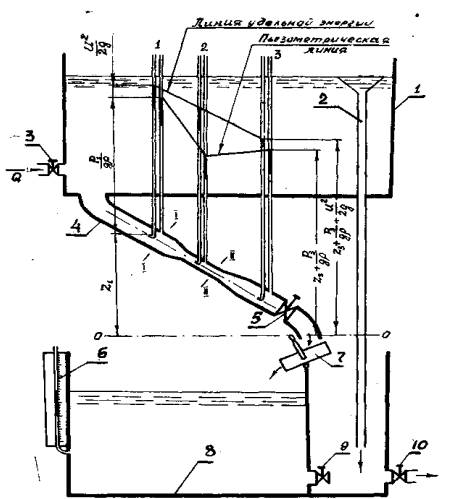


Рис. 5.1. Схема установки для демонстрации уравнения Бернулли

В центрах тяжести трех сечений трубопровода 4, расположенных на определенных расстояниях одно от другого, подключены трубки Пито и пьезометры. Трубка Пито (изогнутая навстречу потоку) служит для измерения полной удельной энергии, пьезометр – удельной потенциальной энергии давления.

Расход воды в опытном трубопроводе 4 регулируется задвижкой 5. Измеряется он объемным способом. Для этого поворотный желоб 7 наклоняется в сторону мерного резервуара 8 и определяется высота наполнения последнего по пьезометру 6 за время t . Сброс воды и опорожнение мерного резервуара производится через задвижки 9 и 10.

Проведение опытов.

1. С помощью задвижек 5 и 3 устанавливается определенный расход воды в опытном трубопроводе. При этом нужно добиться, чтобы показания пьезометров и трубок Пито стабилизировались.

2. Измеряется для каждого сечения удельная энергия положения – высота z от принятой плоскости сравнения до центра тяжести сечения.

3. Во всех трех сечениях по пьезометрам определяется удельная энергия давления $\frac{p}{\rho g}$, а по трубкам Пито – сумма удельных энергий давления и кинетической $\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}\right)$.

4. Поворотом желоба 7 поток направляется в мерный резервуар 8 и по секундомеру определяется время t , в течение которого уровень в пьезометре 6 поднимается на заданную высоту h .

5. Измеряются расстояния L_1 и L_2 между сечениями опытного трубопровода и площадь сечения в плане мерного резервуара.

Измеренные и вычисленные показатели заносятся в табл. 5.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 5.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера сечений		
		1	2	3
1. Диаметр трубопровода d	см			
2. Площадь сечения ω	см ²			
3. Высота z	см			
4. Напор по показаниям пьезометра $p / (\rho g)$	см			
5. Пьезометрический напор $z + p / (\rho g)$	см			
6. Показания, снятые по трубкам Пито, $p / (\rho g) + u^2 / (2g)$	см			
7. Полный напор по показанию приборов H	см			
8. Потери напора по показаниям приборов $h_{тр}$	см			
9. Средняя скорость в сечениях потока V	см/с			
10. Скоростной напор, вычисленный по средней скорости, $\alpha V^2/(2g)$	см			
11. Полный напор по средней скорости $H' [5+10]$	см			
12. Потери напора, вычисленные по средней скорости, $h'_{тр}$	см			
13. Расстояние между сечениями L	см			
14. Гидравлический уклон $I = h'_{тр}/L$	см			

Постоянные величины: объем воды в мерном баке $W = b\ell h = \dots \text{см}^3$; размеры мерного бака в плане $b = \dots \text{см}$; $\ell = \dots \text{см}$; показание пьезометра на мерном баке $h = \dots \text{см}$; время наполнения мерного бака $t = \dots \text{с}$; расход потока $Q = W/t = \dots \text{см}^3/\text{с}$.

Обработка результатов.

1. По показаниям трубки Пито и пьезометра в каждом сечении вычисляются соответственно полная удельная энергия E_G (полный напор H) (5.1) и удельная потенциальная энергия $z + \frac{P}{\rho g}$ относительно принятой плоскости сравнения.

2. Потери напора между соседними сечениями трубопровода равны разности полных напоров в этих сечениях:

$$h_{\text{тр}} = H_1 - H_2. \quad (5.5)$$

3. Расход жидкости в опытном трубопроводе и средняя скорость в сечении определяются соответственно по следующим формулам:

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{b\ell h}{t}, \quad (5.6)$$

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (5.7)$$

где W – объем жидкости, поступившей в мерный резервуар за время опыта;

ω – площадь сечения трубопровода.

4. Вычисляется удельная кинетическая энергия (скоростной напор) $\frac{\alpha V^2}{2g}$ и полная удельная энергия (полный напор) $H' = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}$ по средней скорости потока в каждом сечении. Так как режим движения в трубопроводе турбулентный, то коэффициент кинетической энергии $\alpha = 1,13-1,0$ (с повышением турбулентности он уменьшается и для условий данной лабораторной установки может быть принят близким к 1,0).

5. По полным напорам, вычисленным с учетом средних скоростей, определяются аналогично (5.5) потери напора $h'_{\text{тр}}$, а также гидравлический уклон между соседними сечениями:

$$I = \frac{h'_{\text{тр}}}{L}. \quad (5.8)$$

По полученным результатам опытов строятся графики изменения полной и потенциальной удельных энергий потока вдоль пути его

движения, пример построения которых для исследуемого трубопровода (см. рис. 5.1) показан на рис. 5.2.

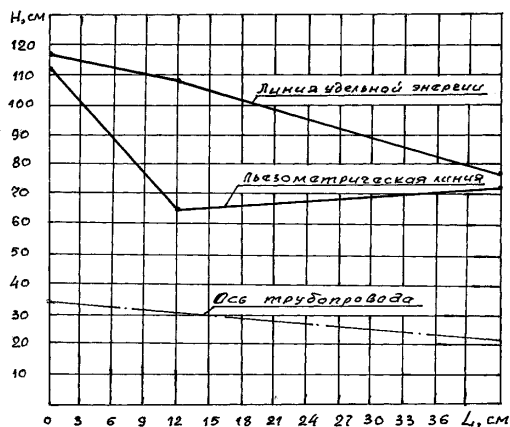


Рис. 5.2. Пьезометрическая линия и линия полной удельной энергии

Для построения линии полной удельной энергии используются ее значения, подсчитанные по средним скоростям в сечениях потока.

Контрольные вопросы

1. Что называется в гидравлике удельной энергией?
2. Как можно определить опытным путем удельную потенциальную и кинетическую энергии в сечении потока?
3. Как изменяются удельные кинетическая и потенциальная энергии при изменении площади сечения потока?

6. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Расход – это количество жидкости, протекающее через живое сечение трубы или канала в единицу времени. Количество жидкости может быть выражено в единицах массы (кг) или в единицах объема (м^3). Соответственно различают расход массовый (кг/с) и объемный ($\text{м}^3/\text{с}$).

Приборы для измерения расхода называют расходомерами, а для определения количества протекающей через них жидкости – счетчиками. Расходомер может быть совмещен со счетчиком в одном приборе.

Для измерения расхода жидкости или газа в напорных трубопроводах широко применяются сужающие устройства: диафрагма (рис. 6.1, *a*), сопло (рис. 6.1, *б*), труба Вентури (рис. 6.1, *в*). При движении потока через сужающее устройство создается перепад потенциальных напоров, обусловленный разностью площадей сечений ω_1 самого трубопровода и ω_2 сужающего устройства. Между расходом Q и перепадом потенциальных напоров существует определенная зависимость, которая может быть получена с помощью уравнения Бернулли и уравнения неразрывности (сплошности) движения для сечений 1–1 и 11–11 (рис. 6.1, *a*), выбранных соответственно перед сужающим устройством и в месте наибольшего сужения потока. Приняв за начало отсчета ось трубопровода 0–0, запишем уравнение Бернулли:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{тр}. \quad (6.1)$$

Изменение удельной потенциальной энергии обозначим через h . Тогда уравнение (6.1) примет вид

$$h = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_{тр}. \quad (6.2)$$

Далее продолжим вывод для идеальной жидкости ($h_{тр} = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1, 0$). Так как согласно уравнению неразрывности потока $V_1 = V_2 \omega_2 / \omega_1$, то из равенства (6.2) получим теоретические значения скорости и расхода в трубопроводе:

$$V_2 = \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}; \quad (6.3)$$

$$Q_{т} = \omega_2 V_2 = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}. \quad (6.4)$$

Как видно из уравнения (6.4), расход зависит от разности h потенциальных напоров в сужающем устройстве. Эту разность удобно определить с помощью дифференциального манометра. Так как в последнем применяется жидкость с большей плотностью (ρ_2), чем плотность жидкости в трубопроводе (ρ_1), то, используя основное уравнение гидростатики, величину h можно выразить через показание дифманометра h_d :

$$h = h_d (\rho_2 / \rho_1 - 1). \quad (6.5)$$

При прохождении реальной (вязкой) жидкости через сужающее устройство часть энергии ее теряется. Поэтому применительно к ней уравнение (6.4) будет давать завышенный результат. Необходимо ввести поправочный коэффициент $\mu = Q / Q_T$, который называется коэффициентом расхода. Учитывая его, а также зависимость (6.5), можно определить действительный расход жидкости:

$$Q = \mu A \sqrt{h_d}, \quad (6.6)$$

где

$$A = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2) (\rho_2 / \rho_1 - 1)} \quad (6.7)$$

есть постоянная сужающего устройства.

Зависимость (6.6) применима для любого из сужающих устройств, представленных на рис. 6.1. Она нелинейна, поэтому шкала прибора неравномерная.

Коэффициент μ для каждого расходомера определяется опытным путем при различных расходах, а значит, и различных числах Рейнольдса, что позволяет получить зависимость $Q = \Phi(h_d)$. В области квадратичного сопротивления для данного расходомера $\mu = \text{const}$.

Действительный расход жидкости при тарировке прибора обычно измеряют объемным способом. Тарировочные данные представляют в виде графической зависимости $Q = \Phi(h_d)$. Пользуясь этим графиком, можно по величине h_d непосредственно и быстро находить расход Q , не прибегая к формуле (6.6).

Измерение давлений для определения величины h_d дифманометром производится из специальных кольцевых камер (рис. 6.1, а, б, в). Наличие кольцевой камеры сглаживает возможную пульсацию и усредняет давление по периметру трубы.

К материалу диафрагмы и обработке ее поверхности предъявляются повышенные требования. Диск обычно изготавливается из нержавеющей стали, а кольцевые камеры – из углеродистой. Кромка отверстия диска у входа потока должна быть острой, без вмятин и заусенцев.

Из рассмотренных сужающих устройств диафрагма, хотя и отличается простотой конструкции, имеет наибольшие гидравлические сопротивления. Кроме того, по мере износа острой кромки отверстия коэффициент расхода ее изменяется. Сопла более стойки к стиранию и менее подвержены загрязнению, поэтому тарировочные характеристи-

ки их более стабильны в эксплуатации. Но они более сложны в изготовлении и дороги. Сопло Вентури дает наименьшие потери давления.

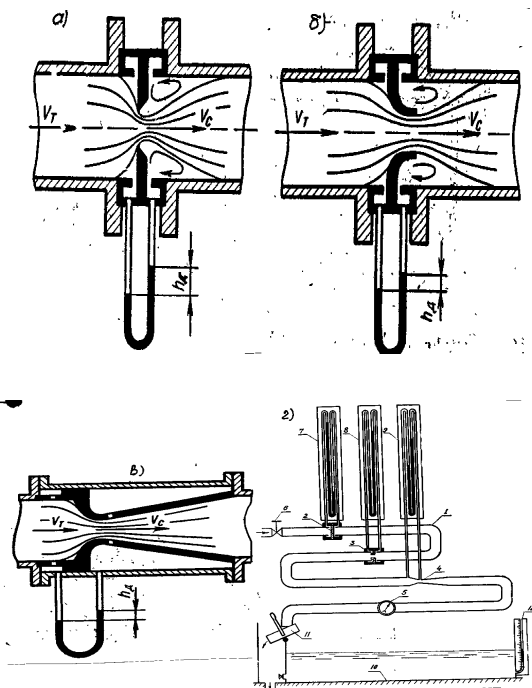


Рис. 6.1. Схема сужающих устройств и опытной установки:
a – диафрагма; *б* – сопло; *в* – труба Вентури; *г* – опытная установка

Счетчики жидкости бывают скоростные и объемные. В скоростном счетчике жидкость вращает винт, расположенный соосно потоку (водомеры типа ВВ, ВТ), или крыльчатку, расположенную тангенциально потоку (водомеры ВКОС, УВК). Это вращение через червячную пару передается счетному механизму. Показание последнего (в м^3) пропорционально числу оборотов данного вращающегося устройства.

Принцип действия объемного счетчика основан на регистрации количества определенных объемов жидкости, вытесняемых из измерительной камеры прибора под действием разности давлений. Например, отсчет объемов в счетчике типа ШЖ (шестеренном, жидкостном) выполняется двумя овальными шестернями, находящимися в постоянном зацеплении и вращающимися под действием разности давлений на

входе и выходе прибора. За один оборот обе шестерни проталкивают объем жидкости, равный объему измерительной камеры. Чтобы не выводить ось шестерни за пределы камеры и тем самым избежать дополнительных потерь давления на трение в сальниковых уплотнениях, вращение от нее передается счетному механизму с помощью магнитной муфты.

Задачи исследования:

1) изучить конструкции приборов для измерения расхода и количества жидкости;

2) по результатам опытов, выполненных при различных расходах, построить зависимость (график тарировки) $Q = \Phi(h)$ для одного из расходомеров (по заданию преподавателя);

3) определить для каждого опыта коэффициент расхода, проанализировать его полученные значения.

Лабораторная установка. Установка (рис. 6.1, *з*) состоит из трубы 1 постоянного сечения, по длине которой вмонтированы сужающие устройства: диафрагма 2, сопло 3, труба Вентури 4 и счетчик-водомер 5 (скоростной, типоразмер ВВ-50). Расход в трубопроводе регулируется задвижкой 6. Перепад давления в сужающих устройствах 2, 3, 4 измеряется дифференциальными манометрами 7, 8, 9. Расход жидкости, протекающий в трубопроводе 1, определяется с помощью мерного резервуара 10. При этом желоб 11 наклоняется в сторону мерного резервуара 10 и по пьезометру 12 определяется глубина его наполнения за время t опыта.

Проведение опытов. Из-за ограниченности лабораторного занятия во времени всего проводится 4–5 опытов, различающихся между собой расходами. Опыт выполняется в приведенном ниже порядке.

1. Задвижкой 6 устанавливается небольшой расход.

2. После стабилизации уровней жидкости в дифманометрах записывается показание дифманометра h_d исследуемого сужающего устройства.

3. Определяется время t наполнения мерного бака объемом W .

4. Определяется время t_c протекания объема W_c через счетчик ВВ-50.

Далее задвижкой 6 увеличивается расход и выполняется аналогично каждый следующий опыт. Последний опыт проводится при полностью открытой задвижке.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 6.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 6.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Диафрагма					Сопло					Трубка Вентури					Расходомер ВВ-50								
		Номера опытов																							
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1. Диаметр трубы d_1	см																								
2. Площадь сечения ω_1	см ²																								
3. Диаметр сужения d_2	см																								
4. Площадь сужения ω_2	см ²																								
5. Показание дифманометра h_d	см																								
6. Перепад давления h	см																								
7. Расход, вычисленный по формуле, Q_f	см ³ /с																								
8. Объем по расходомеру ВВ-50 W_e	см ³																								
9. Время протекания измеренного объема t_e	с																								
10. Расход по расходомеру ВВ-50 Q_e	см ³ /с																								
11. Показание пьезометра на мерном резервуаре h_m	см																								
12. Объем воды в мерном резервуаре W	см ³																								
13. Время наполнения мерного резервуара t	с																								
14. Замеренный расход Q	см ³ /с																								
15. Коэффициент расхода μ	—																								

Обработка результатов.

1. По известным диаметрам d_1 и d_2 вычисляются соответственно площади сечений ω_1 и ω_2 заданного сужающего устройства, а по ним – постоянная A .

2. Вычисляется для каждого опыта теоретический расход:

$$Q_T = A\sqrt{h_d} \quad (6.8)$$

и действительный расход объемным способом:

а) по мерному резервуару $Q = W/t$;

б) по счетчику-водомеру $Q_c = W_c/t_c$.

3. Вычисляется коэффициент расхода сужающего устройства:

$$\mu = Q / Q_T. \quad (6.9)$$

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип измерения расхода с помощью сужающего устройства.

2. Как определяется разность потенциальных напоров в сужающих устройствах?

3. Как определить расход с помощью счетчика жидкости?

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ВОДОМЕРА ВЕНТУРИ

При движении потока через сужающее устройство создается перепад потенциальной энергии (напора), обусловленный разностью площадей сечений ω_1 самого трубопровода и ω_2 сужающего устройства. Между расходом Q и перепадом потенциальной энергии существует определенная зависимость, которая может быть получена с помощью уравнения Бернулли и уравнения неразрывности (сплошности) движения для сечений I–I и II–II (рис. 7.1), выбранных соответственно перед сужающим устройством и в месте наибольшего сужения потока. Запишем уравнение Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{тр}. \quad (7.1)$$

Изменение удельной потенциальной энергии обозначим через h , т. е.

$$h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right), \quad (7.2)$$

тогда

$$h = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_{тр}. \quad (7.3)$$

Далее продолжим вывод для идеальной жидкости ($h_{тр} = 0$) и при условии, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$. Так как согласно уравнению неразрывности потока $V_1 = V_2 \omega_2 / \omega_1$ из уравнения (7.3) получим теоретические значения скорости и расхода в трубопроводе:

$$V_2 = \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}; \quad (7.4)$$

$$Q_r = \omega_2 V_2 = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}. \quad (7.5)$$

При прохождении реальной (вязкой) жидкости через сужающее устройство часть энергии ее теряется. Поэтому применительно к ней уравнение (7.5) будет давать завышенный результат. Необходимо ввести поправочный коэффициент $\mu = Q / Q_r$, который называется коэффициентом расхода. Учитывая его, можно определить действительный расход жидкости:

$$Q = \mu A \sqrt{h}, \quad (7.6)$$

где

$$A = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \quad (7.7)$$

есть постоянная Вентури.

Задачи исследования:

- 1) изучить конструкцию водомера Вентури;
- 2) определить для каждого опыта коэффициент расхода и проанализировать его полученные значения;
- 3) по результатам опытов, выполненных при различных расходах, построить тарировочный график $Q = f(h)$ водомера Вентури.

Лабораторная установка. Установка состоит из водомера Вентури (рис. 7.1) и двух пьезометров. Один из них присоединен перед сужением, а второй – в узком сечении. Водомер вмонтирован в трубопровод и является одним из его элементов. В конце трубопровода имеется свободный выход воды, позволяющий определять расход объемным способом. Изменение расхода в трубопроводе производится задвижкой K .

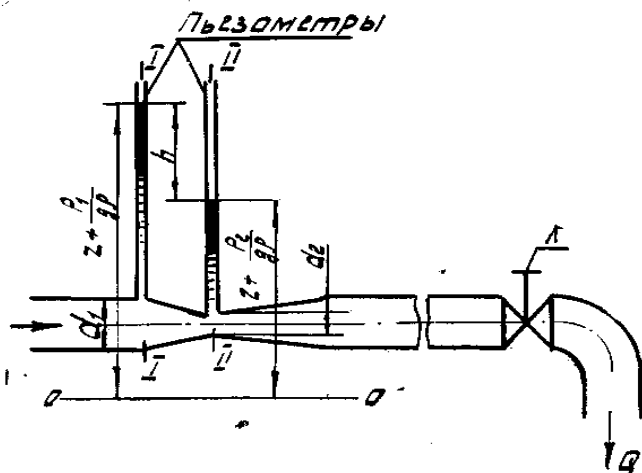


Рис. 7.1. Схема водомера Вентури

Проведение опытов. В работе проводится 5–6 опытов, различающихся между собой расходами. Опыт выполняется в приведенном ниже порядке.

1. Задвижкой K на трубопроводе устанавливается небольшой (минимальный) расход.
2. После стабилизации уровней жидкости в пьезометрах записываются их показания.
3. Определяется время t наполнения мерного бака объемом W и с помощью весов определяется масса воды m в нем.

Далее задвижкой K увеличивается расход и выполняется аналогично каждый следующий опыт. Последний опыт проводится при полностью открытой задвижке.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 7.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 7.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов					
		1	2	3	4	5	6
1. Показание первого пьезометра $\frac{p_1}{\rho g}$	см						
2. Показание второго пьезометра $\frac{p_2}{\rho g}$	см						
3. Разность показаний h	см						
4. Объем воды в мерном баке W	см ³						
5. Время наполнения мерного бака t	с						
6. Замеренный расход $Q_{\text{ф}}$	см ³ /с						
7. Расход, вычисленный по формуле, $Q_{\text{т}}$	см ³ /с						
8. Коэффициент расхода водомера μ	—						

Постоянные величины: диаметр трубопровода $d_1 = \dots$ см; диаметр горловины $d_2 = \dots$ см; постоянная водомера $A = \dots$ см^{2,5}/с.

Обработка результатов.

1. Определяется разность показаний пьезометров h .
2. Вычисляется действительный расход Q .
3. По формуле (7.7) вычисляется постоянная водомера A .
4. Находится теоретический расход $Q_{\text{т}}$ по формуле (7.5).
5. Вычисляется коэффициент расхода $\mu = Q / Q_{\text{т}}$.
6. Находится среднее арифметическое значение коэффициента расхода $\mu = \sum \mu_i / n$.
7. Строится тарировочный график зависимости $Q = f(h)$.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется удельная потенциальная и кинетическая энергия вдоль водомера?
2. От чего зависит постоянная водомера A ?
3. Что учитывается коэффициентом расхода водомера?

8. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Наблюдения за поведением частиц жидкости при ее движении позволили установить два вида движения жидкости, которые различаются разными зависимостями сил трения от скорости движения (Д. И. Менделеев, 1880). В дальнейшем поведение частиц жидкости при их движении будем называть режимом движения. Это ламинарный (слоистый) и турбулентный (беспорядочный) виды движения.

При ламинарном режиме все струйки движутся параллельно друг другу без заметного перемешивания слоев. Такое течение наблюдается в диапазоне сравнительно малых скоростей. Это легко видеть, если в поток жидкости, протекающей в стеклянной трубе, ввести окрашенную струйку с плотностью, близкой к окружающей жидкости. При ламинарном режиме движения подкрашенная струйка будет выделяться, не смешиваясь с основным потоком, по всей длине стеклянной трубы.

Если же постепенно увеличивать расход, то при некоторой возросшей скорости траектория струйки становится волнистой. Если после этого еще более увеличивать скорость, то подкрашенная струйка полностью рассеивается в основной массе движущегося потока. В этом случае наблюдавшееся ранее ламинарное движение переходит в турбулентное.

При постепенном уменьшении скорости движения потока явление повторяется в обратном порядке. Однако переход от турбулентного режима к ламинарному происходит при скорости, меньшей той, при которой наблюдается переход от ламинарного движения к турбулентному. Скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется *критической*. Исследованиями О. Рейнольдса было выявлено существование двух критических скоростей: одной – при переходе ламинарного режима в турбулентный режим, она называется верхней критической скоростью $V_{в.кр}$, другой – при переходе турбулентного режима в ламинарный режим, она называется нижней критической скоростью $V_{н.кр}$. Исследованиями также доказано, что значение верхней критической скорости зависит от внешних условий опыта: постоянства температуры, уровня вибрации опытной установки и т. д. Нижняя критическая скорость в широком диапазоне изменения внешних условий остается практически неизменной. Опытами было установлено, что нижняя критическая скорость для потока в кругло-

цилиндрической трубе пропорциональна кинематической вязкости ν исследуемой жидкости и обратно пропорциональна диаметру трубы d :

$$V_{н.кр} = Kv / d. \quad (8.1)$$

Коэффициент пропорциональности K оказался одинаковым для различных V и d :

$$K = V_{н.кр} d / \nu. \quad (8.2)$$

В честь О. Рейнольдса этот коэффициент был назван критическим числом Рейнольдса и обозначен $Re_{кр}$.

Для любого потока по известным V , d , ν можно составить и вычислить число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (8.3)$$

и сравнить его с критическим значением $Re_{кр}$. Если $Re < Re_{кр}$, то $V < V_{н.кр}$ и режим движения жидкости ламинарный; если $Re > Re_{кр}$, то $V > V_{н.кр}$ и режим движения, как правило, турбулентный.

Так как переход от устойчивого ламинарного режима к устойчивому турбулентному движению жидкости не происходит мгновенно, то в некотором диапазоне скоростей намечается переходный режим, который принято относить к турбулентному.

В общем случае число Рейнольдса определяется безразмерным комплексом

$$Re = \frac{Vl}{\mu / \rho} = \frac{Vl}{\nu}, \quad (8.4)$$

составленным из четырех величин: динамической вязкости μ , плотности жидкости ρ , характерного геометрического размера живого сечения l и средней скорости потока V .

Поскольку характерный размер живого сечения выбирается произвольно, число Рейнольдса имеет индекс, указывающий выбранную линейную величину. Чаще всего в качестве характерных линейных величин принимают диаметр трубы d , гидравлический радиус R или глубину потока в открытом русле (канале) h . Тогда

$$Re_d = Vd / \nu; \quad Re_R = VR / \nu; \quad Re_h = Vh / \nu. \quad (8.5)$$

Число Re_d в учебной и справочной литературе обычно обозначается без индекса.

Критическое число Рейнольдса для потоков, в которых в качестве характерной линейной величины принят гидравлический радиус R , составляет

$$Re_{крR} = V_{н.кр} R / \nu = 580.$$

Задачи исследования:

- 1) установить визуально наличие ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости;
- 2) вычислить по результатам каждого опыта критерий Рейнольдса и дать заключение о режиме движения жидкости.

Лабораторная установка. Установка состоит из напорного резервуара 4 (рис. 8.1), стеклянной трубы 5, сливной воронки для поддержания постоянного напора, зажимов 3 и 6 на резиновых трубках, регулирующих подачу жидкости в приборе, трубки 1 для ввода в стеклянную трубу подкрашенной струйки, колбы 2 с окрашенной жидкостью и напорной линии с вентилем, с помощью которых производится подача жидкости в резервуар.

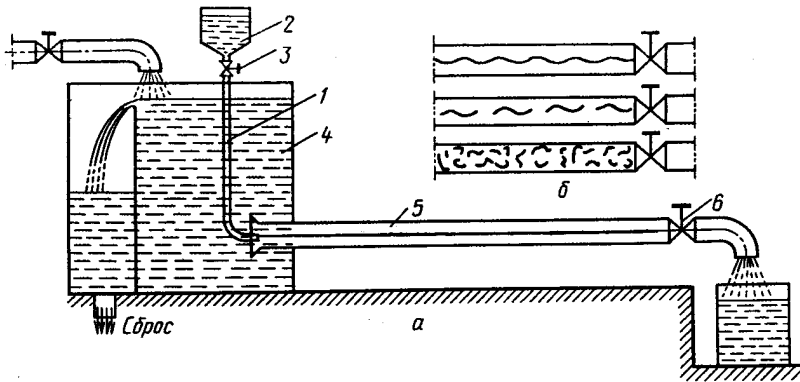


Рис. 8.1. Схема опытной установки

Проведение опытов. В работе выполняются четыре опыта, различающихся между собой режимом движения потока в стеклянной трубе.

Порядок проведения опытов приведен ниже.

1. Устанавливаем такую подачу воды, чтобы уровень жидкости в резервуаре 4 сохранялся постоянным, при этом должен быть небольшой перелив через сливную воронку.

2. Производится небольшое открытие зажима б, и в стеклянную трубку 5 подается подкрашенная струйка.

3. По визуальным наблюдениям за поведением подкрашенной струйки устанавливается режим движения жидкости.

4. Определяется время t наполнения мерного цилиндра и объем жидкости W .

5. Замеряется температура T жидкости и по табл. 1 приложения устанавливается кинематическая вязкость воды.

Поддерживая постоянный уровень жидкости в резервуаре 1 и постепенно увеличивая расход, опыты повторяют. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 8.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 8.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов			
		1	2	3	4
1. Объем воды в мерном цилиндре W	см ³				
2. Время наполнения мерного цилиндра t	с				
3. Расход Q	см ³ /с				
4. Средняя скорость V	см/с				
5. Температура воды T	°C				
6. Кинематический коэффициент вязкости ν	см ² /с				
7. Число Рейнольдса Re	–				
8. Режим движения: наблюдаемый вычисленный	– –				

Постоянные величины: диаметр трубы $d = \dots$ см; площадь сечения трубы $\omega = \dots$ см².

Обработка результатов.

1. Определяется площадь сечения трубы 5, расход $Q = W/t$ и средняя скорость потока $V = Q/\omega$.

2. Вычисляется число Рейнольдса по зависимости (8.3).

3. Сопоставляются полученные во всех опытах числа Рейнольдса с критическим $Re_{кр} = 2320$ и устанавливается режим движения жидкости.

4. Эти результаты сопоставляются с визуальными наблюдениями и дается заключение о соответствии критерия Рейнольдса данным опытов.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют режимы движения жидкости и чем они отличаются?
2. Как определяется режим движения с помощью критерия Рейнольдса?
3. Какие факторы влияют на режим движения жидкости?

9.

МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Местными гидравлическими сопротивлениями называются элементы трубопроводов, каналов, в которых потери энергии происходят за счет деформации потока и вызваны изменением размеров или их конфигурации. Причинами этих потерь являются изменение скорости, отрыв транзитного потока от стенок и вихреобразование. В местном гидравлическом сопротивлении часть механической энергии, которой обладает поток, переходит в тепло и рассеивается в нем.

К простейшим местным сопротивлениям относятся внезапные или постепенные расширения, сужения и повороты канала, трубопровода. Более сложные сопротивления (например, вентиль, клапан и др.) представляют собой соединения или комбинации перечисленных простейших сопротивлений.

Потери напора в любом местном сопротивлении можно определить по формуле Вейсбаха:

$$h_{\text{м}} = \zeta_{\text{м1}} \frac{V_1^2}{2g} = \zeta_{\text{м2}} \frac{V_2^2}{2g}, \quad (9.1)$$

где $\zeta_{\text{м1}}$ – коэффициент местного гидравлического сопротивления, определенный по скорости V_1 в трубе перед местным гидравлическим сопротивлением;

$\zeta_{\text{м2}}$ – коэффициент местного гидравлического сопротивления, определенный по скорости V_2 в трубе за местным гидравлическим сопротивлением.

Для простоты пользования литературными источниками по определению коэффициентов местных гидравлических сопротивлений их значения всегда приводятся по скорости V_2 в трубе за местным сопротивлением.

Тогда

$$h_M = \zeta_M \frac{V_2^2}{2g}. \quad (9.2)$$

Как видно из формулы (9.2), коэффициент ζ_M – величина безразмерная. Он представляет собой ту часть кинетической энергии, которая теряется в местном гидравлическом сопротивлении.

Обычно коэффициент ζ_M определяется опытным путем и приводится в справочной литературе в виде таблиц, графиков, эмпирических формул. Теоретические зависимости получены лишь для ζ_M некоторых местных сопротивлений. Экспериментальное определение сводится к вычислению его из уравнения (9.2) по полученным опытным путем значениям h_M и V_2 . При этом местные потери напора h_M находятся из уравнения Бернулли:

$$h_M = H_1 - H_2,$$

где H_1 и H_2 – полные напоры в сечениях I – I и II – II (рис. 9.1).

Для подсчета полных напоров используются показания пьезометров и полученные опытным путем величины скорости потока на входе и выходе местного сопротивления:

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}, \quad (9.3)$$

$$H_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}. \quad (9.4)$$

В случае, когда местное сопротивление расположено на горизонтальном участке трубопровода постоянного сечения, потери напора в нем равны разности показаний пьезометров на входе и выходе:

$$h_M = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}. \quad (9.5)$$

Задачи исследования:

1) провести на лабораторной установке необходимые опыты и определить коэффициенты $\zeta_M^{\text{оп}}$ нескольких местных сопротивлений (по указанию преподавателя);

2) найти в справочных материалах коэффициенты $\zeta_{\text{м}}^T$ для аналогичных местных сопротивлений для условий опытов;

3) сравнить полученные опытные величины со справочными.

Лабораторная установка. Установка (рис. 9.1) состоит из трубопровода 1, на котором последовательно расположены местные гидравлические сопротивления: внезапное расширение 2, внезапное сужение 3, колено 4, задвижка 5, диффузор 6, конфузор 7 и кран 8, и пьезометров на входе и выходе каждого сопротивления. В трубопровод поступает вода из резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень. Для регулирования расхода на конце трубопровода установлен вентиль 9.

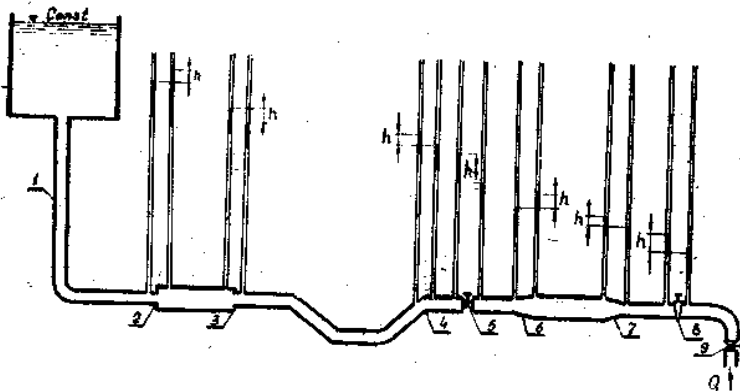


Рис. 9.1. Схема опытной установки

Проведение опытов.

1. Выписываются из технической характеристики лабораторной установки величины внутренних диаметров труб, замеряются угол поворота колена, степень открытия задвижки, угол открытия крана, длина диффузора и конфузора (для определения угла конусности). Результаты записываются в табл. 9.1.

2. Вентилем устанавливается в трубопроводе постоянный расход, который измеряется весовым способом (с помощью мерного бака, секундомера и весов) при установившемся движении потока.

3. Снимаются показания пьезометров на входе и выходе каждого из указанных местных сопротивлений.

Результаты измерений и вычислений по проведенным опытам записываются в табл. 9.2 журнала лабораторных работ.

Таблица 9.1. Параметры изучаемых местных сопротивлений

Местное сопротивление		d_1 , см	ω_1 , см ²	d_2 , см	ω_2 , см ²	Другие пара- метры
Наименование	Схема					
Внезапное расширение						
Внезапное сужение						
Колено						
Задвижка						
Диффузор						
Конфузор						
Кран						

Таблица 9.2. Измеренные и вычисленные показатели

Наименование	Единица измерения	Внезапное расширение	Внезапное сужение	Колено	Задвижка	Диффузор	Конфузор	Кран
1. Скорость потока перед сопротивлением V_1	см/с							
2. Скоростной напор перед сопротивлением $V_1^2/(2g)$	см							
3. Скорость потока за сопротивлением V_2	см/с							
4. Скоростной напор за сопротивлением $V_2^2/(2g)$	см							
5. Показание пьезометра перед сопротивлением $P_1 / (\rho g)$	см							
6. Показание пьезометра за сопротивлением $P_2 / (\rho g)$	см							
7. Полный напор H_1	см							
8. Полный напор H_2	см							
9. Потери напора h_m	см							
10. Коэффициент местного гидравлического сопротивления: опытный $\zeta_m^{оп}$ табличный $\zeta_m^т$	— —							
11. Относительная разность $\Delta\zeta_m$	%							

Постоянные величины: время наполнения мерного бака $t = \dots$ с; объем воды в мерном баке $W = \dots$ см³; расход воды в трубопроводе $Q = \dots$ см³/с.

Обработка результатов.

1. Вычисляются расход в трубопроводе $Q = W/t$, площади и средние скорости потока на входе и выходе исследуемых местных сопротивлений $V_1 = Q/\omega_1$ и $V_2 = Q/\omega_2$.

2. По формуле (9.4) определяются напоры на входе и выходе каждого местного сопротивления, а по (9.3) – потери напора.

3. Опытный коэффициент местного сопротивления определяется из формулы (9.2):

$$\zeta_{\text{м}}^{\text{оп}} = \frac{h_{\text{м}}}{V_2^2 / (2g)}. \quad (9.6)$$

4. Полученные опытные значения $\zeta_{\text{м}}^{\text{оп}}$ сопоставляются с приведенными в литературе $\zeta_{\text{м}}^{\text{т}}$ (табл. 2 приложения).

Контрольные вопросы

1. Что называется местным сопротивлением?
2. Почему возникают потери напора в местных сопротивлениях?
3. Как определить потери напора или потери давления в местном сопротивлении?
4. Какой физический смысл имеет коэффициент местного сопротивления?

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ

Потери удельной энергии (напора) по длине потока в напорном трубопроводе круглого сечения определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (10.1)$$

- где λ – гидравлический коэффициент трения (коэффициент Дарси);
 ℓ – длина участка трубопровода, на котором определяются потери напора;
 d – внутренний диаметр трубопровода;
 V – средняя скорость движения потока.

Многочисленными исследованиями установлено, что гидравлический коэффициент трения зависит от числа Рейнольдса ($Re = Vd / \nu$, где ν – кинематическая вязкость жидкости), диаметра и так называемой эквивалентной величины выступов (Δ_s) шероховатости трубопровода. Однако в разных условиях движения потоков влияние этих факторов сказывается по-разному и прежде всего – режима движения жидкости. Поэтому влияние их на гидравлический коэффициент трения рассмотрим отдельно для каждого режима.

Ламинарный режим движения. Как отмечалось в работе 8, ламинарный поток имеет слоистый характер – частицы жидкости движутся с различными скоростями параллельно оси трубы без перемешивания. Касательные напряжения, которые возникают между смещающимися параллельными слоями жидкости, обусловлены вязкостью жидкости и подчиняются закону жидкостного трения Ньютона, который имеет следующую запись:

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dr}, \quad (10.2)$$

где τ – касательное напряжение;

μ – динамическая вязкость жидкости;

du/dr – градиент скорости.

Используя общий закон распределения касательных напряжений

$$\tau = \rho g R I, \quad (10.3)$$

где ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения;

R – гидравлический радиус потока;

I – гидравлический уклон $I = h_{дл}/\ell$. Выражая в нем τ формулой (10.2), получим дифференциальное уравнение, определяющее скорость u как функцию радиуса r трубопровода:

$$du = -\frac{\rho g I}{2\mu} r dr. \quad (10.4)$$

В результате интегрирования этого уравнения с учетом граничного условия ($u = 0$ при $r = r_0$, где r_0 – радиус трубопровода) получаем параболический закон распределения скорости (рис. 10.1) по сечению.

$$u = \frac{\rho g I}{4\mu} (r_0^2 - r^2). \quad (10.5)$$

Максимальная скорость будет на оси трубы:

$$u_{\max} = \frac{\rho g I}{4\mu} r_0^2. \quad (10.6)$$

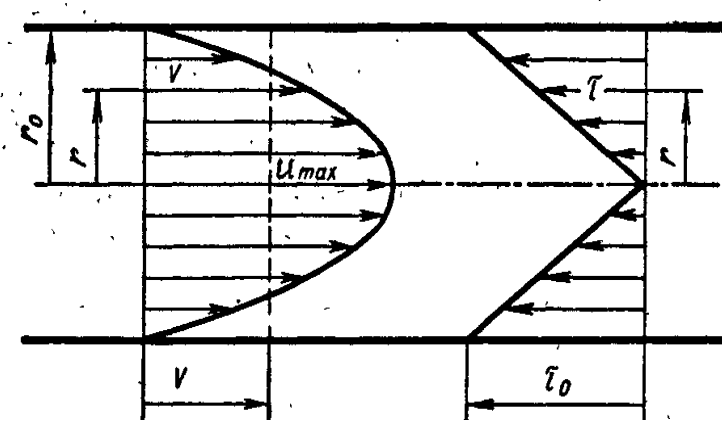


Рис. 10.1. Распределение скоростей и касательных напряжений по сечению ламинарного потока в круглой трубе

Используя выражение (10.6), можно представить найденный закон в форме

$$u = u_{\max} (1 - r^2 / r_0^2). \quad (10.7)$$

Определив расход жидкости суммированием расходов через элементарные кольцевые площадки живого сечения потока, найдем его среднюю скорость:

$$V = \frac{Q}{\pi r_0^2} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) 2\pi r dr = \frac{u_{\max}}{2}. \quad (10.8)$$

Следовательно, средняя скорость потока равна половине максимальной.

Решая совместно уравнения (10.6) и (10.8), получаем закон гидравлического трения в потоке при ламинарном режиме (формула Пуазейля)

$$h_{\text{дл}} = \frac{32\nu\ell V}{gd^2}, \quad (10.9)$$

из которого следует, что потери напора на трение по длине потока пропорциональны средней скорости движения потока и кинематической вязкости жидкости.

Приведя последнюю формулу к виду (10.1), получим гидравлический коэффициент трения для ламинарного потока:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (10.10)$$

Таким образом, при ламинарном режиме движения жидкости, когда $Re = \frac{Vd}{\nu} \leq Re_{\text{кр}} = 2320$, гидравлический коэффициент трения λ определяется по формуле (10.10). Теоретические результаты хорошо подтверждаются опытом для изотермических потоков, в которых отсутствует теплообмен с окружающей средой.

Турбулентный режим движения. Турбулентный поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением частиц жидкости. Наряду с основным поступательным перемещением жидкости вдоль трубы наблюдаются незакономерные поперечные перемещения и вращательные движения (завихривания) частиц, которые приводят к интенсивному перемешиванию жидкости.

Измерения скоростей в различных точках потока чувствительными самопишущими приборами обнаруживают *пульсации* скоростей, т. е. весьма быстрые и беспорядочные их колебания около некоторых средних значений, которые называют *осредненными* местными скоростями. На рис. 10.2 изображены пульсации продольной скорости в определенной точке потока.

За осредненную скорость в данной точке принимают такое постоянное значение скорости, при котором через любую площадку, содержащую эту точку, за время осреднения проходит объем жидкости, равный истинному; таким образом, проекция осредненной скорости на некоторое направление s определяется по формуле

$$u = \frac{1}{T} \int_0^T u_s dt, \quad (10.11)$$

где T – период осреднения;

u_s – проекция мгновенной местной скорости на это направление.

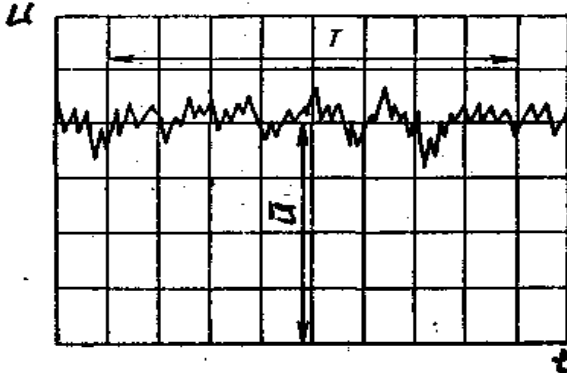


Рис. 10.2. Пульсации продольной скорости в турбулентном потоке

При достаточно большом периоде осреднения (по сравнению со средним периодом пульсаций, который обычно измеряется сотыми и тысячными долями секунды) величина u_s оказывается практически не зависящей от T ; в этом проявляется основная статистическая закономерность турбулентного потока.

Аналогичным образом происходят пульсации давлений и касательных напряжений в различных точках потока. Следовательно, турбулентный поток является по своей природе неустановившимся движением.

Так как пульсации имеют беспорядочный, случайный характер, установить зависимости между мгновенными характеристиками потока оказывается невозможным. Вместе с тем для большинства технических задач существенны не мгновенные пульсирующие величины местных скоростей и напряжений, а лишь их осредненные во времени значения. Поэтому при гидравлических расчетах турбулентных потоков обычно пользуются их осредненными характеристиками.

Замена действительного неустановившегося движения более простой схемой осредненного установившегося потока чрезвычайно облегчает изучение турбулентного потока, сохраняя вместе с тем его главные закономерности.

Измерения скоростей показывают, что при переходе к турбулентному режиму у стенок сохраняется тонкий слой жидкости, в котором частицы, подторможенные и направленные стенками, сохраняют в основном слоистый характер движения (так называемый ламинарный, или вязкий, подслой). Поэтому профиль осредненных скоростей имеет два значительно различающихся участка (рис. 10.3). В турбулентном ядре благодаря интенсивному поперечному перемешиванию, приводящему к выравниванию скоростей частиц, осредненные скорости отличаются незначительно и их распределение по основной части сечения оказывается более равномерным, чем при ламинарном режиме. В пределах вязкого подслоя происходит весьма резкое падение скоростей до нулевого значения на стенке.

Следует заметить, что поток внутри вязкого подслоя не является строго ламинарным, так как в нем существуют небольшие турбулентные пульсации скоростей и давлений и возникают периодические обмены с внешними турбулизованными слоями.

Толщина вязкого подслоя, который еще называется ламинарной пленкой δ (рис. 10.3), чрезвычайно мала (сотые и тысячные доли диаметра трубопровода) и определяется по зависимости

$$\delta = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}. \quad (10.12)$$

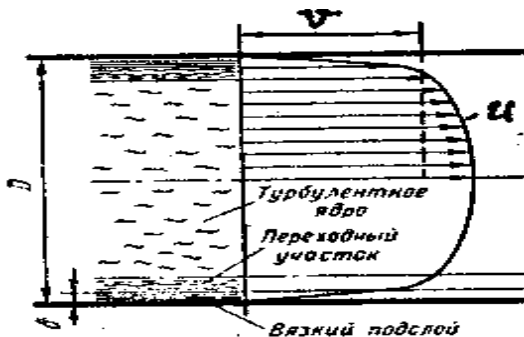


Рис. 10.3. Схема распределения осредненных скоростей в турбулентном потоке

Между турбулентным ядром и вязким подслоем имеется тонкий переходный участок, в котором по мере приближения к подслою резко уменьшаются турбулентные пульсации и интенсивно уменьшаются осредненные скорости. Так как характеристики потока изменяются по радиусу непрерывно, установить границы между этими участками можно только условно.

Переход потока в турбулентное состояние приводит к сильному возрастанию сопротивления, что связано с увеличением напряжений трения. В турбулентном ядре, где градиенты осредненной скорости невелики, напряжения вязкостного трения играют незначительную роль. Основная часть сопротивления создается так называемыми турбулентными касательными напряжениями, которые возникают из-за непрерывных поперечных перемещений (беспорядочного перемешивания) частиц. Обмен частицами между соседними слоями сопровождается соответствующим увеличением или уменьшением количества движения этих частиц (турбулентный обмен количеством движения). Так как при этом более быстрые слои тормозятся, а более медленные ускоряются, то между ними возникает динамическое взаимодействие, которое проявляется в виде турбулентных касательных напряжений.

Наибольшие турбулентные касательные напряжения возникают вблизи стенок у внешней границы турбулентного ядра. На этом участке наиболее интенсивно образуются вихри, которые затем рассеиваются в турбулентном ядре и гасятся силами вязкостного трения. Энергия вращения вихрей переходит при этом в тепло.

Точной теории турбулентного движения ввиду большой сложности его структуры в настоящее время не существует. Поэтому основную роль при изучении этого движения и при разработке практических методов расчета играют опытные данные. В результате многочисленных опытных исследований установлено, что свойства турбулентного потока (распределение осредненных скоростей по сечению, коэффициент сопротивления трения и др.) зависят от числа Re и относительной шероховатости стенок трубопровода.

По характеру и степени влияния этих факторов при турбулентном режиме различают зоны *гидравлически гладких* и *гидравлически шероховатых труб*, разделенные *переходной зоной*.

В зоне гидравлически гладких труб (рис. 10.4, *a*) толщина δ вязкого подслоя значительно больше максимальной высоты бугорков шерохо-

ватости $(\delta) \Delta_{\max}$) или числа Рейнольдса, которое находится в интервале $2320 < Re \leq Re_{\text{гт}}$:

$$Re_{\text{гт}} = 27 \left(\frac{d}{\Delta_3} \right)^{1,14}, \quad (10.13)$$

или приближенно

$$Re_{\text{г}} = 20d / \Delta_3, \quad (10.14)$$

где Δ_3 – эквивалентная величина выступов шероховатости, пояснение которой будет дано ниже.

При этом бугорки утоплены в вязком подслое, плавно обтекаются с очень малыми скоростями и не влияют на распределение скоростей и потерь напора. Гидравлический коэффициент трения является функцией только числа Рейнольдса:

$$\lambda = f(Re).$$

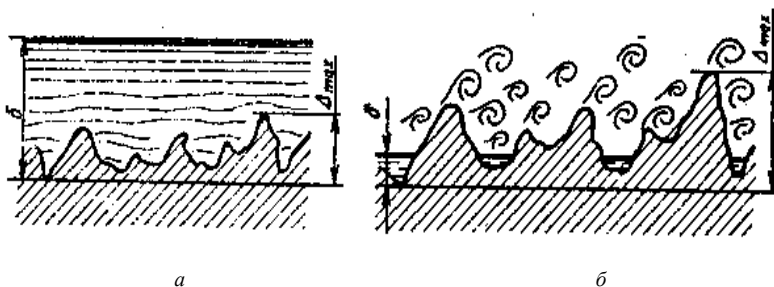


Рис. 10.4. Течение у стенок трубы при турбулентном режиме:
a – гидравлически гладкие трубы; *б* – гидравлически шероховатые трубы

Достаточно хорошо совпадают с опытом значения λ , вычисленные по формуле Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \ell g Re - 1,5)^2}. \quad (10.15)$$

При $Re \leq 10^5$ применима также формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{1/4}}. \quad (10.16)$$

Пользуясь выражением (10.16), можно получить из общей формулы (10.1) следующую зависимость потери напора на трение от кинематической вязкости жидкости ν и средней скорости потока V для гидравлически гладких труб:

$$h_{\text{дл}} \sim \nu^{0,25} V_3^{1,75}.$$

Сравнение с ламинарным режимом (для которого $h_{\text{дл}} \sim \nu$) показывает, что при переходе к турбулентному режиму влияние вязкости на сопротивление значительно уменьшается, а значительно возрастает влияние скорости движения жидкости. Это объясняется тем, что в турбулентном потоке вязкостное сопротивление (пропорциональное первой степени скорости) сосредоточено лишь в пределах тонкого слоя у стенок. Основная часть сопротивления создается в результате перемешивания частиц жидкости в переходном участке и турбулентном ядре и связана с рассеиванием кинетической энергии вращения завихренных частиц, которая пропорциональна квадратам скоростей потока. В зоне гидравлически шероховатых труб (рис. 10.4, б) толщина δ вязкого подслоя значительно меньше высоты бугорков шероховатости ($\delta \ll \langle \Delta_{\text{мкx}} \rangle$) или числа Рейнольдса, которое находится в соотношении $Re \geq Re_{\text{кв}}$:

$$Re_{\text{кв}} = 21,6C \frac{d}{\Delta_3}, \quad (10.17)$$

или приближенно

$$Re_{\text{кв}} = 500 \frac{d}{\Delta_3}, \quad (10.18)$$

где C – коэффициент Шези, который может определяться по формуле И. И. Агроскина

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \ell g R, \quad (10.19)$$

где n – коэффициент шероховатости стенок трубопровода, который принимается по справочной литературе (табл. 3 приложения);
 R – гидравлический радиус. В формулу (10.19) подставляется только в метрах.

При этом бугорки выступов шероховатости почти целиком оказываются в турбулентном ядре потока. Обтекание бугорков происходит с большими скоростями и сопровождается интенсивными отрывами вихрей, которые попадают в центральную часть потока и усиливают его турбулентность. Рассеивание кинетической энергии вращения этих вихрей, происходящее в процессе перемешивания частиц и приводящее к переходу этой энергии в тепло, увеличивает потерю напора. Соответственно возрастает также и касательное напряжение на стенке, которое создается в основном в результате перепадов давлений, возникающих на бугорках при их отрывном обтекании.

Поскольку слоистое пристенное течение практически полностью разрушено, влияние сил вязкостного трения на поток становится исчезающе малым и характеристики потока оказываются независимыми от числа Рейнольдса (зона *турбулентной автоточности*). Гидравлический коэффициент трения является функцией только относительной шероховатости

$$\lambda = f(\Delta_s / d),$$

возрастая вместе с увеличением Δ_s / d . Потери напора в этой зоне не зависят от вязкости и пропорциональны квадрату средней скорости потока ($h_{\text{дл}} \sim V^2$), квадратичный закон сопротивления).

В этой зоне сопротивления гидравлический коэффициент трения может определяться по формуле Л. Прандтля

$$\lambda = 0,25 / (\lg 0,27 \frac{\Delta_s}{d})^2; \quad (10.20)$$

по формуле Б. Л. Шифринсона (при $\frac{\Delta_s}{d} < 0,007$)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25}, \quad (10.21)$$

а также по коэффициенту Шези

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (10.22)$$

В переходной зоне по мере возрастания числа Рейнольдса уменьшается толщина вязкого подслоя. При этом бугорки шероховатости начинают все более выступать за пределы вязкого подслоя, вызывая дополнительные вихреобразования и увеличивая потерю напора. Считается, что в этой зоне высота вязкого подслоя δ примерно равна высоте бугорков шероховатости Δ_{\max} , т. е. ($\delta \approx \Delta_{\max}$), или числу Рейнольдса, которое находится в интервале

$$Re_{\text{гл}} < Re < Re_{\text{кв}}.$$

Гидравлический коэффициент трения в этой зоне зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок

$$\lambda = f(Re, \Delta / d)$$

и может определяться по формуле А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}; \quad (10.23)$$

по формуле Френкеля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[0,27 \frac{\Delta_3}{d} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]. \quad (10.24)$$

Принятая в гидравлике методика определения Δ учитывает, что естественная шероховатость стенок трубопроводов всегда неоднородна (бугорки шероховатости имеют различные формы, размеры и расположение). Микрорельеф поверхности стенок зависит от нескольких факторов: материала, способа изготовления трубы, физико-химических свойств жидкости и срока эксплуатации (в связи с возможной коррозией стенок и образованием на них отложений).

Поскольку естественная шероховатость имеет многообразные нерегулярные формы (рис. 10.5, а), установить каким-либо геометрическим способом осредненное значение высоты бугорков, определяющее влияние шероховатости на потерю напора, оказывается невозможным. Поэтому параметр шероховатости вводится как условная величина,

определяемая по специальной шкале искусственной однородной шероховатости (рис. 10.5, б).



Рис. 10.5. Естественная (а) и эквивалентная зернистая (б) шероховатости

Такая шкала построена с помощью калиброванных зерен песка, наклеиваемых на гладкую поверхность трубы. Набор таких труб при различном диаметре зерен Δ дает ряд значений относительной шероховатости Δ/d , в функции которой получены значения λ (формула Никурадзе):

$$\lambda = \frac{1}{(2\ell g d / \Delta + 1,14)^2}. \quad (10.25)$$

С помощью такой шкалы за абсолютную шероховатость стенок принимают *эквивалентную* шероховатость, представляющую собой такой размер зерен песка искусственной шероховатости, который в квадратичной зоне равноценен по гидравлическому сопротивлению данной неоднородной шероховатости. Эквивалентная шероховатость определяется путем испытаний данной трубы в квадратичной зоне сопротивления и вычисления Δ по опытному значению λ из формулы (10.22).

Для металлических труб эквивалентная шероховатость составляет 0,5–0,7 максимальной высоты бугорков естественной шероховатости.

Задачи исследования:

- 1) провести на лабораторной установке необходимые опыты и определить гидравлические коэффициенты трения при различных скоростях движения потока в трубопроводе;
- 2) вычислить коэффициенты λ для условий опытов по рекомендуемым выше формулам;
- 3) сопоставить полученные результаты (вычислить $\Delta\lambda$).

Лабораторная установка. Лабораторная установка (рис. 10.6) состоит из трубопровода 4 постоянного сечения, напорного резервуара 1, в котором поддерживается постоянный уровень воды. Расход в трубопроводе регулируется задвижкой 5. На прямолинейном горизонтальном участке трубопровода установлены на расстоянии l друг от друга пьезометры 2 и 3.

Проведение опытов.

1. Задвижкой 5 устанавливается постоянный небольшой расход, который измеряется весовым способом (с помощью мерного бака, секундомера и весов).

2. Измеряются температура воды T , расстояние между пьезометрами l , внутренний диаметр d трубопровода, снимаются показания пьезометров (после того, как они станут постоянными).

3. При увеличении расхода проводятся еще два аналогичных опыта. Результаты измерений и обработки опытов записываются в табл. 10.1 журнала лабораторных работ.

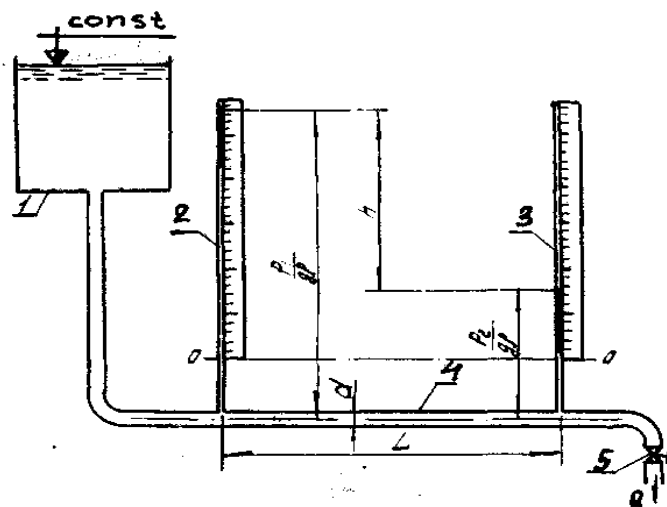


Рис. 10.6. Схема опытной установки

Т а б л и ц а 10.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Диаметр трубы d	см			
2. Площадь сечения ω	см ²			
3. Объем воды в мерном баке W	см ³			
4. Время наполнения мерного бака t	с			
5. Расход Q	см ³ /с			
6. Средняя скорость V	см/с			
7. Показание первого пьезометра $\frac{P_1}{\rho g}$	см			
8. Показание второго пьезометра $\frac{P_2}{\rho g}$	см			
9. Потеря напора $h_{тр}$	см			
10. Расстояние между сечениями L	см			
11. Температура воды T	°С			
12. Кинематический коэффициент вязкости ν	Ст			
13. Число Рейнольдса Re	–			
14. Зона сопротивления	–			
15. Коэффициент Дарси: опытный $\lambda_{оп}$	–			
вычисленный λ_p	–			
16. Относительная разность $\Delta\lambda$	%			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площадь сечения трубопровода, расход и средняя скорость потока.

2. Вычисляются потери напора по длине опытного участка трубопровода. Для горизонтального трубопровода постоянного сечения в соответствии с уравнением Бернулли

$$h_{дл} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} . \quad (10.26)$$

3. Из формулы (10.1) определяется опытное значение гидравлического коэффициента трения.

4. С учетом того, что в опыте с самым большим расходом область гидравлического сопротивления квадратичная, из формулы Никурадзе (10.25) вычисляется величина Δ_3 путем подстановки в нее опытного значения гидравлического коэффициента трения.

5. Далее устанавливаются по вышеизложенным рекомендациям границы зон гидравлического сопротивления.

6. В зависимости от зоны сопротивления применяется расчетная формула для определения расчетной величины гидравлического коэффициента трения λ_p .

7. Вычисляется относительное отклонение λ_p от $\lambda_{оп}$.

Контрольные вопросы

1. Как определить опытным путем потери напора по длине в горизонтальном и наклонном трубопроводе?

2. Что такое гидравлический коэффициент трения?

3. От чего зависит коэффициент λ при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости?

11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

При истечении жидкости из малого отверстия в тонкой стенке и насадков при постоянном напоре расход определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (11.1)$$

где μ – коэффициент расхода;

ω – площадь отверстия в тонкой стенке или насадка;

H_0 – расчетный напор.

Если жидкость вытекает из резервуара (рис. 11.1) при постоянном уровне H и давлении p_1 , то расчетный напор

$$H_0 = H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_0^2}{2g}, \quad (11.2)$$

где V_0 – средняя скорость движения жидкости в сечении 1–1 (рис. 11.1).

В частном случае, когда $p_1 = p_0$ и $V_0 = 0$, расчетный напор $H_0 = H$.

Коэффициент μ есть величина безразмерная. Он представляет собой отношение действительного расхода к тому расходу, который был бы в случае отсутствия сопротивлений и сжатия струи:

$$\mu = Q / (\omega \sqrt{2gH_0}). \quad (11.3)$$

Коэффициент расхода выражается через коэффициент сжатия струи и коэффициент скорости:

$$\mu = \varepsilon \varphi. \quad (11.4)$$

Коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (11.5)$$

где ω_c – площадь сжатого сечения струи после выхода ее из отверстия или насадка.

Для цилиндрического и коноидиального насадков $\varepsilon = 1,0$, т. е. струя не имеет сжатия на выходе. В случае конического сходящегося насадка коэффициент сжатия весьма близок к 1,0.

Коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \sum \zeta}}, \quad (11.6)$$

где α_c – коэффициент кинетической энергии в сжатом сечении струи;

$\sum \zeta$ – сумма коэффициентов сопротивлений на пути движения жидкости от резервуара до сжатого сечения.

Задачи исследования:

1) определить по результатам выполненных опытов коэффициенты расхода, сжатия, скорости при истечении жидкости из круглого отверстия в тонкой стенке, из внешнего цилиндрического и внешнего конического сходящегося насадков;

2) сопоставить полученные опытные коэффициенты с приведенными в литературе.

Лабораторная установка. Установка (рис. 11.1) состоит из резервуара 4, сливной воронки 2 для поддержания постоянного уровня H , фланца 5 со шпильками для крепления исследуемого насадка или диска 6 с отверстием, клапана 7 с рычагом 3 для перекрытия отверстия, пьезометра 1 для измерения H , задвижки 8 для регулировки расхода жидкости, поступающей в резервуар.

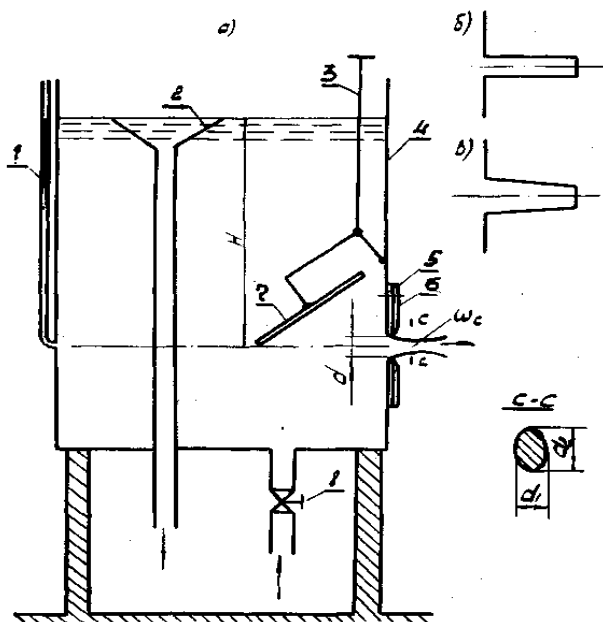


Рис. 11.1. Схема опытной установки:
a – общий вид; *б* – внешний цилиндрический насадок;
в – внешний конический сходящийся насадок;
с – сжатое сечение струи

Проведение опытов.

1. Резервуар наполняется водой, задвижкой 8 устанавливается такой расход, чтобы уровень в резервуаре был постоянным.
2. Измеряется диаметр отверстия.
3. Рычагом 3 открывается клапан 7.
4. Весовым способом измеряется расход истечения.
5. Штангенциркулем измеряются горизонтальный d_1 и вертикальный d_2 размеры струи в сжатом сечении.
6. По пьезометру 1 определяется геометрический напор H .
7. По мерной линейке определяется дальность L_x полета струи (на уровне пола).

Такие опыты проводятся с внешним цилиндрическим и коническим сходящимися насадками. Результаты измерений и вычислений записываются в табл. 11.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 11.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Круглое отверстие в тонкой стенке	Цилиндрический насадок	Конический сходящийся насадок
1. Диаметр отверстия d	см			
2. Площадь отверстия ω	см ²			
3. Объем воды в мерном баке W	см ³			
4. Время наполнения мерного бака t	с			
5. Расход Q	см ³ /с			
6. Напор над центром отверстия H	см			
7. Коэффициент расхода μ	—			
8. Размеры струи в сжатом сечении d_1 и d_2	см			
9. Площадь в сжатом сечении ω_c	см ²			
10. Коэффициент сжатия ε	—			
11. Коэффициент скорости φ	—			
12. Коэффициент сопротивления ζ	—			
13. Дальность отлета струи L_x	см			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площади отверстий в тонкой стенке и исследуемых насадках.

2. По формуле (11.3) определяется коэффициент расхода.

3. Определяется площадь сжатого сечения струи:

$$\omega_c = \frac{\pi}{4} d_1 d_2 . \quad (11.7)$$

4. По формуле (11.5) находится коэффициент сжатия струи.

5. Определяется коэффициент скорости:

$$\varphi = \mu / \varepsilon . \quad (11.8)$$

6. Определяется сумма коэффициентов сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = 1 / \varphi^2 - \alpha_c . \quad (11.9)$$

7. Полученные опытные коэффициенты сопоставляются с приведенными в литературе (табл. 3 приложения).

Контрольные вопросы

1. Какой физический смысл имеют коэффициенты расхода, сжатия, скорости и какая взаимосвязь между ними?
2. При каких условиях истечение из цилиндрического насадка становится таким же, как из отверстия в тонкой стенке?

12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ И ПОСТОЯННОМ ПРИТОКЕ

Истечение жидкости через отверстия и насадки при переменном напоре относится к области неустановившегося движения, когда характеристики потока – скорость истечения и напор – изменяются во времени.

Время понижения (повышения) уровня жидкости в резервуаре (рис. 12.1) с постоянной площадью его сечения при постоянном притоке определяется по формуле

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_a} \ln \frac{\sqrt{H_a} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_a} - \sqrt{H_2}} \right), \quad (12.1)$$

где Ω – площадь сечения резервуара;

μ – коэффициент расхода отверстия;

H_1 – начальный напор;

H_2 – конечный напор;

H_a – напор, соответствующий установившемуся движению, при котором расход из отверстия равен притоку:

$$H_a = \frac{Q_a^2}{\mu^2 \omega^2 2g}, \quad (12.2)$$

где Q_a^2 – расход, поступающий в резервуар.

Зная начальный напор H_1 и значение H_a , можно судить об изменении уровня жидкости в резервуаре. Возможны следующие условия:

$H_1 > H_a$ – уровень жидкости в резервуаре понижается;

$H_1 < H_a$ – уровень жидкости в резервуаре повышается;

$H_1 = H_a$ – уровень жидкости в резервуаре не изменяется.

Задачи исследования:

- 1) определить опытным путем время изменения напора от H_1 до H_2 ;
- 2) вычислить для условий опытов время изменения напора;
- 3) сопоставить время понижения уровней в опыте с расчетным.

Лабораторная установка. Установка состоит из резервуара 1 (рис. 12.1), фланца 2 для присоединения диска с отверстием 3, клапана 4 с системой рычагов 5 для перекрытия отверстия 3. Заполнение резервуара 1 водой производится через задвижку 7, установленную на трубопроводе 8. Опорожнение резервуара 1 производится через задвижку 9. Напор в резервуаре измеряется пьезометром 6.

Проведение опытов.

В лабораторной работе проводятся четыре опыта, различающихся между собой значением поступающего в резервуар расхода Q_a , начальным напором H_1 и конечным H_2 .

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) измеряются размеры сечения резервуара ℓ , b и диаметр отверстия d ;
- 2) резервуар 1 заполняется водой и задвижкой 7 устанавливается расход Q_a ;
- 3) открывается клапан 4. Выжидается некоторое время стабилизации уровня воды в резервуаре 1, который соответствует напору H_a , и его величина снимается по пьезометру 6;
- 4) открывается задвижка 9 и производится понижение уровня воды в резервуаре 1 (примерно на половину от величины H_a), после чего задвижка 9 закрывается;
- 5) выжидается некоторое время стабилизации уровня воды в резервуаре 1. Одновременно по пьезометру 6 фиксируется напор H_1 и включается секундомер;
- 6) после повышения напора до значения H_2 секундомер останавливается (напоры H_1 и H_2 назначаются произвольно). Затем опыт повторяется. Количество опытов устанавливается преподавателем.

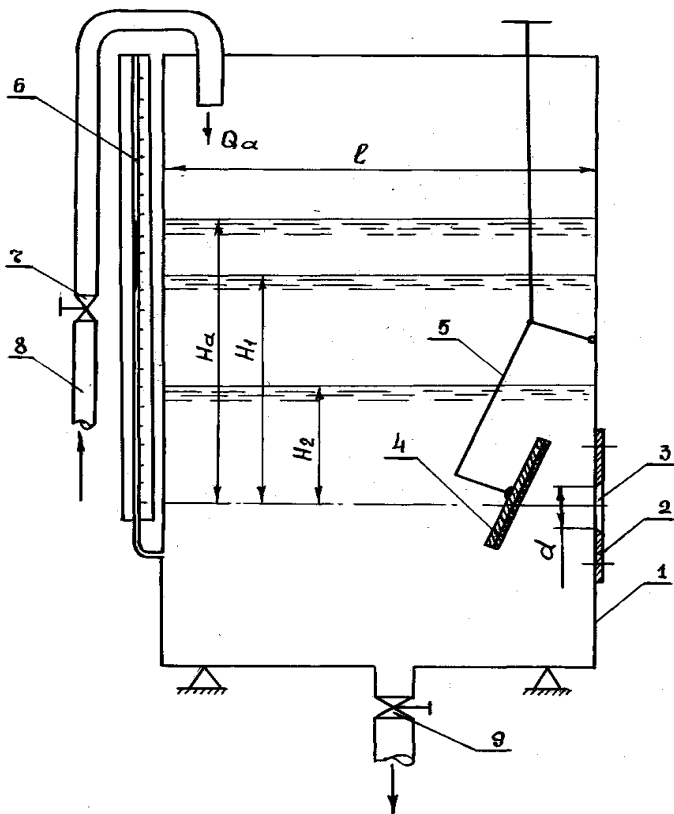


Рис. 12.1. Схема опытной установки

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 12.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 12.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
1. Размер резервуара в плане $\ell \times b$	см				
2. Площадь сечения резервуара Ω	см ²				
3. Диаметр отверстия d	мм				

1	2	3	4	5	6
4. Площадь сечения отверстия ω	см ²				
5. Коэффициент расхода μ	–				
6. Постоянный напор H_a	см				
7. Начальный напор H_1	см				
8. Конечный напор H_2	см				
9. Время опорожнения резервуара:					
опытное $t_{оп}$	с				
вычисленное t_p	с				
10. Разница Δt	%				

Обработка результатов.

1. Определяется площадь сечения резервуара и отверстия.
2. Время измерения напора от H_1 до H_2 вычисляется по формуле (10.1).
Коэффициент расхода μ для отверстия принимается из работы 11. Если эта работа не выполнялась, то коэффициент расхода принимается из справочной литературы.
3. Находится относительная разность в процентах между опытным $t_{оп}$ и вычисленным t_p временем истечения.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит время понижения (повышения) напора от H_1 до H_2 при притоке Q_a ?
2. Как устанавливается повышение или понижение уровня жидкости в резервуаре при истечении из отверстия с притоком?

13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ БЕЗ ПРИТОКА

Время изменения напора от H_1 до H_2 при истечении жидкости в атмосферу и постоянной площади резервуара, когда отсутствует приток, является частным случаем истечения с притоком.

Так как $Q_a = 0$, то $H_a = 0$ и формула (12.1) примет вид

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right). \quad (13.1)$$

Задачи исследования:

- 1) определить опытным путем время изменения напора от H_1 до H_2 ;
- 2) вычислить для условий опытов время изменения напора;
- 3) сопоставить время понижения уровней в опыте с расчетным.

Лабораторная установка.

Схема опытной установки показана на рис. 12.1, а ее описание дано в лабораторной работе 12.

Проведение опытов.

В лабораторной работе выполняются три опыта, различающихся между собой начальными H_1 и конечными H_2 напорами.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) замеряются размеры сечения резервуара ℓ , b и диаметр отверстия d ;
- 2) по пьезометру b определяется первоначальный напор H_1 ;
- 3) открывается клапан 4 и одновременно включается секундомер;
- 4) после падения напора до значения H_2 секундомер останавливается. Напоры H_1 до H_2 назначаются произвольно.

Результаты измерений и вычислений записываются в табл. 13.1 журнала лабораторных работ.

Обработка результатов.

1. Определяются площади сечения резервуара и отверстия.

2. Время изменения напора от H_1 до H_2 вычисляется по формуле (13.1).

Коэффициент расхода μ для отверстия принимается из работы 11. Если эта работа не выполнялась, то коэффициент расхода принимается из справочной литературы.

3. Находится относительная разность между опытным и вычисленным временем истечения.

Таблица 13.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Размер резервуара $\ell \times b$	см			
2. Площадь сечения резервуара Ω	см ²			
3. Диаметр отверстия d	мм			
4. Площадь сечения отверстия ω	см ²			
5. Коэффициент расхода μ	—			
6. Начальный напор H_1	см			
7. Конечный напор H_2	см			
8. Время истечения: опытное $t_{оп}$	с			
вычисленное t_r	с			
9. Относительная разность Δt	%			

Контрольные вопросы

1. Как определяется время изменения напора от H_1 до H_2 , если $H_a = 0$?
2. От каких факторов зависит время изменения напора от H_1 до H_2 ?

14. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДА ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ТРУБ

Трубопроводы, имеющие общие узловые точки в их начале и конце, называют параллельно соединенными (рис. 14.1). Такие трубопроводы обеспечивают повышенную надежность водоснабжения, так как в случае выхода из строя одного участка вода будет поступать по другому.

Поскольку параллельные трубопроводы разветвляются в общей точке A (рис. 14.1) с единым напором H_A и соединяются в другой общей точке B с единым напором H_B , то потери напора $h_{тр}$ в каждом из двух трубопроводов будут одинаковыми, т. е.

$$H_A - H_B = h_{тр1} = h_{тр2} = \ell_1 \frac{Q_1^2}{K_1^2} = \ell_2 \frac{Q_2^2}{K_2^2}, \quad (14.1)$$

где ℓ_1, ℓ_2 – длины соответственно первого и второго участков;

Q_1, Q_2 – расходы соответственно на первом и втором участках;

K_1, K_2 – расходные характеристики соответственно первого и второго трубопроводов, определяемые в общем виде по формуле $K = C\omega\sqrt{R}$.

Из уравнения (14.1) можно выразить один из расходов:

$$Q_2 = Q_1 \frac{K_2}{K_1} \sqrt{\ell_1 / \ell_2}. \quad (14.2)$$

Сумма расходов в общих трубопроводах равна расходу до их разветвления, т. е.

$$Q_1 + Q_2 = Q. \quad (14.3)$$

Решая систему уравнений (14.2) и (14.3), можно найти расходы на обоих параллельных участках.

Потери напора $h_{тр}$ между узловыми точками A и B определяют как потери напора на одном из участков (безразлично на котором) по формуле

$$h_{тр} = \ell \frac{Q^2}{K^2}. \quad (14.4)$$

Задачи исследования:

- 1) определить потери напора между узловыми точками параллельно соединенными трубами опытным путем $h_{тр}^{оп}$;
- 2) сравнить полученные величины с вычисленными по формуле (14.4).

Лабораторная установка. Установка (рис. 14.1) состоит из двух параллельно соединенных трубопроводов 1 и 2, напорного резервуара 3 с постоянно поддерживаемым уровнем и задвижки 6. В узловых точках A и B установлены пьезометры 4 и 5.

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой расходами, которые определяются весовым способом. Величина расхода регулируется задвижкой 6. После стабилизации уровней в пьезометрах 4 и 5 снимаются их показания H_A и H_B .

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 14.1 журнала лабораторных работ.

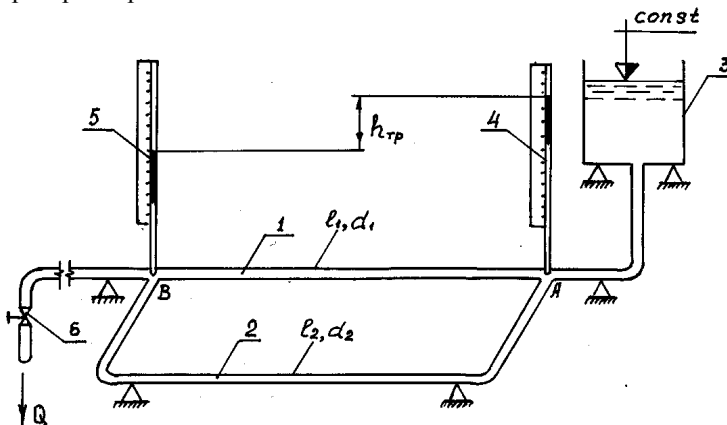


Рис. 14.1. Схема водопроводной сети с параллельным соединением труб

Т а б л и ц а 14.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Диаметр труб: первой ветви d_1 второй ветви d_2	см см			
2. Длина труб: первой ветви l_1 второй ветви l_2	см см			
3. Пьезометрический напор в узловых точках: A_{HA} B_{HB}	см см			
4. Расходная характеристика: первой ветви K_1 второй ветви K_2	см ³ /с см ³ /с			
5. Объем воды в мерном баке W	см ³			
6. Время наполнения мерного бака t	с			
7. Расход воды в трубах первой и второй ветвей Q	см ³ /с			
8. Расход воды в трубе первой (второй) ветви Q_1 (Q_2)	см ³ /с			
9. Потеря напора между узловыми точками: опытная $h_{тр}$ вычисленная $h_{тр}$	см см			
10. Относительная разность Δh	%			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площади сечений ω_1 и ω_2 , гидравлические радиусы R_1 и R_2 , коэффициенты Шези C_1 и C_2 , расходные характеристики K_1 и K_2 труб первой и второй ветвей.

2. Определяется суммарный расход Q воды в трубах первой и второй ветвей $Q_1 + Q_2$.

3. Определяется расход воды в трубе первой Q_1 или второй Q_2 ветви путем решения системы уравнений (14.2) и (14.3).

4. Устанавливаются потери напора между узловыми точками по опытным данным $h_{тр}^{оп} = H_A - H_B$ и по формуле (14.4).

5. Сопоставляются опытные $h_{тр}^{оп}$ и вычисленные по формуле (14.4) значения потерь напора.

Контрольные вопросы

1. Какие признаки работы характерны для трубопровода из параллельно соединенных труб?

2. Как определить расходы в параллельных ветвях трубопровода?

15. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДА С РАВНОМЕРНЫМ ПУТЕВЫМ РАСХОДОМ

Существуют конструкции трубопроводов различного назначения, в которых часть жидкости непрерывно отбирается по пути. Расход жидкости в таком трубопроводе переменный: он постепенно уменьшается по длине ℓ от начала к концу. В трубопроводе с равномерным путевым расходом $q = \Delta Q / \Delta \ell \approx \text{const}$. К таким трубопроводам можно отнести трубопроводы распылителей жидких ядохимикатов и удобрений, дождевальными аппаратами и т. п. Распределительный трубопровод, из которого вода отбирается по пути в одинаковые близкорасположенные здания или водоразборные колонки, также можно считать с некоторым приближением трубопроводом с равномерным путевым расходом (при одновременном включении всех потребителей).

В случаях, когда в трубопроводе кроме путевого расхода Q_p существует транзитный расход Q_t , потери напора $h_{тр}$ между узловыми точками A и B (рис. 15.1) определяются до формуле

$$h_{тр} = \ell \cdot Q_p^2 / K^2, \quad (15.1)$$

где Q_p^2 – расчетный расход на участке AB , определяемый по зависимости

$$Q_p = Q_t + 0,55 \cdot Q_p. \quad (15.2)$$

Задачи исследования:

1) определить потери напора между узловыми точками трубопровода с путевым и транзитным расходами опытным путем;

2) сравнить полученные величины с вычисленными по формуле (15.1).

Лабораторная установка. Установка (рис. 15.1) состоит из двух стальных труб, устроенных по типу труба 1 в трубе 2, напорного резервуара 3 с постоянно поддерживаемым уровнем и двумя задвижками 6 и 7. При этом трубопровод 1 имеет вдоль своей длины отверстия с расстоянием между ними на отдельных, по мере продвижения воды, участках 20, 18, 16 и 14 см. Это позволяет моделировать трубопровод с более или менее равномерным путевым расходом. В узловых точках A и B установлены пьезометры 4 и 5.

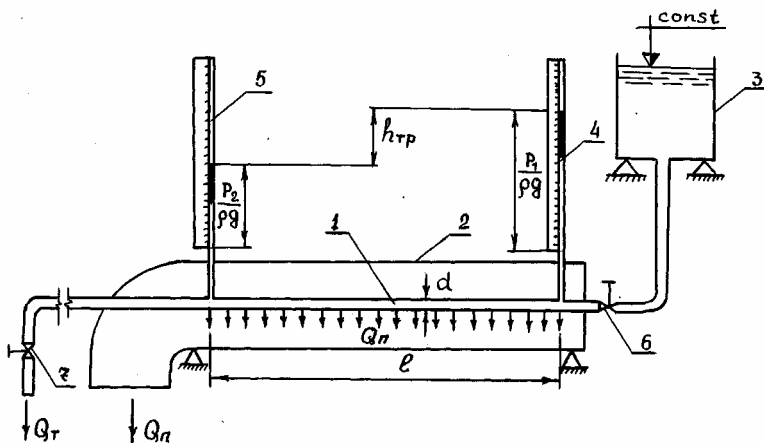


Рис. 15.1. Схема трубопровода с равномерным путевым расходом

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой транзитным Q_T и путевым Q_P расходами, которые определяются весовым способом. Величина расходов регулируется задвижками 6 и 7. После стабилизации уровней в пьезометрах 4 и 5 снимаются их показания H_A и H_B .

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 15.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 15.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1. Диаметр трубопровода d	см			
2. Длина трубопровода l	см			
3. Пьезометрический напор в узловых точках: $A H_A$ $B H_B$	см см			
4. Объем воды в мерном баке: транзитного расхода W_T путевого расхода W_P	см ³ см ³			
5. Время наполнения мерного бака: при транзитном расходе t_T при путевом расходе t_P	с с			

1	2	3	4	5
6. Величина расхода: транзитного Q_t путевого Q_n	см ³ /с см ³ /с			
7. Расходная характеристика трубопровода K	см ³ /с			
8. Потеря напора между узловыми точками A и B : опытная $h_{тр}$ вычисленная $h_{тр}$	см см			
9. Относительная разность Δh	%			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площадь сечения ω , гидравлический радиус R , коэффициент Шези C , находится расходная характеристика K трубы.

2. Определяются весовым способом транзитный Q_t и путевой Q_n расходы.

3. Вычисляется расчетный расход Q_p по зависимости (15.2).

4. Устанавливаются потери напора между узловыми точками по опытными данным

$$h_{тр}^{оп} = H_A - H_B$$

и по формуле (15.1).

5. Сопоставляются опытные и вычисленные по формуле (15.1) значения потерь на участке AB трубопровода.

Контрольные вопросы

1. Какие расходы проходят в начальном A и конечном B сечениях трубопровода?

2. Как изменяются показания пьезометров в точках A и B при увеличении открытия задвижки 7 ?

16. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

Кольцевая водопроводная сеть представляет собой замкнутую систему трубопроводов (рис. 16.1). В ней, в отличие от тупиковой сети, вода к любой узловой точке может подводиться с двух и более направлений. Поэтому такие сети более надежны, чем тупиковые, так как в случае неисправности одного из участков подача воды в узловые точки

обеспечивается по другим смежным участкам (хотя и в несколько меньшем количестве и при меньшем свободном напоре).

Расчет кольцевой водопроводной сети представляет собой сложную задачу, так как для принятой схемы трубопровода и заданных узловых расходов Q_A , Q_C неизвестны величины и направления линейных расходов Q_1 , Q_2 , Q_3 . Для определения последних составляется соответствующее число уравнений исходя из следующих условий:

а) для каждого узла (1, 2, 3) сумма приходящих к нему расходов (знак «+») равна сумме уходящих от него расходов (знак «-»), включая узловой, т. е. $\sum Q = 0$;

б) для каждого кольца сумма потерь напора в линиях с движением воды по часовой стрелке (знак «+») равна сумме потерь напора в линиях с движением воды против часовой стрелки (знак «-»), т. е. $\sum h_{\text{тр}} = 0$.

Потери напора на отдельных участках $h_{\text{тр}}$ определяются по формуле

$$h_{\text{тр}} = \ell \frac{Q^2}{K^2}. \quad (16.1)$$

При известных потерях напора на участке величину линейного расхода Q можно определить по формуле

$$Q = K \sqrt{\frac{h_{\text{тр}}}{\ell}}. \quad (16.2)$$

Задачи исследования:

1) определить расходы в узловых точках A и C опытным путем ($Q_{\text{оп}}$);

2) сравнить их величины с вычисленными по формуле ($Q_{\text{т}}$).

Лабораторная установка. Установка (рис. 16.1) состоит из трех замкнутых стальных трубопроводов 1, 2 и 3, напорного резервуара 4 с постоянно поддерживаемым уровнем и задвижек 5 и 6. В узловых точках A , B , C установлены пьезометры 7, 8 и 9.

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой узловыми расходами Q_A и Q_C , которые определяются весовым способом. Величина расходов регулируется задвижками 5 и 6. После стабилизации уровней в пьезометрах 7, 8 и 9 снимаются их показания H_A , H_B , H_C .

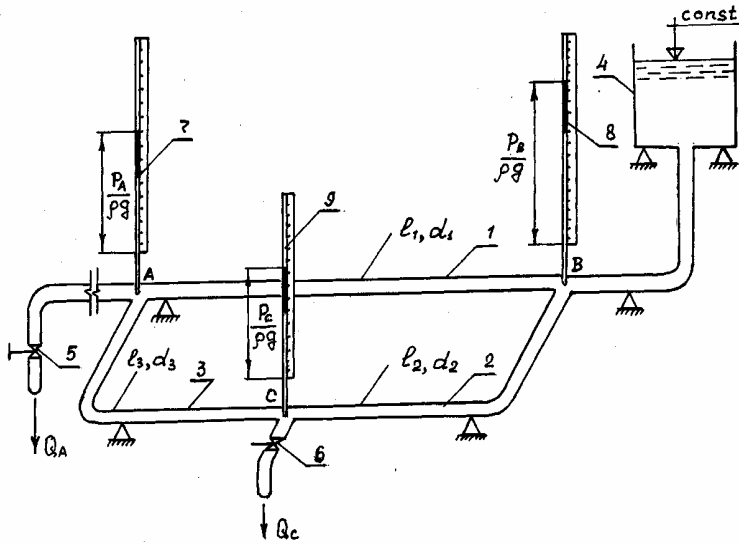


Рис. 16.1. Схема кольцевой водопроводной сети

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 16.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 16.1. Результаты измерений, вычислений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1. Диаметр трубы на участках: AB d_1 BC d_2 AC d_3	см см см			
2. Длина трубы на участках: AB l_1 BC l_2 AC l_3	см см см			
3. Пьезометрический напор в узловых точках: A H_a B H_b C H_c	см см см			

1	2	3	4	5
4. Расходная характеристика трубы на участках: AB K_1 BC K_2 AC K_3	$\text{см}^3/\text{с}$ $\text{см}^3/\text{с}$ $\text{см}^3/\text{с}$			
5. Объем воды в мерном баке в узловых точках: A W_a C W_c	см^3 см^3			
6. Время наполнения мерного бака в узловых точках: A t_a C t_c	с с			
7. Потери напора на участках: AB $h_{\text{тр}1}$ BC $h_{\text{тр}2}$ AC $h_{\text{тр}3}$	см см см			
8. Величина линейного расхода на участках: AB Q_1 BC Q_2 AC Q_3	$\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$			
9. Величина сосредоточенного расхода в узловой точке A : опытная $\sum Q_{\text{оп}}$ вычисленная $\sum Q_i$	$\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$			
10. То же в узловой точке C : опытная $\sum Q_{\text{оп}}$ вычисленная $\sum Q_i$	$\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$			
11. Относительная разность расходов в узловых точках: A $\sum Q_A$ C $\sum Q_C$	$\%$ $\%$			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площади сечений $\omega_1, \omega_2, \omega_3$; гидравлические радиусы R_1, R_2 и R_3 ; коэффициенты Шези C_1, C_2, C_3 ; расходные характеристики K_1, K_2 и K_3 труб соответственно на участках AB, BC и AC .

2. Устанавливается опытная величина расходов в узловых точках A и C ($Q_{\text{оп}}$).

3. Вычисляются потери напора $h_{\text{тр}}$ на участках AB, BC и AC по следующим формулам:

$$H_{AB} = h_{\text{тр}1} = H_A - H_B; \quad H_{BC} = h_{\text{тр}2} = H_B - H_C;$$

$$H_{AC} = h_{\text{тр}3} = H_A - H_C. \quad (16.3)$$

4. Определяется величина и направление линейных расходов на участках AB , BC и AC с использованием формулы (16.2).

5. С использованием величин и направлений линейных расходов устанавливаются узловые расходы в точках A и C (Q_T).

6. Сопоставляются опытные $Q_{оп}$ и вычисленные Q_T значения расходов в узловых точках A и C (определяется величина ΔQ).

Контрольные вопросы

1. Как вычисляются расходы и потери напора на участках кольцевой водопроводной сети?

2. Как изменятся показания пьезометров в точках A , B и C при уменьшении открытия задвижки 5?

17. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ТРУБОПРОВОДЕ

Гидравлический удар – явление, возникающее в движущейся жидкости при быстром изменении скорости в одном из сечений потока. Он характеризуется возникновением волны давления, которая распространяется от места изменения скорости и вызывает в трубопроводе колебания давления и деформации стенок, которые могут быть значительными. Например, если при движении воды в длинном стальном трубопроводе мгновенно закрыть затвор на конце его, то повышение давления приблизительно равно 1,0–1,2 МПа на каждый 1 м/с первоначальной скорости потока. Вследствие этого в нормальной работе трубопровода могут возникать осложнения вплоть до разрыва стенок, возможны повреждения оборудования насосной станции.

При гидравлическом ударе может быть также и резкое понижение давления вплоть до давления насыщенных паров и разрыва сплошности потока жидкости. Основные причины возникновения гидравлического удара:

1) быстрое закрытие или открытие запорных и регулирующих устройств;

2) внезапная остановка насоса;

3) пуск насоса при открытом затворе на нагнетательной линии. После резкого закрытия затвора вдоль трубопровода в потоке распространяется ударная волна с некоторой скоростью C_0 . Время, необходимое для прохождения ударной волной двойной длины трубопровода (к началу и обратно), называется фазой гидравлического удара:

$$t_{\phi} = 2 \cdot \ell / C_0. \quad (17.1)$$

Если время закрытия затвора меньше фазы гидравлического удара, то последний называется прямым. Максимальное повышение давления в этом случае определяется по формуле Н. Е. Жуковского

$$\Delta p = \rho V_0 C_0, \quad (17.2)$$

где V_0 – скорость движения жидкости до закрытия затвора.

Скорость распространения волны гидравлического удара можно определить по формуле Н. Е. Жуковского

$$C_0 = \sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho}} / \sqrt{1 + \frac{E_{\text{ж}} d}{E \delta}}, \quad (17.3)$$

где $E_{\text{ж}}$ – модуль объемной упругости жидкости;

E – модуль упругости материала стенок трубопровода;

d, δ – соответственно диаметр и толщина стенки трубы.

Из формулы (17.3) следует, что в случае абсолютно жесткого трубопровода скорость распространения ударной волны $C_0 = C_{\text{зв}} = \sqrt{E_{\text{ж}} / \rho}$. Она равна скорости звука в жидкости, занимающей неограниченно большой объем. Так, для воды при температуре 10°C $E_{\text{ж}} = 2,03 \cdot 10^9$ Па, поэтому $C_{\text{зв}} = 1430$ м/с.

Если время закрытия затвора больше фазы гидравлического удара, то такой удар называется непрямым. При этом максимальное повышение давления в трубопроводе будет меньше, чем в случае прямого гидравлического удара, и определяется по формуле (при допущении, что оно зависит линейно от скорости V_0)

$$\Delta p = 2\rho V_0 \ell / t_3, \quad (17.4)$$

где t_3 – время закрытия затвора.

Задачи исследования:

1) задавая различные средние скорости движения жидкости в трубопроводе, определить опытным путем величины повышения давления при гидравлическом ударе;

2) вычислить по формулам Н. Е. Жуковского величины повышения давления для условий опытов;

3) сравнить полученные опытные величины Δp с расчетными.

Лабораторная установка. Лабораторная установка (рис. 17.1) состоит из напорного резервуара 1, стального трубопровода 2, затвора 4 и индикатора давления 3.

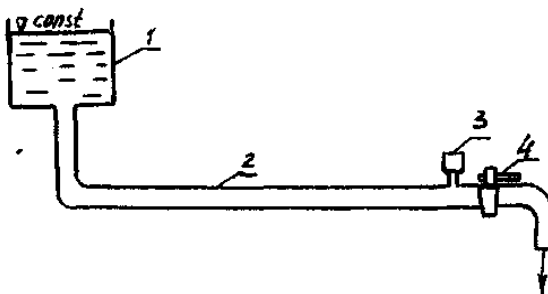


Рис. 17.1. Схема опытной установки

Проведение опытов.

1. Измеряется длина, диаметр опытного трубопровода, толщина его стенки.
2. Затвором 4 устанавливается постоянный небольшой расход, который определяется весовым способом.
3. Мгновенно закрывается затвор 4.
4. По индикаторной диаграмме определяется повышение давления.
5. Повторяется вышеописанный опыт еще при двух больших значениях расхода в трубопроводе.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 17.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 17.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Длина трубы ℓ	см			
2. Диаметр трубы d	см			
3. Толщина стенок трубы δ	см			
4. Материал трубы	—			
5. Площадь сечения трубы ω	см ²			
6. Объем воды в мерном баке W	см ³			
7. Время наполнения мерного бака t	с			
8. Расход Q	см ³ /с			
9. Скорость течения воды в трубе до закрытия крана V_0	см/с			
10. Скорость C_0 по формуле Жуковского	см/с			
11. Длительность фазы $t_{\text{ф}}$	с			
12. Повышение давления: по формуле Жуковского $\Delta p_{\text{т}}$ опытное $\Delta p_{\text{оп}}$	кПа кПа			
13. Относительная разность	%			

Обработка результатов.

1. Определяется площадь сечения трубы, расход и средняя скорость движения жидкости до закрытия затвора.
2. Вычисляются по формулам (17.3) и (17.2) соответственно скорость распространения ударной волны и повышение давления при гидравлическом ударе. Для стальной трубы принимается $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.
3. Полученные опытные значения повышения давления сравниваются с расчетными.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях возникает в трубопроводе гидравлический удар?
2. Как определяется фаза гидравлического удара?
3. От чего зависит повышение давления при гидравлическом ударе и скорость распространения волны?
4. Как защитить трубопровод от опасного повышения давления при гидроударе?

18. ИЗМЕРЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСРЕДНЕННЫХ МЕСТНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ОТКРЫТОГО ПОТОКА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРИОЛИСА И БУССИНЕСКА

Движение воды в открытых каналах, как правило, равномерное, при котором средняя скорость течения и все другие гидравлические характеристики по длине потока остаются постоянными. Средняя скорость V зависит от размеров живого сечения потока, продольного уклона $I = i$ и состояния его поверхности, определяемого величиной коэффициента шероховатости n . Средняя скорость V движения (это условная, одинаковая для всех точек живого сечения скорость) определяется по формуле Шези

$$V = C\sqrt{R \cdot i}, \quad (18.1)$$

где C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус, $R = \omega / \chi$;

χ – смоченный периметр.

При движении в открытых руслах скорость жидкости уменьшается в направлении к берегам и ко дну. Следовательно, чтобы иметь представление о движении жидкости, необходимо знать закон распределения скорости в вертикальной и горизонтальной плоскостях поперечно-

го сечения. Закон распределения местных скоростей u по вертикали (рис. 18.1) в широких руслах выражен формулой Базена

$$u = u_{\text{пов}} - 24 \frac{V}{C} \left(\frac{H - z}{H} \right)^2, \quad (18.2)$$

где $u_{\text{пов}}$ – скорость движения воды у поверхностей;

V – средняя скорость по вертикали;

H – глубина потока;

z – текущая координата;

C – коэффициент Шези.

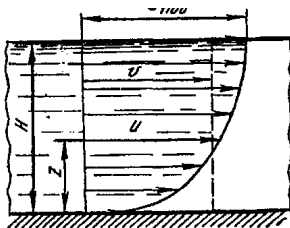


Рис. 24. График распределения скоростей по высоте потока в открытом русле

При проектировании каналов одной из расчетов является предельная неразмывающая скорость V_{max} , т. е. скорость, при которой не разрушаются дно и откосы. Она зависит от характера грунтов (связные, несвязные, скальные), крупности частиц и глубины потока. В гидравлических расчетах можно пользоваться справочными данными.

Измерение скоростей чаще всего необходимо при определении расходов воды. Кроме этого, сведения о скоростях нужны при строительстве гидротехнических сооружений на реках, при перекрытии русел рек, при обеспечении безопасности плавания судов и пр. Движение воды обычно турбулентное, существует пульсация скоростей в точках измерения. Приборы позволяют получать осредненные местные скорости, по которым можно строить эпюры на глубинных вертикалях и по ширине водотока (рис. 18.1).

Закон распределения скоростей – логарифмический или степенной, т. е. аналогичен распределению местных скоростей в канале или трубе

при квадратичной зоне сопротивления. Наиболее простой и удобной является формула

$$u / u_{\max} = (y / h)^{1/m}, \quad (18.3)$$

где u – местная (точечная) скорость на вертикали;

u_{\max} – максимальная или скорость движения воды у поверхностей;

y – текущая координата эпюры скоростей (рис. 18.1), $y = z$;

h – глубина воды в канале (реке);

m – переменный параметр, зависящий от скоростного коэффициента Шези C_B на рассматриваемой вертикали. Его можно вычислить по приближенной зависимости

$$m = \frac{2,3 + 0,1C_B}{3,13 + C_B} C_B. \quad (18.4)$$

Коэффициент Шези зависит от гидравлического радиуса R и коэффициента шероховатости русла n и рекомендуется определять по формуле Н. Н. Павловского (19.4) или И. И. Агроскина (19.6).

Так, например, расчеты показали, что при $R = 1,0\text{--}10$ м и $n = 0,02$ (канализованные реки в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений) параметр $m \approx 7,0$ и, следовательно, формула (18.3) аналогична закону одной седьмой Т. Кармана распределения скоростей в трубе.

Имеется много приборов для измерения местных (точечных) и средних скоростей в сечении потока. Рассмотрим измерение местных скоростей с помощью гидрометрической трубки (трубки Пито), которая устанавливается в лотке и погружается на определенную глубину.

Для удобства расчетов применяют трубку Пито и пьезометр одновременно (рис. 18.2). Скоростной напор снимается по показаниям трубки Пито $u^2 / 2g$. Следовательно, местная скорость $u = \sqrt{2g h}$. Из равенства скоростных напоров $u^2 / 2g = \alpha V^2 / 2g$ определяется коэффициент Кориолиса $\alpha_{\text{оп}} = u^2 / V^2$.

Коэффициент количества движения (коэффициент Буссинеска) можно определить из уравнения совершенного гидравлического прыжка (21.1)

$$\frac{\alpha' Q^2}{g\omega_1} + h'_{\text{тр}} \omega_1 = \frac{\alpha' Q^2}{g\omega_2} + h''_{\text{тр}} \omega_2.$$

Для русла прямоугольного сечения $\omega_1 = b h'$, $\omega_2 = b h''$, $h'_{\text{ит1}} = h' / 2$, $h'_{\text{ит1}} = h'' / 2$ и уравнение (21.1) переписывается так

$$\frac{\alpha' Q^2}{g b h'} + \frac{h'}{2} b h' = \frac{\alpha' Q^2}{g b h''} + \frac{h''}{2} b h'' / b. \quad (18.5)$$

Обе части уравнения разделим на b

$$\frac{\alpha' Q^2}{g b^2 h'} + \frac{(h')^2}{2} = \frac{\alpha' Q^2}{g b^2 h''} + \frac{(h'')^2}{2}.$$

Введем обозначение $q = Q / b$. После простых преобразований уравнение (21.1) получает вид:

$$\frac{\alpha' q^2}{g h'} + \frac{(h')^2}{2} = \frac{\alpha' q^2}{g h''} + \frac{(h'')^2}{2}.$$

Окончательно получим

$$\frac{2\alpha' g^2}{g} = h'' h' (h'' + h'). \quad (18.6)$$

Из этой формулы можно определить удельный расход и коэффициент количества движения (Буссинеска)

$$g = \sqrt{\frac{g}{2\alpha'} h' h'' (h'' + h')}; \quad (18.7)$$

$$\alpha' = \frac{g (h' h'' (h' + h''))}{2g^2}. \quad (18.8)$$

Задачи исследования:

1) определить величины скоростных напоров $u^2 / 2g$ опытным путем при трех различных расходах потока;

2) вычислить осредненные местные скорости потока $u = \sqrt{2gh}$ и коэффициенты Кориолиса и Буссинеска для условий опытов по рекомендуемым выше формулам;

3) сопоставить полученные результаты коэффициентов с теоретическими.

Лабораторная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (рис. 18.2), который является составной частью стенда (рис. 18.3).

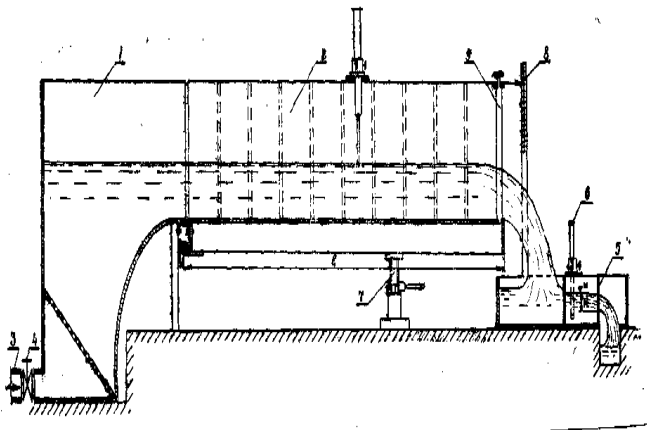


Рис. 18.2. Схема гидравлического лотка с переменным уклоном

Стенд имеет замкнутую систему циркуляции жидкости. На раме установлен гидробак и насосный (моноблочный) агрегат, в состав которого входят центробежный насос и трехфазный электродвигатель. Передней частью лоток шарнирно установлен на гидробаке. С противоположной стороны лоток опирается на вторую рамную конструкцию, на которой установлен специальный гидропривод с гидроцилиндром и ручным насосом, обеспечивающий поворот лотка относительно шарниров, закрепленных на гидробаке. Это позволяет бесступенчато изменять в широких пределах уклон дна лотка. Выход центробежного насоса с лотком соединен с помощью эластичного трубопровода. На одной из стенок лотка на осях X и Y нанесена координатная сетка. Информационно-измерительная система стенда позволяет измерять местные продольные скорости и расход воды, поступающей в лоток, координаты свободной поверхности потока. Расходомер-счетчик измеряет расход воды в $\text{м}^3/\text{час}$. Уклон дна лотка изменяется с помощью подъемного устройства и определяется по мерной шкале. Глубина потока в лотке регулируется концевым затвором.



Рис. 18.3. Стенд «Открытые потоки»

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 18.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 18.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1. Ширина канала b	см			
2. Глубина потока в канале h	см			
3. Уклон дна канала i	–			
4. Площадь сечения потока ω	см ²			
5. Смоченный периметр χ	см			
6. Гидравлический радиус R	см			

1	2	3	4	5
7. Расход Q	см ³ /с			
8. Средняя скорость V	см/с			
9. Скоростной напор $u^2/2g$	см			
10. Местная, точечная скорость u	см/с			
11. Коэффициент Буссинеска: опытный $\alpha_{оп}$ вычисленный α_r	–			
12. Коэффициент Кориолиса: опытный $\alpha_{оп}$ вычисленный α_r	–			
13. Относительная разность: $\Delta\alpha'$ $\Delta\alpha$	% %			

Обработка результатов.

1. Определяется величина расхода Q в канале.
2. Вычисляются площадь ω , смоченный периметр χ и гидравлический радиус R сечения потока, а затем средняя скорость потока V (18.1) и местная точечная скорость $u = \sqrt{2gh}$.
3. Вычисляется опытное значение коэффициента Кориолиса $\alpha_{оп} = u^2 / V^2$, сравнивается с расчетным $\alpha_r = 1,1$ и сопоставляются полученные результаты (вычисляется $\Delta\alpha$).

Контрольные вопросы

1. Чем отличается равномерное движение в канале от неравномерного?
2. Как определить коэффициент Кориолиса при равномерном движении потока опытным путем?
3. Как влияет на величину средней скорости коэффициент Кориолиса α ?

19. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ В КАНАЛЕ

Равномерное движение жидкости в открытом русле имеет место при соблюдении следующего условия:

$$i = i_n = I, \quad (19.1)$$

где i – уклон дна канала;

i_n – уклон свободной поверхности потока;
 I – гидравлический уклон.

Это условие выполняется при постоянных: расходе Q , площади живого сечения ω , шероховатости n смоченной поверхности русла по длине, а также при отсутствии местных сопротивлений.

Средняя скорость V в сечении ω при равномерном движении жидкости в открытом русле определяется по формуле Шези

$$V = C\sqrt{R \cdot i}, \quad (19.2)$$

а расход – по формуле

$$Q = C\omega\sqrt{Ri}, \quad (19.3)$$

где C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус $R = \omega / \chi$;

χ – смоченный периметр.

Коэффициент Шези может определяться по формулам:

Н. Н. Павловского

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (19.4)$$

где n – коэффициент шероховатости;

y – показатель степени, определяемый по зависимости

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10); \quad (19.5)$$

И. И. Агроскина

$$C = \frac{1}{n} + 17,72\ell g R. \quad (19.6)$$

Область сопротивления выясняется сравнением числа Рейнольдса в потоке с $Re_{кв}$, определяемым по формулам:

$$Re_R = \frac{vR}{\nu}; \quad (19.7)$$

$$Re_{кв} = 21,6C \frac{R}{\Delta}, \quad (19.8)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости воды (табл. 1 приложения);

Δ – высота выступов шероховатости, принимаемая по справочной литературе в зависимости от материала русла.

При $Re_R \geq Re_{KB}$ область сопротивления в потоке будет квадратичная. Если шероховатость смоченного периметра русла неоднородна, то Н. Н. Павловский рекомендует определять эквивалентный коэффициент шероховатости по формуле

$$n_s = \sqrt{\frac{\sum \chi_i n_i}{\chi}}, \quad (19.9)$$

где χ_i – часть смоченного периметра с постоянной шероховатостью n_i ;

χ – полный смоченный периметр.

Задачи исследования:

1) освоить методику опытного определения эквивалентного коэффициента шероховатости;

2) построить графики связи $n_s = f(h_0)$ по опытными и справочным данным;

3) сопоставить величины эквивалентного коэффициента шероховатости по опытными и справочным данным в зависимости от глубины потока и дать заключение о практическом применении справочных данных.

Лабораторная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (рис. 18.2), который является составной частью стенда (см. рис. 18.3).

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой расходами потока.

Порядок проведения опытов приведен ниже.

1. При уклоне дна лотка в пределах $i = 0,0003$ – $0,0009$ определяется высота

$$h_i = il,$$

где h_i – высота поднятия лотка относительно горизонтальной плоскости;

l – расстояние от оси поворота лотка до выходного сечения (см. рис. 18.2).

2. Подъемным устройством поднимается лоток на высоту h_i .

3. Устанавливается и по расходомеру определяется постоянный расход воды в лотке. Расход Q из $\text{м}^3/\text{ч}$ переводим в $\text{л}/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{с}$.

4. Замеряется глубина в начале лотка. Маневрируя концевым затвором, добиваются такой же глубины в конце лотка, а когда глубина h_0 в лотке стабилизируется, замеряется ее значение.

5. При постепенном увеличении расхода потока опыты повторяют. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 19.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 19.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Расход потока Q	л/с			
2. Глубина воды в лотке h_0	см			
3. Площадь живого сечения ω	см ²			
4. Смоченный периметр χ	см			
5. Гидравлический радиус R	м			
6. Эквивалентный коэффициент Шези C_s	м ^{0,5} /с			
7. Кинематический коэффициент вязкости ν	см ² /с			
8. Число Рейнольдса Re_R	–			
9. Число Рейнольдса $Re_{кн}$ (по формуле)	–			
10. Область сопротивления				
11. Опытный коэффициент шероховатости $n_3^{оп}$	–			
12. Справочный коэффициент шероховатости $n_3^т$	–			
13. Относительная разность Δn_3	%			

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; уклон дна лотка $i = h / \ell = \dots$; коэффициенты шероховатости: стекла $n_c = \dots$ и окрашенного металла $n_m = \dots$; температура воды $t = \dots$ °С; кинематическая вязкость воды $\nu = \dots$ см²/с.

Обработка результатов.

1. Определяется площадь живого сечения потока $\omega = bh_0$, смоченный периметр $\chi = b + 2h_0$ и гидравлический радиус $R = \omega / \chi$.

2. Так как шероховатость по периметру лотка неоднородна, то из формулы (19.3) вычисляется значение эквивалентного коэффициента Шези:

$$C_s = \frac{Q}{\omega \sqrt{Ri}}.$$

3. Из формулы (19.6) определяется значение эквивалентного коэффициента шероховатости:

$$n_3^{\text{оп}} = (C_3 - 17,72 \lg R)^{-1}.$$

4. Аналогичные вычисления проводятся для всех остальных опытов, по которым строится график связи $n_3^{\text{оп}} = f(h_0)$.

5. По справочной литературе принимаются коэффициенты шероховатости для материала лотка (стекло, окрашенная металлическая поверхность) и по формуле (19.9) рассчитывается теоретическое значение эквивалентного коэффициента шероховатости $n_3^{\text{т}}$ для разных глубин наполнения потока.

6. По данным расчета строится теоретический график связи $n_3^{\text{т}} = f(h_0)$ и сопоставляется с опытным, на основании чего делается вывод о применимости расчетной зависимости (19.9).

Контрольные вопросы

1. Объяснить условия равномерного движения жидкости в открытом русле.

2. Написать и объяснить основные параметры зависимости для равномерного движения жидкости.

3. Как определить коэффициент шероховатости при неоднородной шероховатости русла?

4. Почему изменяется эквивалентный коэффициент шероховатости в зависимости от глубины потока?

20. ФОРМИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ НЕРАВНОМЕРНОМ, ПЛАВНО ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

При установившемся неравномерном, плавно изменяющемся движении жидкости в открытом призматическом русле глубины вдоль потока изменяются. При этом в зависимости от причины нарушения равномерности движения скорости течения в потоке будут или уменьшаться, а глубина потока увеличиваться вдоль по течению – в русле формируется кривая подпора, – или же, наоборот, скорости будут увеличиваться, а глубина уменьшаться – формируется кривая спада.

Расчетные уравнения

$\Phi(z) = \int \frac{dz}{1-z^x} + c$ и $f(z) = \int z^x dz + c$ – переменные функции, зависящие от глубины потока h .

При показателе степени $x = 2,0$ и $c = 0$ вышеприведенные интегралы являются стандартными и имеют простые конечные решения следующего вида:

$$\Phi(z) = \int \frac{dz}{1-z^2} = 0,5 \ln \left| \frac{1+z}{1-z} \right| = 1,15 \lg \left| \frac{1+z}{1-z} \right|; \quad (20.3)$$

$$f(z) = \int z^2 dz = 1/3 z^3 = 1/3 \left(\frac{Q'}{Q} \right)^3. \quad (20.4)$$

Приведенные зависимости (20.1) и (20.2) справедливы как для спокойного, так и для бурного состояния потоков, которое можно определить с помощью критической глубины. Она для русла прямоугольного сечения определяется по формуле

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g}, \quad (20.5)$$

где α – коэффициент Кориолиса. При прямолинейном турбулентном движении в земляных каналах $\alpha = 1,10-1,25$;

$q = Q/b$ – удельный расход, т. е. расход потока на единицу его ширины.

Пользуясь понятием критической глубины, устанавливают состояние потока: при $h > h_{кр}$ – спокойное; $h < h_{кр}$ – бурное; $h = h_{кр}$ – критическое.

Анализ кривой свободной поверхности потока (СПП) и ее тип устанавливаются на основании общего дифференциального уравнения установившегося неравномерного движения:

$$\frac{dh}{d\ell} = i \frac{1 - (\kappa_0 / \kappa)^2}{1 - \Pi_{\kappa}}, \quad (20.6)$$

где κ_0, κ – соответственно расходные характеристики потока при равномерном движении с глубиной h_0 и установившегося неравномерного движения с глубиной h , которые рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \kappa_0 &= c_0 \omega_0 \sqrt{R_0}, \\ \kappa &= c \omega \sqrt{R}. \end{aligned} \right\} \quad (20.7)$$

Здесь Π_k – параметр кинетичности потока, который равен: при спокойном состоянии потока $\Pi_k < 1,0$; бурном состоянии $\Pi_k > 1,0$; критическом состоянии $\Pi_k = 1,0$.

Анализ кривой СПП покажем на примере. Пусть равномерное движение потока нарушено образованием перепада в конце потока. При этом $0 < i < i_{кр}$, а глубина потока $h_{кр} < h < h_0$. Так как $h < h_0$, то соотношение расходных характеристик будет: $\kappa_0 > \kappa$ и $\kappa_0 / \kappa > 1,0$. При $i < i_{кр}$ и $h > h_{кр}$ состояние потока будет спокойное и $\Pi_k < 1,0$. Теперь устанавливаются знаки в числителе и знаменателе уравнения (20.6) и общий знак, т. е.

$$\frac{dh}{d\ell} = i \frac{l - (\kappa_0 / \kappa)^2}{1 - \Pi_k} = + \frac{-}{+} < 0,$$

что показывает на уменьшение глубин потока в направлении его движения. В данном случае кривая спада будет в зоне *Ib*.

Задачи исследования:

- 1) построить по опытным данным кривую свободной поверхности потока (кривую подпора);
- 2) освоить методику расчета установившегося неравномерного движения жидкости в призматических руслах;
- 3) по глубинам, замеренным для изучаемого потока в лаборатории, рассчитать по зависимостям (20.1) или (20.2) кривую свободной поверхности потока и сопоставить с опытной.

Опытная установка. Гидравлический лоток с переменным уклоном (рис. 18.2), который является составной частью стенда (см. рис. 18.3). Вода в лоток подается по водопроводу, а расход ее определяется расходомером-счетчиком, который имеет размерность Q , м³/час. Глубины уровня воды в лотке измеряются по координатной сетке, имеющей определенный масштаб.

Проведение опытов. В работе исследуется кривая сводной поверхности потока, полученная за счет образования перепада в конце лотка с переменным уклоном дна или при отгоне гидравлического прыжка за сооружением (водослив, затвор) в гидравлическом лотке с нулевым уклоном.

Порядок проведения исследования приведен ниже.

1. В гидравлическом лотке с переменным уклоном устанавливается уклон дна лотка в пределах $I = i = 0,0003-0,0009$ (см. работу 19). На фиксированных расстояниях от входного сечения лотка по координатной сетке намечаются по длине потока 5–6 створов.

Измерение расстояний и глубин потока в исследуемом створе производится с помощью координатной сетки. Результаты измерений заносятся в табл. 20.1 журнала лабораторных работ.

2. В гидравлическом лотке с переменным уклоном (рис. 20.1) устанавливается постоянный расход в лотке. По расходомеру определяется расход Q , м³/ч, л/с.

Концевым затвором лотка устанавливается такая глубина воды в нижнем бьефе (НБ) сооружения, чтобы гидравлический прыжок был отогнанным.

В лотке с нулевым уклоном отметка дна лотка будет постоянной для всех створов, а отметки свободной поверхности воды в 5–6 створах разными. Разность отметок дает измеряемую глубину $h = \nabla_n - \nabla_d$ (по масштабу координатной сетки). Расстояние между створами измеряется также по координатной сетке. Результаты измерений заносятся в табл. 20.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 20.1. Результаты опытных измерений кривой СПП

Наименование	Единица измерения	Номера опытов			
Расход потока Q	л/с				
Измерение глубин: глубина потока в створе h	см				
расстояние ℓ от i -го створа	см				

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; уклон дна лотка $i = h_i / \ell = \dots$.

Обработка результатов.

1. Из формулы (19.3) рассчитывается нормальная глубина h_0 потока. Эквивалентный коэффициент шероховатости принимается из работы 19.

2. По формуле (20.5) определяется критическая глубина потока.

3. По общему дифференциальному уравнению (20.6) установившегося неравномерного движения дается анализ и устанавливается тип кривой свободной поверхности потока.

4. Для каждой глубины створа вычисляются гидравлические характеристики потока: площадь живого сечения $\omega = bh$; смоченный периметр $\chi = b + 2h$; гидравлический радиус $R = \omega / \chi$; коэффициент Шези C по формуле (19.3). Результаты вычислений выполняются в табличной форме (табл. 20.2).

5. Вычисляются следующие показатели: величина фиктивного расхода Q' по формуле (19.3); средняя скорость потока $V' = Q' / \omega$; параметр кинетичности $\Pi'_k = (V')^2 / (gh)$; величина $z = Q'/Q$; функции $\Phi(z)$ или $f(z)$ по формуле (20.3) или (20.4) в зависимости от уклона дна лотка; величина $a = (h_2 - h_1) / (z_2 - z_1)$.

6. Дальнейшие вычисления сводятся к простому арифметическому решению уравнений (20.1) или (20.2) в зависимости от уклона дна лотка. Затем суммируются расстояния между створами, чем и определяется теоретическая длина кривой СПП.

7. По результатам измерений в лаборатории определяется опытная длина кривой СПП и сопоставляется с теоретической, на основании чего делаются выводы о применимости зависимостей (20.1) и (20.2).

Таблица 20.2. Расчет теоретической кривой СПП

Створ	$h, \text{ м}$	$\Delta h, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$C, \text{ м}^{0.5}/\text{с}$	$Q', \text{ м}^3/\text{с}$	$V', \text{ м}/\text{с}$	Π'_k
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Створ	$1 - \Pi'_{к,ср}$	$z = \frac{Q'}{Q}$	Δz	$\Phi(z)$	$\frac{\Delta}{\Phi(z)}$	[11]×[15]	[13]–[16]	$a = \frac{\Delta h}{\Delta z}$	$\frac{a}{i}$	$l_{1-2},$ М
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Примечание. Таблица приведена для решения уравнения (20.1).

Контрольные вопросы

1. По каким критериям устанавливается состояние потока?
2. Как производится анализ кривой СПП и устанавливается ее тип?
3. Как вычисляется фиктивный расход Q' и какой его физический смысл?
4. Как вычисляется фиктивный параметр кинетичности?
5. Для каких целей производится расчет кривых СПП?

21. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЛОТКЕ

Анализ дифференциального уравнения установившегося неравномерного движения жидкости (20.6) показывает, что при $\Pi_k = 1,0$ или $h = h_k$ функция $h = f(\ell)$ претерпевает разрыв непрерывности $\frac{dh}{d\ell} = \infty$, т. е. касательная к кривой СПП перпендикулярна к оси потока. Такое

резкое изменение формы СПП наблюдается, когда бурный поток в силу тех или иных причин переходит в спокойное состояние.

Явление, характеризующее скачкообразным изменением формы свободной поверхности потока на относительно небольшом участке при его переходе из бурного состояния в спокойное, называют гидравлическим прыжком.

Гидравлический прыжок характеризуется сопряженными или взаимными глубинами: h' перед прыжком и h'' за прыжком (рис. 21.1). Расстояние между сечениями с сопряженными глубинами называется длиной прыжка $\ell_{пр}$, а разность $h'' - h' = a$ называется высотой прыжка (рис. 21.1).

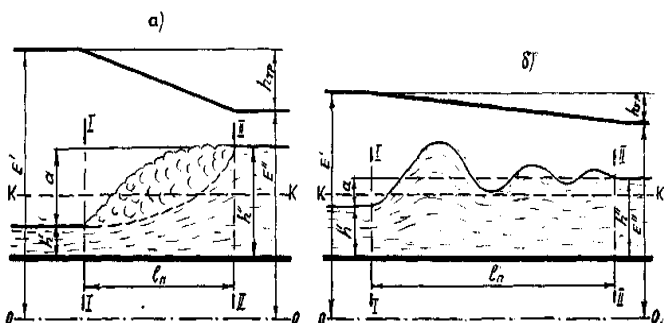


Рис. 21.1. Схема гидравлического прыжка:
а – совершенного; б – волнистого

В работе предусмотрено исследование двух видов прыжка: совершенного и волнистого (прыжка-волны).

Совершенный прыжок представляет зону поступательного потока в форме расширяющейся в вертикальной плоскости струи и поверхностную зону, поддерживаемую этой струей, внешне похожей на водяной валец, насыщенный воздухом (рис. 21, а). Для совершенного прыжка $a > h'$, $h'' / h' > 2$; $П_{К1} \geq 3$ и $П_{К2} \leq 0,375$. Связь между сопряженными глубинами совершенного гидравлического прыжка устанавливается по уравнению

$$\frac{\alpha' Q^2}{g \omega_1} + h'_{ит} \omega_1 = \frac{\alpha' Q^2}{g \omega_2} + h''_{ит} \omega_2, \quad (21.1)$$

где α' – коэффициент количества движения (коэффициент Буссинеска). При прямолинейном движении в земляном канале $\alpha' \approx 1,0-1,10$.

ω_1, ω_2 – площади живых сечений потока в сечениях перед и за прыжком;

$h'_{\text{ит}}, h''_{\text{ит}}$ – глубины погружения центров тяжести сечений соответственно перед и за прыжком.

Обе части уравнения совершенного гидравлического прыжка (21.1) при данном расходе являются функцией глубины. Двучлен вида

$$\Pi(h) = \frac{\alpha' Q^2}{g\omega} + h_{\text{ит}}\omega \quad (21.2)$$

называется *прыжковой* функцией.

При одной известной сопряженной глубине вторая сопряженная глубина в общем случае определяется или подбором из уравнения (21.1), или по графику прыжковой функции (21.2), построенному для данного русла при заданном расходе.

Для русла прямоугольного сечения при заданном расходе уравнение (21.1) имеет решение для одной сопряженной глубины при известной другой, которое выражается следующими зависимостями:

$$h' = 0,5h''(\sqrt{1+8\Pi_{\text{к2}}} - 1); \quad (21.3)$$

$$h'' = 0,5h'(\sqrt{1+8\Pi_{\text{к1}}} - 1),$$

где $\Pi_{\text{к1}} = \alpha q^2 / [g(h')^3]$ – параметр кинетичности потока по глубине перед прыжком;

$\Pi_{\text{к2}} = \alpha q^2 / [g(h'')^3]$ – то же за прыжком.

Длина совершенного гидравлического прыжка – расстояние между сечениями с глубиной h' и глубиной h'' . Как видно из рис. 21.1, a , в сечении, ограничивающем длину совершенного гидравлического прыжка, поверхностная скорость равна нулю.

Длина совершенного гидравлического прыжка в русле прямоугольного сечения определяется по формулам, которые получены на основании экспериментальных исследований. Разными авторами ее предложено определять в зависимости от различных факторов. Так, длина прыжка в зависимости от h' и h'' определяется по формуле Н. Н. Павловского

$$\ell_{\text{пр}} = 2,5(1,9h'' - h'); \quad (21.4)$$

в зависимости от h' и $\Pi_{\text{к1}}$ – по формуле М. Д. Чертоусова

$$\ell_{\text{пр}} = 10,3h'(\sqrt{\Pi_{\text{к1}}} - 1)^{0,81}; \quad (21.5)$$

по формуле Ф. И. Пикалова

$$\ell_{\text{пр}} = 4h'(\sqrt{1 + 2\Pi_{\text{К1}}}). \quad (21.6)$$

В русле трапецеидального сечения длина совершенного гидравлического прыжка может быть определена по приближенной формуле

$$\ell_{\text{пр.т}} = \ell_{\text{пр}}(1 + 4\sqrt{(B_2 - B_1)/B_1}), \quad (21.7)$$

где $\ell_{\text{пр}}$ – длина прыжка в русле прямоугольного сечения;

B_1, B_2 – ширина по урезу воды в сечениях с глубиной h' и h'' соответственно.

Потеря удельной энергии в прыжке, затрачиваемая на переход из бурного в спокойное состояние потока, может быть определена из уравнения Бернулли, составленного для сечений I–I и II–II относительно плоскости 0–0 (рис. 21.1, а), полагая дно лотка горизонтальным на участке прыжка

$$h_{\text{пр}} = \left(h' + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(h'' + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right), \quad (21.8)$$

где V_1 и V_2 – соответственно скорости в сечениях I–I и II–II.

Для русла прямоугольного сечения из этого уравнения и уравнения прыжка получена упрощенная зависимость для определения потерь удельной энергии в совершенном прыжке:

$$h_{\text{пр}} = (h'' - h')^3 / (4h'h''). \quad (21.9)$$

Волнистым прыжком называется гидравлический прыжок, который принимает форму ряда постепенно затухающих волн (рис. 21.1, б). Для волнистого прыжка $a < h'$ или $h'' / h' < 2$, $\Pi_{\text{К1}} < 3$ и $\Pi_{\text{К2}} > 0,375$. Этот вид прыжка изучен сравнительно мало и связь между сопряженными глубинами в русле прямоугольного сечения можно считать приближенно по следующим формулам:

$$h_{\text{пр}} = 0,59h'(\sqrt{1 + 8\Pi_{\text{К1}}} - 1) \text{ при } 1,5 < \Pi_{\text{К1}} < 3; \quad (21.10)$$

$$h'' = \Pi_{\text{К1}}h' \text{ при } 1,0 < \Pi_{\text{К1}} \leq 1,5, \quad (21.11)$$

где $h_{\text{пр}}$ – высота первого гребня волнистого гидравлического прыжка.

Длина волнистого прыжка определяется по формуле

$$\ell_{\text{пр}} = 10,6h'(\Pi_{\text{К1}} - 1). \quad (21.12)$$

Задачи исследования:

1) провести наблюдение за структурой совершенного гидравлического прыжка, прыжка-волны;

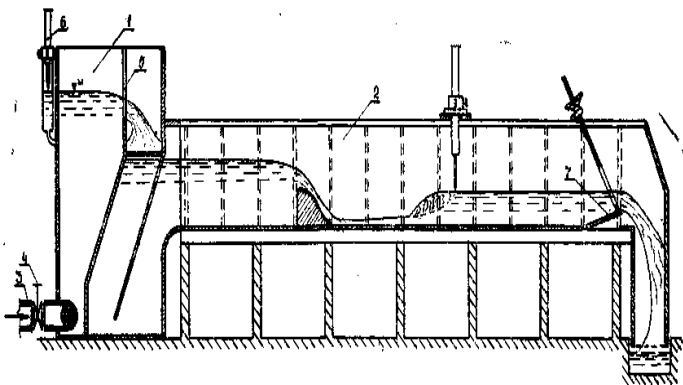
- 2) определить гидравлические характеристики прыжка;
- 3) сравнить опытные h'' и $l_{пр}$ с соответствующими величинами, вычисленными по вышеприведенным формулам.

Опытная установка. Работа проводится в гидравлическом лотке с переменным уклоном (см. рис. 18.2, рис. 21.2), в котором установлена модель гидротехнического сооружения (водослив практического профиля или с широким порогом, вертикальный плоский затвор). Гидравлический прыжок достигается при сопряжении бурного потока, возникающего при истечении через сооружение, и спокойного.

Проведение опытов. В лабораторной работе проводится по два опыта для различных видов гидравлического прыжка (совершенного и волнистого).

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) устанавливается постоянный расход воды в лотке;
- 2) по расходомеру определяется расход;
- 3) гидравлический прыжок достигается при сопряжении бурного и спокойного потоков за сооружением. Концевым затвором изменяется бытовая глубина и формируется устойчивое местоположение прыжка на участке, удобном для измерений и наблюдений;
- 4) с помощью координатной сетки, выполненной на передней стенке лотка, замеряются в сечениях первая и вторая сопряженные глубины. Длина прыжка замеряется мерной линейкой (либо по координатной сетке), и визуальнo устанавливается его вид:



21.2. Схема гидравлического лотка с водосливом практического профиля

- 5) изменяется величина расхода, и опыт повторяется. Концевым затвором изменяется бытовая глубина, чем достигается второй вид прыжка. Опыты повторяются в аналогичной последовательности.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 21.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 21.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Расход потока Q	л/с			
2. Глубина потока: перед прыжком $h'_{оп}$ за прыжком $h''_{оп}$, $h''_т$	см см			
3. Длина прыжка: опытная $\ell_{пр}^{оп}$ вычисленная $\ell_{пр}^T$	см см			
4. Площадь сечения потока: перед прыжком ω_1 за прыжком ω_2	см ² см ²			
5. Средняя скорость потока: перед прыжком V_1 за прыжком V_2	см/с см/с			
6. Потери энергии в прыжке: по формуле Бернулли по формуле (21.9)	см см			
7. Вид гидравлического прыжка: наблюдаемый вычисленный	—			

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; высота лотка $h_{л} = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Определяется высота прыжка $a = h'' - h'$, устанавливается его вид и сравнивается с наблюдаемым в лаборатории.

2. Вычисляются площади живого сечения потока ω_1 и ω_2 и скорости V_1 и V_2 в сечениях, соответствующих первой и второй сопряженной глубине.

3. Определяются потери удельной энергии в прыжке по уравнению Бернулли и по формуле (21.9). Сравниваются результаты вычислений.

4. Вычисляется параметр кинетичности $\Pi_{к1}$ для сечения перед прыжком, по формуле (21.3) определяется вторая сопряженная глубина $h''_т$ и сравнивается с замеренной $h''_{оп}$ в лаборатории.

5. По формулам (21.4) или (21.5) вычисляется длина прыжка $\ell_{\text{пр}}^{\text{T}}$ и сравнивается с замеренной $\ell_{\text{пр}}^{\text{оп}}$ в лаборатории.

Контрольные вопросы

1. Что называется гидравлическим прыжком?
2. Как определить вид гидравлического прыжка?
3. Чем характеризуется и какова структура совершенного и волнистого гидравлического прыжка?
4. На примере опытов показать, как изменяются сопряженные глубины h' и h'' , а также длина гидравлического прыжка $\ell_{\text{пр}}$ с изменением расхода.

22. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА С ОСТРЫМ РЕБРОМ

Сооружение в преграде, через которое происходит перелив воды, называется водосливом, а движение – истечением через водослив. К водосливам с тонкой стенкой (или острым ребром) относятся такие водосливы, в которых толщина стенки S (рис. 22.1, a , разрез I–I) не влияет на форму переливающейся струи и должна быть $S < 0,67H$, где H – величина напора. Геометрический напор H над гребнем водослива представляет собой разность отметок уровня воды в верхнем бьефе (ВБ) и верхней точки гребня водослива. На практике применяются прямоугольные, треугольные, трапецеидальные и параболические водосливы, которые чаще всего используются для измерения расходов. Выбор их зависит от величины пропускаемых расходов и условий применения.

Наиболее полно изучено истечение через водослив со свободным доступом воздуха под струю без бокового сжатия при вертикальной стенке с острым ребром. Такие водосливы называют совершенными, и для них уравнение расхода имеет вид

$$Q = mb \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (22.1)$$

или

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (22.2)$$

где m – коэффициент расхода водослива;

b – ширина отверстия водослива или длина водосливногo фронта (в направлении, перпендикулярном направлению движения переливающейся через водослив жидкости);

H_0 – полный напор перед водосливом $H_0 = H + \alpha V_0^2 / (2g)$;

V_0 – средняя скорость движения потока перед водосливом;

m_0 – приведенный коэффициент расхода водослива, который определяется по формуле

$$m_0 = m[l + \alpha V_0^2 / (2gH)]. \quad (22.3)$$

Приведенный коэффициент расхода m_0 определяется по эмпирической формуле Базена

$$m_0 = (0,405 + 0,0027 / H) \cdot [1 + 0,35H^2 / (H + P)^2], \quad (22.4)$$

где P – высота ребра перед водосливом.

Эта формула получена Базеном и в последующем подтверждена опытами других исследователей при диапазоне размеров:

$$0,2 < b < 2,0 \text{ м}; 0,05 < H < 1,24 \text{ м}; 0,24 < P < 1,13 \text{ м}.$$

Для водослива с боковым сжатием, когда ширина водослива меньше ширины лотка B , в уравнении (22.2) вместо m_0 ставится коэффициент расхода m_c меньший m_0 , так как струя на гребне водослива теряет часть энергии при сжатии в плане.

Коэффициент m_c определяется по эмпирической формуле Эгли

$$m_c = (0,405 + 0,0027 / H - 0,03(B - b) / B) \times \\ \times \{1 + 0,55(b / B)^2 [H / (H + P)]^2\}. \quad (22.5)$$

Если уровень воды в нижнем бьефе (НБ) выше гребня водослива, т. е. $h_6 > P_1$, то водослив может быть подтоплен при условии

$$z / P_1 < (z / P_1)_{кр}, \quad (22.6)$$

где z – разность отметок уровней воды в ВБ и НБ;

P_1 – высота порога водослива со стороны ВБ.

Значения $(z / P_1)_{кр}$ приведены в табл. 4 приложения. Для определения расхода в случае подтопления водослива в формулу (22.2) вводится коэффициент подтопления σ_n , определяемый по эмпирической формуле Базена

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{\Delta}{P_1} \right) \sqrt[3]{z / H}, \quad (22.7)$$

где $\Delta = h_6 - P_1$, – превышение уровня воды в НБ над гребнем водослива.

Задачи исследований:

- 1) продемонстрировать свободное и подтопленное течения через водослив с острым ребром;
- 2) определить опытным путем коэффициент расхода $m_0^{оп}$ при свободном истечении и сравнить его с вычисленным m_0^T по формуле (22.4);
- 3) определить опытным путем коэффициент подтопления $\sigma_n^{оп}$ и сравнить его с вычисленным σ_n^T по формуле (22.7).

Опытная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (рис. 18.2), в котором установлен прямоугольный водослив с острым ребром без бокового сжатия (рис. 22.1).

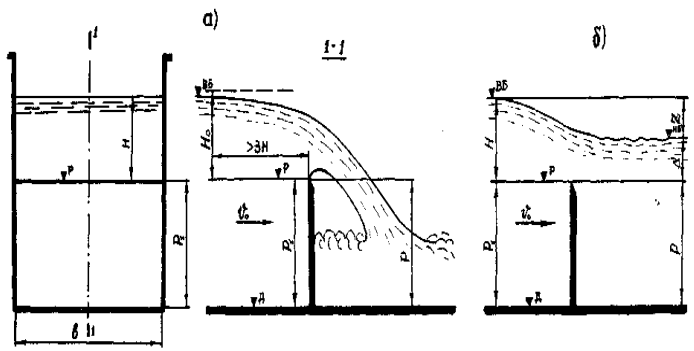


Рис. 22.1. Схема истечения потока через водослив с острым ребром: а – свободное; б – подтопленное

Проведение опытов. В лабораторной работе проводятся два опыта, различающихся характером истечения через водослив с острым ребром без бокового сжатия.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) устанавливается (см. рис. 18.3) постоянный расход в лотке;
- 2) по расходомеру определяется расход Q , м³/ч, л/с;
- 3) при маневрировании концевым затвором достигается свободное истечение через водослив;

4) по координатной сетке лотка измеряются отметки дна лотка, ребра водослива и уровня воды перед водосливом на расстоянии более $3H$. Замеряется ширина водослива;

5) при прежнем расходе Q , установленном для неподтопленного водослива, концевым затвором увеличивается глубина потока в НБ. Подтопление водослива фиксируется подъемом уровня воды в ВБ, это видно по координатной сетке лотка;

6) после стабилизации уровней измеряются отметки поверхности воды в верхнем и нижнем бьефах.

Результаты измерений заносятся табл. 22.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 22.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Виды истечения	
		свободное	подтопленное
1. Расход потока Q	л/с		
2. Глубина воды в ВБ $H_{ВБ}$	см		
3. Высота порога водослива со стороны ВБ P	см		
4. Напор на водосливе H	см		
5. Глубина воды в НБ h_6	см		
6. Средняя скорость потока перед водосливом V_0	см/с		
7. Полный напор на водосливе H_0	см		
8. Опытный коэффициент расхода $m_{оп}$			
9. Опытный приведенный коэффициент расхода $m_0^{оп}$	—		
10. Вычисленный приведенный коэффициент расхода $m_0^т$	—		
11. Разница Δm	%		
12. Опытное значение коэффициента подтопления $\sigma_n^{оп}$	—		
13. Вычисленное значение коэффициента подтопления $\sigma_n^т$	—		
14. Разница $\Delta \sigma_n$	%		

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; отметка дна лотка $\nabla_{\text{д}} = \dots$ мм; отметка ребра водослива $\nabla_{\text{р}} = \dots$ мм; высота порога водослива $P = \nabla_{\text{р}} - \nabla_{\text{д}} = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Определяется скорость подхода потока перед водосливом $V_0 = Q / [b(H + P)]$ и вычисляется полный напор $H_0 = H + \alpha V_0^2 / (2g)$.

2. Опытное значение коэффициента расхода $m_{\text{оп}}$ определяется из формулы (22.1):

$$m_{\text{оп}} = Q / (b\sqrt{2g}H_0^{3/2}).$$

3. Вычисляется опытное значение приведенного коэффициента расхода $m_0^{\text{оп}}$ из формулы (22.2), а теоретическое – по формуле (22.4).

4. Находится разница (в процентах) между опытным и вычисленным приведенным коэффициентом расхода.

5. Опытное значение коэффициента подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}}$ определяется по формуле

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}} = Q / (m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}),$$

где m_0 – приведенный коэффициент расхода, принимаемый равным опытному значению его при свободном истечении.

6. Вычисляется теоретическое значение коэффициента подтопления по формуле (22.7) и сопоставляется с опытным.

Контрольные вопросы

1. Какие водосливы относятся к водосливам с острым ребром?
2. Как определить характер истечения потока через водослив с острым ребром?
3. Чем учитывается уменьшение расхода подтопленного водослива с острым ребром?

23. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Группа водосливов при $2 \geq S/H \geq 0,67$ относится к водосливам практического профиля. По очертанию сливной грани они бывают криволинейные и прямолинейные (рис. 23.1). По очертанию профиля криволинейные водосливы делятся на вакуумные и безвакуумные.

В лабораторной работе исследуются безвакуумный профиль, очерченный по координатам Кригера – Офицера (тип 1), и трапециевидный водосливы без бокового сжатия (рис. 23.1). В зависимости от глубины потока в нижнем бьефе истечение может быть свободным или подтопленным.

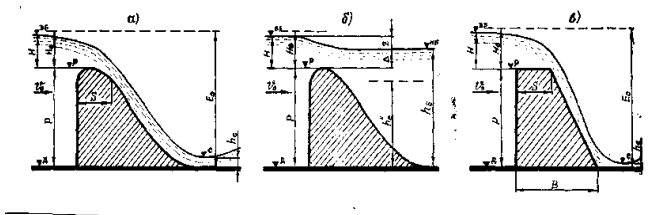


Рис. 23.1. Схема истечения через водослив практического профиля:
a, в – свободное; *б* – подтопленное

Для свободного истечения (рис. 23.1, *a, в*) расход через водослив практического профиля определяется по формуле

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \quad (23.1)$$

где m – коэффициент расхода;

b – ширина отверстия водослива или длина водосливного фронта;

H_0 – полный напор с учетом скорости подхода.

Коэффициент расхода безвакуумного водослива, очерченного по координатам Кригера – Офицера (форма 1), при проектном напоре $H_{пр}$ принимается $m = 0,49$. Проектным напором называется расчетный напор, при котором рассчитываются координаты профиля сливной грани водослива. При отклонении действующего напора от расчетного коэффициент расхода определяется по следующим зависимостям:

$$m = 0,49(0,785 + 0,25H / H_{\text{пр}}) \text{ при } H / H_{\text{пр}} \leq 0,8; \quad (23.2)$$

$$m = 0,49(0,88 + 0,12H / H_{\text{пр}}) \text{ при } 0,8 < H / H_{\text{пр}} \leq 1,0. \quad (23.3)$$

Для трапецидального профиля коэффициент расхода зависит от отношения напора H к толщине гребня S и от коэффициентов заложения напорной m_b и сливной m_n граней водослива. Его значения приведены в табл. 5 приложения.

Безвакуумный водослив практического профиля будет подтоплен при совместном выполнении двух условий:

1) бытовая глубина h_b больше, чем высота водослива со стороны НБ, т. е. $h_b > P_1$;

2) в НБ за водосливом образуется надвинутый (затопленный) гидравлический прыжок, т. е. $h''_c < h_b$.

Вторая сопряженная глубина надвинутого гидравлического прыжка определяется для прямоугольного русла по зависимости

$$h''_c = 0,5h_c(\sqrt{1 + 16\alpha\varphi^2(E_0 - h_c)/h_c} - 1), \quad (23.4)$$

где h_c – глубина в сжатом сечении;

E_0 – удельная энергия в ВБ относительно дна НБ

$$E_0 = H_0 + P_1;$$

P_1 – высота водослива со стороны НБ, $P_1 = P$;

φ – коэффициент скорости, для водослива практического профиля криволинейной формы (принимается $\varphi = 0,95-0,97$).

Глубина в сжатом сечении независимо от формы отводящего русла определяется из уравнения расхода водослива:

$$Q = \omega_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}, \quad (23.5)$$

где ω_c – площадь струи в сжатом сечении.

Для условия плоской задачи, т. е. когда отводящее русло за водосливом достаточно широкое, не считаясь с формой русла, уравнение (23.5) примет вид

$$q = Q/b = \varphi h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}. \quad (23.6)$$

Относительно сжатой глубины решение уравнения (23.6) имеет следующий вид:

$$h_c = \frac{E_0}{3} \left[1 - 2 \cos \left(60^\circ - \frac{\Theta}{3} \right) \right], \quad (23.7)$$

где $\Theta = \arccos[1 - (0,83q/\varphi)^2 E_0^{-3}]$.

Для упрощения решения уравнения (23.6) можно также использовать таблицы профессора И. И. Агроскина (табл. 6 приложения). Сжатая глубина по этим таблицам рассчитывается по следующей методике:

1) находится функция относительной сжатой глубины $\tau_c = h_c / E_0$ по формуле

$$\Phi(\tau_c) = q / (\varphi E_0^{3/2}); \quad (23.8)$$

2) по значению $\Phi(\tau_c)$ из табл. 6 приложения находится τ_c , и глубина потока в сжатом сечении будет

$$h_c = \tau_c E_0. \quad (23.9)$$

Вторая сопряженная для глубины в сжатом сечении при совершенном гидравлическом прыжке в условиях плоской задачи определяется также с помощью табл. 6 приложения. По значению функции $\Phi(\tau_c)$ при принятом значении φ находится τ_c'' и тогда вторая сопряженная глубина

$$h_c'' = \tau_c'' E_0. \quad (23.10)$$

Уменьшение пропускной способности водослива при его затоплении учитывается в формуле расхода (23.1) коэффициентом подтопления $\sigma_n < 1,0$, значение которого приводится в табл. 7 приложения в зависимости от величины Δ / H_0 , где Δ – превышение уровня воды в НБ над гребнем водослива $\Delta = h_6 - P_1$.

Формула расхода водослива с учетом подтопления примет следующий вид:

$$Q = \sigma_n m b \sqrt{2g} H_0^{3/2}. \quad (23.11)$$

Задачи исследований:

1) продемонстрировать истечение через водослив практического профиля;

2) опытным путем определить коэффициенты расхода $m_{\text{оп}}$ и скорости $\varphi_{\text{оп}}$ при свободном истечении;

3) сравнить опытные коэффициенты расхода и скорости со справочными данными или вычисленными по формулам;

4) определить опытным путем коэффициент подтопления $\sigma_{\text{н}}^{\text{оп}}$ и сравнить его со справочным значением $\sigma_{\text{н}}^{\text{т}}$.

Опытная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (см. рис. 18.2, рис. 21.2), в котором установлена модель водослива практического профиля криволинейной или трапецеидальной форм. Для водослива практического профиля криволинейной формы проектный напор $H_{\text{пр}} = 0,10$ м.

Проведение опытов. В работе проводятся исследования для водослива практического профиля криволинейной формы при свободном и подтопленном истечении.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

1) устанавливается постоянный расход в лотке;

2) по расходомеру определяется расход Q , м³/ч, л/с;

3) маневрированием концевого затвора достигается свободное истечение через водослив практического профиля;

4) по координатной сетке измеряются отметки дна лотка, порога водослива, уровней воды перед водосливом на расстоянии более $3H$ и в сжатом сечении. Замеряется ширина водослива b ;

5) для трапецеидального водослива замеряются ширина порога S и основания B ;

6) при прежнем расходе Q , установленном для неподтопленного водослива, концевым затвором увеличивается глубина потока в НБ. Подтопление водослива фиксируется подъемом уровня воды в ВБ по координатной сетке;

7) после стабилизации уровней замеряются отметки поверхности воды в верхнем и нижнем бьефах. Уточняется отметка порога водослива.

Результаты измерений заносятся в табл. 23.1 журнала лабораторных работ.

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; отметка дна лотка $\nabla_{\text{д}} = \dots$ мм; отметка порога водослива $\nabla_{\text{п}} = \dots$ мм; высота порога водослива $P = \nabla_{\text{п}} - \nabla_{\text{д}} = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Вычисляется скорость подхода потока перед водосливом $V_0 = Q / [b(P + H)]$ и определяется полный напор $H_0 = H + \alpha V_0^2 / (2g)$.

2. Для свободного истечения определяется опытное значение коэффициента расхода по формуле

$$m_{\text{оп}} = Q / (b\sqrt{2g}H_0^{3/2}).$$

3. Опытное значение коэффициента скорости $\varphi_{\text{оп}}$ определяется из формулы (23.6).

4. Для водослива криволинейного профиля вычисляется коэффициент расхода $m_{\text{т}}$ по формулам (23.2) или (23.3) в зависимости от соотношения действующего и проектного напоров и сопоставляется с опытным.

5. Для водослива трапецеидального профиля коэффициент расхода принимается по табл. 5 приложения и сопоставляется с опытным.

6. Опытное значение коэффициента подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}}$ определяется по формуле

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}} = Q / (mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}).$$

Таблица 23.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Виды истечения	
		свободное	подтопленное
1. Расход потока Q	л/с		
2. Глубина воды в ВБ $H_{\text{ВБ}}$	см		
3. Высота порога водослива со стороны ВБ P	см		
4. Напор на водосливе $H = H_{\text{ВБ}} - P$	см		
5. Глубина воды в сжатом сечении h_c	см		
6. Глубина воды в НБ h_6	см		
7. Средняя скорость потока перед водосливом V_0	см/с		
8. Скоростной напор $\alpha V_0^2 / (2g)$	см		
9. Полный напор на водосливе H_0	см		
10. Опытный коэффициент расхода $m_{\text{оп}}$	–		
11. Вычисленный коэффициент расхода $m_{\text{т}}$	–		
12. Разница Δm	%		
13. Опытный коэффициент скорости $\varphi_{\text{оп}}$	–		
14. Опытный коэффициент подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}}$	–		
15. Табличный коэффициент подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{т}}$	–		
16. Разница $\Delta\sigma_{\text{п}}$	%		

7. По отношению Δ / H_0 (табл. 7 приложения) определяется табличное значение коэффициента подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{т}}$ и сопоставляется с опытным.

Контрольные вопросы

1. Какие водосливы относятся к водосливам практического профиля?
2. Как делятся водосливы практического профиля по очертанию сливной грани?
3. Как определить характер истечения потока через водослив практического профиля?
4. Какая существует связь между коэффициентом расхода и напором для водослива практического профиля, очерченного по координатам Кригера – Офицерова?
5. Чем учитывается уменьшение расхода подтопленного водослива практического профиля?

24. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОСЛИВА С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Водосливом с широким порогом называется водослив, у которого толщина стенки или длина горизонтального порога находится в пределах $2H < S \leq 10H$ (рис. 24.1). При этом условии на самом пороге в определенных сечениях наблюдается параллельно-струйное течение. В зависимости от соотношения глубин на пороге и за водосливом истечение через водослив может быть свободным или затопленным. Водослив будет не затоплен (рис. 24.1, а), если уровень воды за водосливом не влияет на формирование потока на пороге водослива и на напор H , т. е. при изменении бытовой глубины h_6 в нижнем бьефе (НБ) глубина на пороге не изменяется.

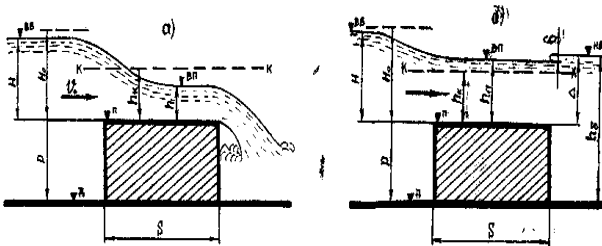


Рис. 24.1. Схема истечения через водослив с широким порогом:
а – свободное; б – подтопленное

На пороге незатопленного водослива поток находится в бурном состоянии, т. е. глубина на пороге меньше критической и при отсутствии бокового сжатия (при одинаковой ширине русла и водослива) расход определяется по формуле (23.1). Для водослива с широким порогом коэффициент расхода определяется по зависимости

$$m = \varphi \kappa \sqrt{1 - \kappa}, \quad (24.1)$$

где $\kappa = h/H_0$ – безразмерное отношение глубины на пороге водослива h к полному напору H_0 .

Связь между коэффициентами расхода и скорости для водослива с широким порогом без бокового сжатия, по данным Д. И. Кумина, приведена в табл. 24.1.

Т а б л и ц а 24.1. Связь между коэффициентами расхода m и скорости φ для водослива с широким порогом без бокового сжатия

m	0,30	0,32	0,34	0,36	0,385
φ	0,94	0,96	0,97	0,98	1,0

Коэффициент расхода для водослива с широким порогом и острой входной гранью и при отсутствии бокового сжатия может определяться по формуле В. В. Смыслова

$$m = 0,3 + 0,08 / (1 + P/H), \quad (24.2)$$

где P – высота порога водослива со стороны ВБ (или по табл. 24.2).

Т а б л и ц а 24.2. Коэффициент расхода водослива с широким порогом и острой входной гранью без бокового сжатия

P/H	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
m	0,385	0,366	0,356	0,350	0,345	0,342	0,333	0,327	0,325	0,320

Для других конструкций входной грани водослива с широким порогом без бокового сжатия коэффициент расхода приводится в литературе.

Особенностью водослива с широким порогом в отличие от водосливов других видов является то, что подтопление и уменьшение пропускной способности его достигается при относительном подтоплении

Δ / H_0 больше второй приведенной сопряженной глубины на пороге водослива K_2 , т. е. критерием подтопления является неравенство

$$\Delta / H_0 > K_2, \quad (24.3)$$

где Δ – превышение уровня воды над порогом водослива;

$$K_2 = \frac{1}{3} \left[2 \cos \left(60^\circ - \frac{\Theta}{3} \right) + 1 \right], \quad (24.4)$$

где угол Θ определяется из выражения

$$\cos \Theta = \frac{27}{2} \left(\frac{m}{\varphi} \right)^2 - 1. \quad (24.5)$$

Расход подтопленного водослива определяется по формуле (23.10) с введением коэффициента σ_n , учитывающего подтопление и перепад восстановления δ (рис. 24.1, б) при расширении потока за водосливом или по формуле без учета перепада восстановления, который в лабораторных условиях практически незаметен:

$$Q = \varphi_n b h_n \sqrt{2g(H - h_n)}, \quad (24.6)$$

где h_n – глубина на пороге подтопленного водослива, которая определяется по формуле

$$h_n = h_6 - P_1;$$

где P_1 – высота порога водослива со стороны НБ;

φ_n – коэффициент скорости подтопленного водослива с широким порогом.

Значения второй приведенной сопряженной глубины на пороге водослива K_2 и коэффициента скорости подтопленного водослива φ_n приведены в табл. 8 приложения, а коэффициента подтопления σ_n при среднем значении коэффициента скорости подтопленного водослива $\varphi_n = 0,9$, т. е. при среднем значении коэффициента расхода $m = 0,34$, – в табл. 9 приложения.

Задачи исследований:

1) продемонстрировать истечение через водослив;

2) определить опытным путем коэффициент расхода $m_{оп}$ и скорости $\varphi_{оп}$ незатопленного водослива и сравнить их со справочными значениями;

3) определить опытным путем коэффициент подтопления $\sigma_n^{оп}$ и сравнить его со справочным значением;

4) построить профиль свободной поверхности потока при свободном и подтопленном истечении через водослив с широким порогом.

Опытная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (рис. 18.2), в котором установлена модель водослива с широким порогом с острым входным ребром без бокового сжатия.

Проведение опытов. В лабораторной работе проводятся два опыта, различающихся характером истечения через водослив с широким порогом без бокового сжатия.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

1) устанавливается постоянный расход в лотке;

2) по расходомеру определяется расход Q , м³/ч, л/с;

3) при маневрировании концевым затвором достигается свободное истечение через водослив;

4) по координатной сетке замеряются отметки дна лотка, порога водослива, уровня воды перед водосливом на расстоянии более $3H$ и на пороге водослива. Замеряется ширина водослива b ;

5) принимается произвольное начало отсчета, на фиксированных расстояниях замеряются отметки свободной поверхности потока, необходимые для построения ее профиля при свободном истечении через водослив;

6) при прежнем расходе Q , установленном для свободного истечения, концевым затвором увеличивается глубина потока в НБ. Подтопление водослива фиксируется подъемом уровня воды в ВБ по координатной сетке;

7) после стабилизации уровней замеряются отметки поверхности воды в нижнем и верхнем бьефах, а также на пороге водослива. Уточняется отметка порога водослива;

8) определяются отметки свободной поверхности потока и расстояния для ряда сечений, необходимые для построения ее профиля при подтопленном истечении через водослив.

Результаты измерений заносятся в табл. 24.3, 24.4 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 24.3. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Виды истечения	
		свободное	подтопленное
1. Расход потока Q	л/с		
2. Напор на водосливе $H = \nabla_{\text{вб}} - \nabla_{\text{п}}$	см		
3. Глубина на пороге водослива h	см		
4. Глубина воды в НБ $h_{\text{б}} = \Delta_{\text{нб}} - \Delta_{\text{д}}$	см		
5. Средняя скорость потока перед водосливом V_0	см/с		
6. Полный напор на водосливе H_0	см		
7. Опытный и табличный коэффициенты расхода $m_{\text{оп}}, m_{\text{т}}$	–		
8. Разница Δm	%		
9. Опытный и табличный коэффициенты скорости $\varphi_{\text{оп}}, \varphi_{\text{т}}$	–		
10. Разница $\Delta \varphi$	%		
11. Опытный и табличный коэффициенты подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}}, \sigma_{\text{п}}^{\text{т}}$	–		
12. Разница $\Delta \sigma_{\text{п}}$	%		

Т а б л и ц а 24.4. Координаты для построения профиля свободной поверхности потока на водосливе

Наименование	Виды истечения	
	свободное	подтопленное
Расстояние от начала отсчета		
Отметка поверхности потока		
Глубина потока		

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; отметка дна лотка $\nabla_{\text{д}} = \dots$ мм; отметка порога водослива $\nabla_{\text{п}} = \dots$ мм; высота порога водослива $P = \nabla_{\text{п}} - \nabla_{\text{д}} = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Определяются скорость подхода потока перед водосливом $V_0 = Q / [b(P + H)]$ и полный напор $H_0 = H + \alpha V_0^2 / (2g)$.

2. Для свободного истечения определяется опытное значение коэффициента расхода по формуле

$$m_{\text{он}} = Q / (b\sqrt{2g}H_0^{3/2}).$$

3. Опытное значение коэффициента скорости определяется из формулы (24.1).

4. Определяются табличные значения коэффициентов расхода m_t и скорости φ_t и сопоставляются с опытными.

5. Опытное значение коэффициента подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}}$ определяется по формуле

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{оп}} = Q / (mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}),$$

где m – коэффициент расхода, принимаемый равным опытному значению при свободном истечении.

6. По отношению Δ / H_0 (табл. 9 приложения) определяется табличное значение коэффициента подтопления $\sigma_{\text{п}}^{\text{т}}$ и сопоставляется с опытом.

7. По данным лабораторных измерений строится профиль свободной поверхности потока для свободного и подтопленного истечения. Построение выполняется на одном чертеже.

8. На профиль наносится линия критических глубин, значение которой определяется по формуле (20.5).

Контрольные вопросы

1. Какие водосливы относятся к водосливам с широким порогом?
2. Как определить характер истечения потока через водослив с широким порогом?
3. Чем учитывается уменьшение расхода подтопленного водослива с широким порогом?
4. Какое соотношение будет между критической глубиной и глубиной на пороге водослива при свободном и подтопленном истечении? Показать на примере опыта.

25. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ-ПОД ЗАТВОРА

В работе исследуется истечение из-под плоского вертикального затвора без порога (рис. 25.1) в условиях плоской задачи. В зависимости от характера влияния нижнего бьефа на поток, вытекающий из-под затвора, истечение может быть свободным или несвободным. Условием свободного истечения может служить следующее выражение:

$$\frac{h_6}{h_c} \left(\frac{h_6}{h_c} + 1 \right) < 4\varphi^2 \left(\frac{H_0}{h_c} - 1 \right), \quad (25.1)$$

где h_6 – глубина в НБ (бытовая глубина);

h_c – глубина в сжатом сечении за затвором;

φ – коэффициент скорости, который для затворов без порога принимается $\varphi = 0,95-0,97$;

H_0 – глубина перед затвором с учетом скорости подхода.

При соблюдении этого условия бытовая глубина h_6 будет меньше второй сопряженной глубины h''_c относительно сжатого сечения и прыжок будет отогнан. Расход при свободном истечении из-под затвора (рис. 25.1) определяется по формуле

$$Q = \mu b a \sqrt{2g(H_0 - h_c)}, \quad (25.2)$$

где μ – коэффициент расхода $\mu = \varepsilon\varphi$;

ε – коэффициент вертикального сжатия струи;

a – высота отверстия (высота поднятия затвора);

b – ширина затвора.

Н. Е. Жуковский теоретически установил, что коэффициент вертикального сжатия для плоского затвора зависит только от величины a/H . Значение этого коэффициента приводится в табл. 10 приложения.

Если условие (25.1) не выполняется, то истечение из-под затвора будет несвободным. Оно подразделяется на подтопленное и затопленное.

Несвободное истечение, происходящее с образованием затопленного гидравлического прыжка, называется подтопленным (рис. 25.1, б).

Расход при несвободном подтопленном истечении определяется по формуле

$$Q = \mu b a \sqrt{2g(H_0 - h_z)}, \quad (25.3)$$

где h_z – глубина непосредственно за затвором.

При решении уравнения затопленного гидравлического прыжка получена зависимость для определения глубины за затвором при известной высоте открытия затвора, т. е.

$$h_z = \sqrt{h_6^2 - M(H_0 - 0,25M)} + 0,5M, \quad (25.4)$$

где

$$M = 4\mu^2 a^2 \frac{h_6 - h_c}{h_6 h_c}. \quad (25.5)$$

При известном расходе, вытекаемом из-под затвора, глубина за ним может быть определена по зависимости

$$h_z^2 = h_6^2 - 2h_k^3 (h_6 - h_c) / (h_6 h_c), \quad (25.6)$$

где h_k – критическая глубина, определяемая по формуле (20.5).

Несвободное истечение, при котором непосредственно за затвором образуется глубина, равная h_6 , называется затопленным (рис. 25.1, в). Затопленное истечение наступает в тот момент, когда скорость истечения V из отверстия уменьшается до критической V_k – сопряжение в этом случае будет без прыжка. Тогда критерием затопленного истечения будет условие

$$\Delta z = H_0 - h_6 \leq \Delta z_k, \quad (25.7)$$

$$\Delta z_k = h_k / (1,65\varphi^2), \quad (25.8)$$

где h_k – критическая глубина для русла прямоугольного сечения, определяемая по формуле (20.5).

Расход при затопленном истечении определяется по формуле

$$Q = \mu b a \sqrt{2g(H_0 - h_6)}, \quad (25.9)$$

а коэффициент расхода в зависимости от условий подхода потока к отверстию затвора принимается равным $\mu = 0,65-0,70$.

Задачи исследований:

1) продемонстрировать истечение из-под плоского вертикального затвора;

2) определить опытным путем коэффициент расхода $\mu_{оп}$ для свободного, подтопленного и затопленного истечения из-под затвора;

3) определить опытным путем коэффициент сжатия $\varepsilon_{оп}$ и коэффициент скорости $\varphi_{оп}$ при свободном и подтопленном истечении из-под затвора;

4) сопоставить опытные коэффициенты расхода, скорости и сжатия с принятыми в справочной литературе.

Опытная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (см. рис. 18.2), в котором устанавливается модель плоского вертикального затвора с регулятором подъема по высоте.

Проведение опытов. В лабораторной работе проводятся опыты для свободного, подтопленного и затопленного истечения из-под плоского вертикального затвора.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

1) измеряется высота поднятия затвора (высота отверстия) a и его ширина b ;

2) задвижкой устанавливается постоянный расход Q воды в лотке;

3) по расходомеру определяется расход Q , м³/с, л/с;

4) при маневрировании концевым затвором достигается отогнанное положение гидравлического прыжка, а следовательно, свободное истечение из-под плоского вертикального затвора (рис. 25.1, а);

5) при свободном истечении замеряются отметки дна лотка, уровни воды в верхнем бьефе и в сжатом сечении, которое находится на расстоянии a от затвора;

6) расход Q и высота поднятия затвора a остаются прежними. Концевым затвором увеличивается бытовая глубина h_6 и достигается надвинутое положение гидравлического прыжка. В этом случае будет подтопленное истечение из-под плоского вертикального затвора;

7) при подтопленном истечении (рис. 25.1, б) замеряются отметки уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, а также непосредственно за затвором;

8) расход Q остается прежним. Увеличивается высота поднятия затвора a и достигается сопряжение в НБ без гидравлического прыжка. В этом случае будет затопленное истечение из-под затвора (рис. 25.1, в);

9) при затопленном истечении замеряются отметки уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, высота поднятия затвора.

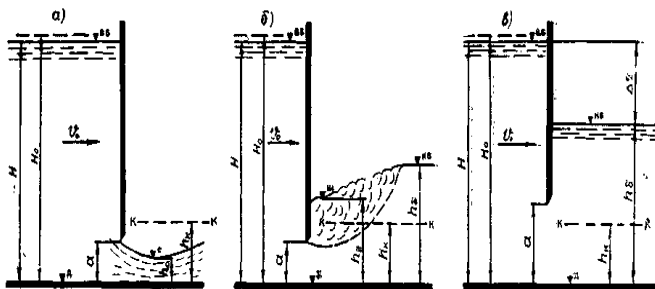


Рис. 25.1. Схема истечения из-под затвора:
a – свободное; *б* – подтопленное; *в* – затопленное

Результаты измерений заносятся в табл. 25.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 25.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Виды истечения		
		свободное	подтопленное	затопленное
1. Расход потока Q	л/с			
2. Высота открытия затвора a	см			
3. Напор перед затвором H	см			
4. Средняя скорость потока перед затвором V_0	см/с			
5. Полный напор перед затвором H_0	см			
6. Глубина в сжатом сечении h_c	см			
7. Глубина непосредственно за затвором h_z	см			
8. Глубина в нижнем бьефе h_b	см			
9. Опытный коэффициент расхода $\mu_{оп}$	—			
10. Опытный и табличный коэффициенты сжатия $\varepsilon_{оп}, \varepsilon_t$	—			
11. Разница $\Delta\varepsilon$	%			
12. Опытное и справочное значение коэффициента скорости $\varphi_{оп}, \varphi_t$	—			
13. Разница $\Delta\varphi$	%			

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; отметка дна лотка $\nabla_d = \dots$ мм.

Обработка результатов.

1. Для всех видов истечения вычисляется соответствующая скорость подхода $V_0 = Q / (bH)$ и соответствующий полный напор $H_0 = H + \alpha V_0^2 / (2g)$.

2. Из зависимостей (25.2), (25.3), (25.9), соответствующих свободному, подтопленному и затопленному истечению, определяются опытные коэффициенты расхода $\mu_{\text{оп}}$.

3. Для затопленного истечения сопоставляются опытный коэффициент расхода $\mu_{\text{оп}}$ и принятый μ_r по справочной литературе.

4. Для свободного и подтопленного истечения определяются опытные коэффициенты сжатия $\varepsilon_{\text{оп}} = h_c / a$ и скорости $\varphi_{\text{оп}} = \mu_{\text{оп}} / \varepsilon_{\text{оп}}$. При подтопленном истечении глубина в сжатом сечении h_c принимается как для свободного истечения.

5. Сопоставляется опытный коэффициент скорости $\varphi_{\text{оп}}$ с принятым по справочной литературе φ_r .

6. По значению a / H определяется табличный коэффициент сжатия ε_r (табл. 10 приложения) для свободного и подтопленного истечения и сопоставляется с опытным.

Контрольные вопросы

1. Как установить свободное или несвободное истечение из-под вертикального плоского затвора?

2. Как установить подтопленное и затопленное истечение из-под затвора?

3. Как определить расход из-под затвора при свободном, подтопленном и затопленном истечении?

4. От каких величин зависит коэффициент сжатия при истечении из-под затвора?

26. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ПОТОКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ КРЕПЛЕНИЯ РУСЛА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Поток, переливающийся через водослив или вытекающий из-под затвора, всегда за сооружением достигает наименьшей глубины при вступлении его на водобой. Сечение, в котором глубина ниспадающего потока делается наименьшей, называют сжатым. Глубина в сжатом сечении h_c независимо от уклона дна отводящего русла меньше критической h_k . Таким образом, поток вступает на водобой в бурном состоянии. В зависимости от состояния потока в отводящем русле за сооружением, которое может быть бурным или спокойным, будет наблюдаться различное его сопряжение.

В работе предусмотрено сопряжение переливающейся струи через водослив практического профиля со спокойным состоянием потока в отводящем русле. В этом случае переход от бурного состояния при h_c в спокойное с h_6 произойдет только через гидравлический прыжок, вид которого будет зависеть от кинетичности потока в НБ, а местоположение – от соотношения удельной энергии в сжатом сечении с глубиной h_6 в отводящем русле.

Удельной энергией потока в сжатом сечении является вторая сопряженная глубина h''_c с глубиной в этом сечении, т. е. $s h_c = h'_c$. Связь между h''_c и h_c для русла прямоугольной формы выражается зависимостями (21.3), а для русла произвольной формы – по уравнению прыжковой функции (21.2).

Глубина в сжатом сечении определяется по формуле (23.7) или с помощью вспомогательной функции $\Phi(\tau_c)$, значение которой определяется по формуле (23.8). По величине $\Phi(\tau_c)$ определяется относительная сжатая глубина τ_c (табл. 9 приложения) и по формуле (23.9) – сжатая глубина.

Сопоставляя энергию потока в сжатом сечении h''_c с энергией потока в отводящем русле h_6 , получим местоположение гидравлического прыжка:

- при $h''_c > h_6$ – прыжок отогнан (рис. 26.1, а);
- при $h''_c = h_6$ – предельное местоположение гидравлического прыжка (рис. 26.1);
- при $h''_c < h_6$ – надвинутое местоположение гидравлического прыжка.

При отогнанном местоположении гидравлического прыжка поток на участке отгона находится в бурном состоянии и скорость V достигает значительной величины. В целях устойчивости отводящего русла предусматривается крепление этого участка. Его длина определяется как

$$l_{кр} = l_{отг} + l_{пр} + l_{п.п.}, \quad (26.1)$$

где $l_{отг}$ – длина отгона гидравлического прыжка;

$l_{пр}$ – длина прыжка;

$l_{п.п.}$ – длина послепрыжкового участка.

Так как работа выполняется в лотке с $i = 0$, то длину отгона рассчитывают по уравнению (20.2). Длина отгона распространяется между глубиной в сжатом сечении h_c и первой сопряженной глубиной гидравлического прыжка h' (рис. 26.1, а). Глубину h' для русла прямоугольной формы рассчитывают по зависимости (21.3), а для русла произвольной формы – по уравнению прыжковой функции (21.2), приняв вторую сопряженную глубину гидравлического прыжка h'' , равную бытовой h_5 .

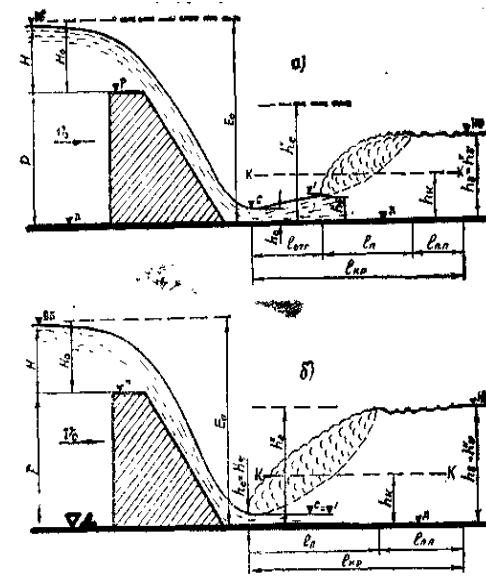


Рис. 26.1. Схема сопряжения потока в нижнем бьефе водослива практического профиля: а – отогнанное местоположение прыжка; б – предельное местоположение прыжка

Пояснение параметров, входящих в уравнение (20.2), и методика его решения приведены в работе 20.

Длину гидравлического прыжка в зависимости от его вида рассчитывают по формулам (21.4)–(21.6) или (21.12). Длиной послепрыжкового участка называют длину $l_{п.п.}$ в пределах которой происходит переход осредненных и пульсационных кинематических (скорость) и динамических (давление) характеристик от величин, соответствующих концу гидравлического прыжка, к величинам и распределениям этих характеристик, которые свойственны потоку, находящемуся в невозмущенном (бытовом) состоянии. При этом длина участка перехода к характеристикам плавно изменяющегося движения может быть различна для пульсационных и осредненных характеристик.

Зависимости для определения длины послепрыжкового участка выведены на основе экспериментальных исследований и натуральных наблюдений и имеют следующий вид:

по М. Д. Чертоусову

$$l_{п.п.} = (2,5-3,0) l_{пр}; \quad (26.2)$$

по М. С. Вызго

$$l_{п.п.} = 0,4h_{\delta} / n, \quad (26.3)$$

где n – коэффициент шероховатости русла.

Длина крепления отводящего русла при предельном местоположении гидравлического прыжка (рис. 26.1, б)

$$l_{кр} = l_{пр} + l_{п.п.} \quad (26.4)$$

При надвинутом местоположении гидравлического прыжка, когда степень затопления составляет $\sigma_3 = h_{\delta} / h''_c \leq 1,1$, производится также крепление отводящего русла, длина которого

$$l_{кр} = l'_{пр} + l_{п.п.} \quad (26.5)$$

где $l'_{пр} = 6(h''_c - h_c)$ – длина надвинутого прыжка.

При увеличении степени затопления длина крепления может быть уменьшена.

Задачи исследований:

1) продемонстрировать сопряжение потока в НБ сооружения при различном местоположении гидравлического прыжка;

2) определить опытным путем длину крепления отводящего русла при отогнанном, предельном и надвинутом местоположении гидравлического прыжка;

3) сравнить опытную величину длины крепления $l_{кр}^{оп}$ отводящего русла с рассчитанным по существующим формулам $l_{кр}^T$.

Опытная установка. Работа выполняется в гидравлическом лотке с переменным уклоном (см. рис. 18.2, рис. 21.2), в котором установлена модель водослива практического профиля криволинейной формы. Для водослива практического профиля криволинейной формы проектный напор $H_{пр} = 0,1$ м.

Проведение опытов. В лабораторной работе проводятся три опыта, различающихся между собой местоположением гидравлического прыжка относительно сооружения.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) задвижкой устанавливается постоянный расход в лотке;
- 2) по расходомеру определяется расход Q , м³/с, л/с;
- 3) при маневрировании концевым затвором достигается отогнанное местоположение гидравлического прыжка (рис. 26.1, а);
- 4) по координатной сетке измеряются отметки дна лотка, порога водослива, урвней воды в верхнем и нижнем бьефах в сжатом сечении и непосредственно перед прыжком;
- 5) мерной линейкой измеряются длина отгона гидравлического прыжка, находящегося между глубиной в сжатом сечении h_c и первой сопряженной глубиной гидравлического прыжка h' , и непосредственно длина прыжка. Длина послепрыжкового участка устанавливается визуально и замеряется ориентировочно от сечения за прыжком до сечения, где движение потока становится спокойным (рис. 26.1, а);
- 6) увеличивается глубина потока в отводящем русле, чем достигается предельное и надвинутое местоположение гидравлического прыжка;
- 7) измерение величин производится в аналогичной последовательности, как и для отогнанного местоположения гидравлического прыжка.

Результаты измерений и наблюдений заносятся в табл. 26.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 26.1 Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Ед. изм.	Местоположение прыжка		
		отогнанное	предельное	надвинутое
1	2	3	4	5
1. Расход потока Q	л/с			
2. Глубина воды в НБ h_b	см			
3. Опытная глубина воды в сжатом сечении $h_c^{оп}$	см			
4. Вычисленная глубина воды в сжатом сечении h_c^T	см			

1	2	3	4	5
5. Разница Δh_c	%			
6. Опытная глубина воды перед прыжком $h'_{оп}$	см			
7. Вычисленная глубина воды перед прыжком h'_T	см			
8. Разница Δh	%			
9. Опытная длина отгона гидравлического прыжка $l_{отг}^{оп}$	см			
10. Опытная длина прыжка $l_{пр}^{оп}$	см			
11. Вычисленная длина прыжка $l_{пр}^T$	см			
12. Разница $\Delta l_{пр}$	%			
13. Опытная длина послепрыжкового участка $l_{п.п.}^{оп}$	см			
14. Вычисленная длина послепрыжкового участка $l_{п.п.}^T$	см			
15. Разница $\Delta l_{п.п.}$	%			
16. Опытная длина крепления русла в НБ $l_{кр}^{оп}$	см			
17. Вычисленная длина крепления русла в НБ $l_{кр}^T$	см			
18. Разница $\Delta l_{кр}$	%			

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; отметка дна лотка $\nabla_d = \dots$ мм; отметка порога водослива $\nabla_p = \dots$ мм; отметка уровня воды в ВБ $\nabla_{вб} = \dots$ мм; высота порога водослива $P = \nabla_p - \nabla_d = \dots$ см; напор на водосливе $H = \nabla_{вб} - \nabla_p = \dots$ см; полный напор $H_0 = \dots$ см; полная удельная энергия $E_0 = H_0 + P = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Вычисляются скорость подхода потока перед водосливом V_0 , полный напор H_0 и значение полной удельной энергии $E_0 = H_0 + P$.

2. Определяется опытное значение длины крепления русла для отогнанного (26.1), предельного (26.4) и надвинутого (26.5) местоположения гидравлического прыжка.

3. По формуле (23.8) вычисляется теоретическое значение глубины в сжатом сечении h_c^T и сопоставляется с опытным.

Значение коэффициента скорости $\varphi_{оп}$ принимается опытное (из работы 23) или табличное.

4. Принимается глубина в отводящем русле за вторую сопряженную глубину h'' гидравлического прыжка. По формуле (21.3) опреде-

ляется теоретическое значение первой сопряженной глубины h'_T и сопоставляется с опытным значением.

5. По формуле (20.2) между глубинами h_c^T и h'_T определяется теоретическое значение длины отгона $l_{отг}^T$ гидравлического прыжка. Расчет производится в табличной форме (табл. 26.2).

6. Для отогнанного и предельного местоположения гидравлического прыжка в зависимости от вида по формулам (21.4)–(21.6) или (21.12) определяется его длина. Длина надвинутого прыжка определяется по формуле (26.5).

7. Определяется длина послепрыжкового участка по формуле (26.2) или (26.3).

8. По формулам (26.1), (26.4), (26.5), соответствующим местоположению гидравлического прыжка, определяется теоретическое значение длины крепления русла $l_{кр}^T$ и сопоставляется с опытным значением.

Т а б л и ц а 26.2. Расчет теоретической длины отгона гидравлического прыжка

Створ	h , м	Δh , м	ω , м ²	χ , м	R , м	C , м ^{0,5} /с	Q' , м ³ /с	V' , м/с	Π'_k	$\Pi'_{к.ср}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1										
2										

О к о н ч а н и е т а б л. 26.2

Створ	$z = Q'/Q$	Δz	$f(z)$	$\Delta f(z)$	$\Pi'_{к.ср} \Delta z$	[16]–[15]	a	a/i	l_{1-2} , м
1	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1									
2									

Контрольные вопросы

1. Как установить местоположение гидравлического прыжка в НБ относительно сооружения?
2. Как рассчитывается длина отгона гидравлического прыжка?
3. Как определить длину крепления русла в НБ при разном местоположении гидравлического прыжка?
4. Чем объясняется необходимость крепления отводящего русла?

27. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА НА БЫСТРОТОКЕ

Быстроток, как и многоступенчатый перепад, принадлежит к сопрягающим или водопроводящим сооружениям, широко распространенным в практике гидротехнического строительства. Быстроток различают с обычной и с повышенной (искусственной) шероховатостью.

Быстроток представляет собой канал правильной формы с уклоном дна больше критического (рис. 27.1). На таких быстротоках поток находится в бурном состоянии.

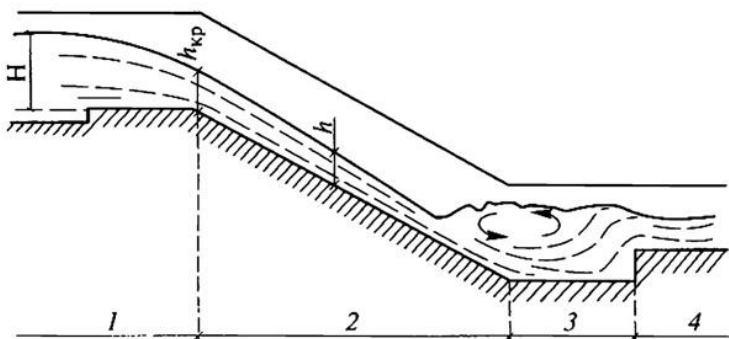


Рис. 27.1. Разрез быстротока:
1 – входная часть; 2 – водоскат (лоток);
3 – водобойная часть; 4 – выходная часть

При гидравлическом расчете быстротока различают следующие элементы расчета:

- расчет входной части (определение размеров входной части);
- расчет транзитной части, водоската (установление характера потока на лотке быстротока, определение глубин и скоростей этого потока);
- расчет выходной части (сопряжение потока, движущегося по лотку быстротока (водоскату), с потоком в нижнем бьефе).

Расчеты входной, транзитной и выходной частей рассматриваются очень подробно на практических занятиях. А расчет транзитной части (расчет потока на быстротоке) закрепляется еще и на примере лабораторной работы.

В зависимости от отношения начальной глубины, с которой начинается кривая свободной поверхности потока на транзитной части быстроготока (водоскате), и нормальной глубины на водоскате быстроготока могут быть различные формы кривой свободной поверхности потока (СПП).

Форма кривой СПП зависит от уклона дна русла ($i > 0$), соотношения глубины потока с нормальной h_0 и критической $h_{кр}$ глубинами ($h > h_0, h > h_{кр}$, причины, вызвавшей нарушение равномерного движения потока, и устанавливается на основании анализа дифференциального уравнения (20.6).

Анализ кривой СПП покажем на примере лотка быстроготока. Пусть равномерное движение потока нарушено сменой уклона дна русла с меньшей величины на большую ($i_1 < i_{кр}, i_2 > i_{кр}$). При этом $0 < i_2 < i_{кр}$, а глубина потока $h_{кр} > h > h_0$. Так как $h > h_0$, то соотношение расходных характеристик будет: $\kappa_0 < \kappa$ и $\kappa_0 / \kappa < 1,0$. При $i > i_{кр}$ и $h < h_{кр}$ состояние потока будет бурное и $\Pi_{кр} > 1,0$. Теперь устанавливаются знаки в числителе и знаменателе уравнения (20.6) и общий знак, т. е.

$$\frac{dh}{d\ell} = i \frac{1 - (\kappa_0 / \kappa)^2}{1 - \Pi_{кр}} = + \frac{+}{-} < 0,$$

что показывает на уменьшение глубин потока в направлении его движения. В данном случае кривая спада будет в зоне *Пв*.

Расчетные уравнения для установившегося неравномерного движения жидкости в зависимости от уклона дна русла имеют различный вид. При положительном уклоне ($i > 0$) приводится расчетная зависимость, которая имеет следующий вид (20.1)

$$\ell_{1-2} = \frac{a}{i} \{z_2 - z_1 - (1 - \Pi'_{кр}) [\Phi(z_2) - \Phi(z_1)]\};$$

где ℓ_{1-2} – расстояние между сечениями потока с глубинами h_1 и h_2 ;

$$a = \frac{dh}{dz} \approx \frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{h_2 - h_1}{z_2 - z_1}$$

ны потока h ;

i' – любой положительный уклон дна русла;

$$z = \sqrt[3]{(Q' / Q)^2}$$

– переменная величина, зависящая от глубины потока h ;

Q – расчетный (постоянный для всех сечений) расход;
 Q' – фиктивный расход, который пропускало бы данное живое сечение при равномерном движении с глубиной h ;

$\Pi'_{к, ср} = 1/2(\Pi'_{к1} + \Pi'_{к2})$ – среднее арифметическое значение параметра кинетичности для первого и второго сечений;

$\Pi'_к = \frac{\alpha(Q')^2}{g\omega^3} B$ – параметр кинетичности, который для русла прямо-

угольной формы можно записать в виде:

$$\Pi'_к = \frac{\alpha(Q')^2}{g\omega^3} b = \frac{\alpha(V')^2}{gh};$$

V' – средняя скорость потока, определяемая по фиктивному расходу

$$V' = Q' / \omega;$$

$\Phi(z) = \int \frac{dz}{1-z^x} + c$ и $f(z) = \int z^x dz + c$ – переменные функции, за-

висящие от глубины потока h .

При показателе степени $x = 2,0$ и $c = 0$ вышеприведенные интегралы являются стандартными и имеют простые конечные решения следующего вида (20.3):

$$\Phi(z) = \int \frac{dz}{1-z^2} = 0,5 \ln \left| \frac{1+z}{1-z} \right| = 1,15 \lg \left| \frac{1+z}{1-z} \right|.$$

Приведенная зависимость (20.1) справедлива как для спокойного, так и для бурного состояния потоков, которое можно определить с помощью критической глубины.

Обычно при расчете быстротока с $i > i_{кр}$ известна глубина в начальном сечении $h_{нач} = h_{кр}$ и длина быстротока ℓ . Она для русла прямоугольного сечения определяется по формуле (20.5)

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g},$$

где α – коэффициент Кориолиса. При прямолинейном турбулентном движении в земляных каналах $\alpha = 1,10-1,25$;

$q = Q/b$ – удельный расход, т. е. расход потока на единицу его ширины.

При больших уклонах и расходах на лотке быстротока создаются большие скорости течения, зачастую превышающие скорости на размыв. Для уменьшения скорости на быстротоках применяют искусственную шероховатость; последняя вызывает возрастание гидравлических сопротивлений, а следовательно, увеличение глубины потока и уменьшение скорости.

Искусственную шероховатость достигают установкой на лотке быстротока ребер, различной плановой конфигурации, или шашек, размещаемых в шахматном порядке (рис. 27.2)

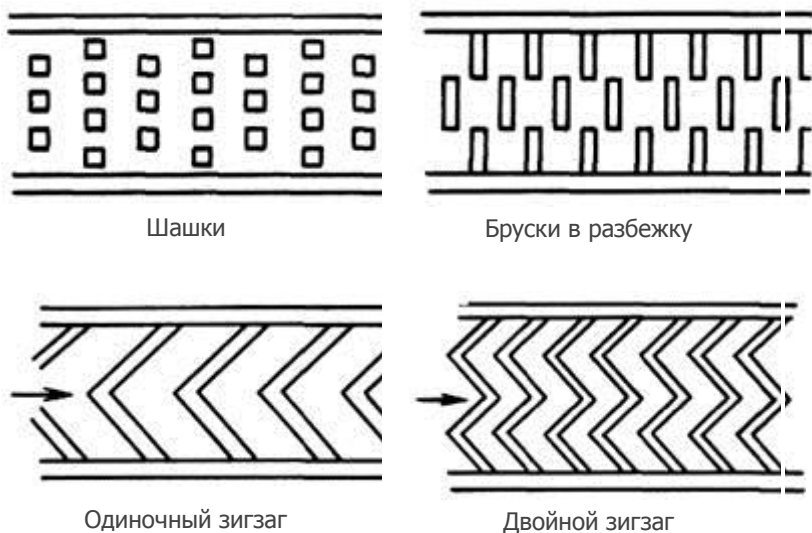


Рис. 27.2. Искусственная шероховатость на быстротоке

Задачи исследования:

- 1) построить по опытным данным кривую свободной поверхности потока на быстротоке (кривую спада);
- 2) определить длину кривой СПП (кривой спада) и сравнить с длиной быстротока. Сделать выводы и принять глубину в конце лотка быстротока h_2 , которая требуется при расчете выходной части;
- 3) для глубин, замеренных для изучаемого потока в лаборатории, рассчитать по зависимостям (20.1) кривую свободной поверхности потока и сопоставить с опытной.

4) для уменьшения скорости на быстротоках применить искусственную шероховатость.

Опытная установка. Гидравлический лоток с переменным уклоном (см. рис. 18.2), который является составной частью стенда (см. рис. 18.3). Вода в лоток подается по водопроводу, а расход ее определяется расходомером-счетчиком, который имеет размерность Q , м³/ч. Глубины уровня воды в лотке измеряются по координатной сетке, имеющей определенный масштаб.

Проведение опытов. В работе исследуется кривая сводной поверхности потока (кривая спада), полученная за счет смены уклонов дна лотка быстротока с меньшей величины на большую.

Порядок проведения исследования приведен ниже.

1. Гидравлический лоток с переменным уклоном и представляет собой быстроток прямоугольного поперечного сечения с постоянной шириной $b = 30$ см (см. рис. 18.3). На фиксированных расстояниях от входного сечения лотка по координатной сетке намечаются по длине потока 5–6 створов.

Измерение расстояний и глубин потока в исследуемом створе производится с помощью координатной сетки. Результаты измерений заносятся в табл. 27.1 журнала лабораторных работ.

2. В гидравлическом лотке с уклоном больше критического $I = i = 0,1$ (см. рис. 18.3) устанавливается постоянный расход Q , который определяется по расходомеру, м³/ч, л/с.

Концевым затвором лотка устанавливается такая глубина воды в нижнем бьефе (НБ) сооружения, чтобы гидравлический прыжок был отогнанным.

В лотке быстротока с крутым уклоном и отметки дна лотка будут разными для всех створов, и отметки свободной поверхности воды в 5–6 створах разными. Разность отметок дает измеряемую глубину $h = \nabla_n - \nabla_d$ (по масштабу координатной сетки). Расстояние между створами измеряется также по координатной сетке. Результаты измерений заносятся в табл. 27.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 27.1. Результаты опытных измерений кривой СПП

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
Расход потока Q	л/с			
Измерение глубин:				
глубина потока в створе h	см			
расстояние l от i -го створа	см			

Постоянные величины: ширина лотка $b = \dots$ см; уклон дна лотка $i = h_i / \ell = \dots$.

Обработка результатов.

1. Из формулы (19.3) рассчитывается нормальная глубина h_0 потока. Эквивалентный коэффициент шероховатости принимается из работы 19.

2. По формуле (20.5) определяется критическая глубина потока.

3. По общему дифференциальному уравнению (20.6) установившегося неравномерного движения дается анализ и устанавливается тип кривой свободной поверхности потока.

4. Для каждой глубины створа вычисляются гидравлические характеристики потока: площадь живого сечения $\omega = bh$; смоченный периметр $\chi = b + 2h$; гидравлический радиус $R = \omega / \chi$; коэффициент Шези C по формуле (19.3). Результаты вычислений выполняются в табличной форме (табл. 20.2).

5. Вычисляются следующие показатели: величина фиктивного расхода Q' по формуле (19.3); средняя скорость потока $V' = Q' / \omega$; параметр кинетичности $\Pi'_k = (V')^2 / (gh)$; величина $z = Q' / Q$; функции $\Phi(z)$ или $f(z)$ по формуле (20.3) или (20.4) в зависимости от уклона дна лотка; величина $a = (h_2 - h_1) / (z_2 - z_1)$.

6. Дальнейшие вычисления сводятся к простому арифметическому решению уравнений (20.1) или (20.2) в зависимости от уклона дна лотка. Затем суммируются расстояния между створами, чем и определяется теоретическая длина кривой СПП.

7. По результатам измерений в лаборатории определяется опытная длина кривой СПП и сопоставляется с теоретической, на основании чего делаются выводы о применимости зависимостей (20.1) и (20.2).

Таблица 27.2. Расчет теоретической кривой СПП

Створ	$h, \text{ м}$	$\Delta h, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$C, \text{ м}^{0.5}/\text{с}$	$Q', \text{ м}^3/\text{с}$	$V', \text{ м}/\text{с}$	Π'_k
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Створ	$1 - \Pi'_{к,ср}$	$z = \frac{Q'}{Q}$	Δz	$\Phi(z)$	$\frac{\Delta}{\Phi(z)}$	[11]×[15]	[13]-[16]	$a = \frac{\Delta h}{\Delta z}$	$\frac{a}{i}$	$l_{1-2, М}$
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Примечание. Таблица приведена для решения уравнения (20.1).

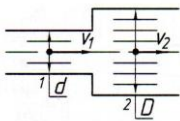
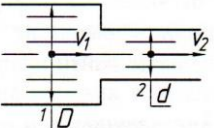
Контрольные вопросы

1. Что за сооружение представляет собой быстроток?
2. Из каких частей он состоит?
3. Как называется лоток быстротока или его транзитная часть?
4. Какая кривая СПП образуется на быстротоке?

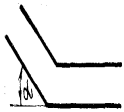

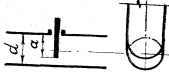
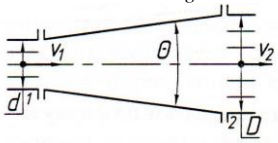
Таблица 1. Значения кинематического коэффициента вязкости ν , C_T (см²/с) пресной воды в зависимости от температуры

t°	ν	t°	ν	t°	ν
1	0,017321	11	0,012740	22	0,009892
2	0,016740	12	0,012396	24	0,009186
3	0,016193	13	0,012067	26	0,008774
4	0,015676	14	0,011756	28	0,008394
5	0,015188	15	0,011433	30	0,008032
6	0,014726	16	0,011177	35	0,007251
7	0,014289	17	0,010888	40	0,006587
8	0,013873	18	0,010617	45	0,006029
9	0,013479	19	0,010356	50	0,005558
10	0,013101	20	0,010105	60	0,004779

Таблица 2. Местные сопротивления

Схема сопротивления	Коэффициент сопротивления						
1	2						
<p>ВНЕЗАПНОЕ РАСШИРЕНИЕ</p> $h_{в.р} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \zeta_{в.р} \frac{V_2^2}{2g}$ 	$\zeta_{в.р} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$						
<p>ВНЕЗАПНОЕ СУЖЕНИЕ</p> $h_{в.с} = \zeta_{в.с} \frac{V_2^2}{2g}$ 	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80
	$\zeta_{в.с}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10

Продолжение табл. 2.

1	2							
<p>КОЛЕНО БЕЗ ЗАКРУГЛЕНИЯ</p> $h_{\text{кол}} = \zeta_{\text{кол}} \frac{V_2^2}{2g}$ 	Угол α°	40	50	60	70	80	90	
	$\zeta_{\text{кол}}$	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10	
	<p>Значения $\zeta_{\text{кол}}$ получены на основании опытов с трубами $d < 50$ мм. При увеличении диаметра значения $\zeta_{\text{кол}}$ уменьшается.</p>							
<p>КРАН</p> $h_{\text{кр}} = \zeta_{\text{кр}} \frac{V_2^2}{2g}$ 	α°	5	10	20	30	40	50	60
	$\zeta_{\text{кр}}$	0,05	0,29	1,56	5,47	17,3	52,6	206
<p>ЗАДВИЖКА</p> $h_{\text{зад}} = \zeta_{\text{зад}} \frac{V_2^2}{2g}$ 	$\frac{a}{d}$	0	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{7}{8}$
	$\zeta_{\text{зад}}$	0,12	0,26	0,81	2,06	5,25	17,0	978
<p>КОНИЧЕСКИЙ ДИФFUЗОР</p> $h_{\text{д}} = \zeta_{\text{д}} \frac{V_2^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{д}} = k_{\text{д}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$ <p>где $k_{\text{д}}$ – безразмерный коэффициент, выражающий долю потерь в диффузоре от потерь при внезапном расширении</p>							
	Θ	7,5	10	15	20	30		
	$k_{\text{д}}$	0,14	0,16	0,27	0,43	0,81		

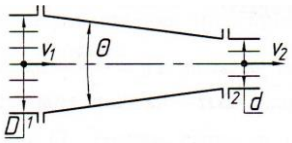
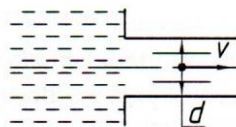
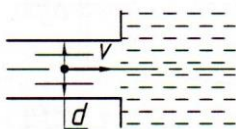
КОНИЧЕСКИЙ КОНФУЗОР $h_{\text{кон}} = \zeta_{\text{кон}} \frac{V_2^2}{2g}$ 	$\frac{d_1}{d_2}$	Угол					
		Θ	10	20	30	40	50
При $\frac{d_1}{d_2} = 1,2$	$\zeta_{\text{кон}}$	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	
При $\frac{d_1}{d_2} = 2,0$	$\zeta_{\text{кон}}$	0,07	0,09	0,12	0,14	0,16	
При $\frac{d_1}{d_2} = 3,0$	$\zeta_{\text{кон}}$	0,8	0,10	0,14	0,17	0,20	
ВХОД В ТРУБУ ИЗ РЕЗЕРВУАРА 	$\zeta_{\text{вх}} = 0,5$						
ВЫХОД ИЗ ТРУБЫ В РЕЗЕРВУАР 	$\zeta_{\text{вых}} = 1,0$						

Таблица 3. Средние значения расходных коэффициентов при истечении через отверстие и насадки (при $Re > 10^4$)

Тип отверстия в тонкой стенке	ϵ	ϕ	μ
Малое отверстие в тонкой стенке	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический насадок	1,0	0,82	0,82
Конический сходящий насадок (угол конусности 12–15°)	0,98	0,96	0,94
Конoidalный насадок	1,0	0,97	0,97

Т а б л и ц а 4. Критическое значение относительного перепада $(z/P_1)_{кр} = f(H/P_1)$ для прямоугольного водослива с тонкой стенкой

m_0	H/P_1								
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,0	1,50	2,0
0,42	0,89	0,84	0,80	0,78	0,76	0,73	0,73	0,76	0,82
0,46	0,88	0,82	0,78	0,76	0,74	0,71	0,70	0,73	0,79
0,48	0,86	0,80	0,76	0,74	0,71	0,68	0,67	0,70	0,78

Т а б л и ц а 5. Коэффициент расхода для незатопленного водослива прямоугольной формы практического профиля (по данным Н. Н. Павловского)

Отношение P/H	Коэффициент заложения граней		Коэффициент расхода		
	напорной m_n	сливной $m_{ш}$	$H/S = 0,5-1,0$	$H/S = 1,01-2,0$	$H/S \geq 2,0$
1,0-2,0	10	0	0,35	0,36	0,38
	0	3	0,35	0,37	0,39
	0	5	0,34	0,35	0,37
	0	10	0,33	0,34	0,35
2,01-3,0	0	1	0,38	0,40	0,42
	0	2	0,36	0,38	0,40
	3	0	0,38	0,40	0,42
	4	0	0,37	0,39	0,41
3,01-5,0	5	0	0,36	0,38	0,40
	0,5	0,5	0,35-0,36	0,38-0,40	0,42-0,43
	1,0	0	0,40	0,42	0,44
	2,0	0	0,39	0,41	0,43

Т а б л и ц а 6. Функции для расчета сжатой и второй сопряженной с ней глубиной в НБ сооружения

$\Phi(\tau_c)$	τ_c	τ_c''				
		$\varphi = 0,80$	0,85	0,90	0,95	1,00
1	2	3	4	5	6	7
0,0044	0,001	0,0501	0,0532	0,0564	0,0696	0,0627
0089	002	0705	0740	0794	0839	0884
0133	003	0861	0916	0971	1026	1081
0177	004	0990	1053	1116	1179	1242
0221	005	1104	1174	1245	1315	1386
0265	006	1206	1283	1360	1438	1535
0309	007	1299	1383	1466	1549	1633
0353	008	1386	1475	1563	1653	1742
0397	009	1467	1541	1636	1750	1844
0,0441	0,010	0,1543	0,1642	0,1742	0,1841	0,1941
0660	015	1871	1993	2114	2236	2357
0877	020	2142	2282	2422	2562	2702
1094	025	2376	2532	2688	2844	3000
1309	030	2584	2754	2924	3095	3265
1523	035	2771	2954	3138	3321	3505
1736	040	2942	3137	3334	3529	3724

Окончание табл. 6

1	21	3	4	5	6	7
1948	045	3100	3306	3513	3720	3927
0,2159	0,050	0,3246	0,3464	0,3681	0,3899	0,4116
2577	060	3511	3748	3985	4222	4459
0,2991	0,070	0,3747	0,4002	0,4256	0,4510	0,4765
3399	080	3959	4229	4500	4700	5041
3804	090	4151	4436	4721	5006	5291
0,4203	0,10	0,4326	0,4625	0,4923	0,5222	0,5521
4987	12	4634	4957	5280	5603	5927
5752	14	4896	5240	5585	5930	6275
6496	15	5120	5484	5847	6211	6576
7220	18	5312	5693	6074	6455	6836
0,7924	0,20	0,5478	0,5873	0,6169	0,6666	0,7062
8608	22	5619	6028	6437	6847	7258
9269	24	5738	6159	6581	7003	7446
9908	26	5838	6270	6702	7135	7569
1,0525	28	5919	6360	6802	7245	7689
1,1120	0,30	0,5984	0,6434	0,6884	0,7335	0,7787
1690	32	6033	6490	6948	7406	7866
2236	34	6068	6530	6994	7460	7926
2758	36	6088	6556	7025	7496	7967
3255	38	6095	6558	7041	7516	7992
3493	39	6094	6568	7043	7520	7998
1,3726	0,40	0,6090	0,6565	0,7042	0,7520	0,8000

Таблица 7. Коэффициент подтопления σ_n для безвакуумного водослива криволинейной формы практического профиля

Δ / H_0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7
σ_n	1,0	0,998	0,996	0,991	0,983	0,972	0,957	0,947	0,933

Окончание табл. 7

Δ / H_0	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
σ_n	0,9–0,8	0,76	0,70	0,59	0,41	0,0

Таблица 8. Значение второй приведенной сопряженной глубины на пороге водослива κ_2 и коэффициента скорости подтопленного водослива с широким порогом

m	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,385
φ_n	0,76; 0,78	0,84	0,90	0,96	0,99	1,0
κ_2	1,0	0,88	0,84	0,81	0,72	0,667

Т а б л и ц а 9. Значения коэффициента подтопления σ_n при среднем значении коэффициента скорости $\varphi_n = 0,9$ подтопленного водослива с широким порогом

$\frac{\Delta}{H_0}$	Коэффициент σ_n при $\varepsilon_{НБ}$								
	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0
0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,78	0,97	1	1	1	1	1	1	1	0,97
0,80	0,95	1	1	1	1	1	1	1	0,95
0,82	0,92	0,99	1	1	1	1	1	0,99	0,92
0,84	0,89	0,97	0,99	1	1	1	0,99	0,97	0,89
0,86	0,85	0,94	0,96	0,99	1	0,99	0,96	0,94	0,85
0,88	0,81	0,90	0,93	0,97	0,96	0,97	0,93	0,90	0,81
0,90	0,75	0,84	0,88	0,92	0,91	0,92	0,88	0,84	0,75
0,92	0,69	0,78	0,82	0,85	0,84	0,85	0,82	0,78	0,69
0,94	0,61	0,70	0,73	0,76	0,75	0,76	0,73	0,70	0,61
0,96	0,51	0,59	0,62	0,65	0,64	0,65	0,62	0,59	0,51
0,98	0,36	0,44	0,46	0,49	0,48	0,49	0,46	0,44	0,36

П р и м е ч а н и е. $\varepsilon_{НБ} = \omega / \Omega_{НБ}$ – относительное сжатие потока в НБ; $\omega = \Delta b$ – площадь живого сечения потока, выходящего с водослива; $\Omega_{НБ}$ – площадь живого сечения потока в нижнем бьефе при бытовой глубине h_b .

Т а б л и ц а 10. Значения коэффициентов вертикального сжатия при истечении из-под затвора для условия плоской задачи

$\Phi(\tau_c)$	$\tau_c = \varepsilon \frac{a}{H_0}$	a / H	ε
0,264	0,062	0,10	0,615
0,388	0,092	0,15	0,618
0,514	0,124	0,20	0,620
0,633	0,156	0,25	0,622
0,750	0,188	0,30	0,625
0,865	0,220	0,35	0,628
0,967	0,252	0,40	0,630
1,060	0,284	0,45	0,638
1,182	0,320	0,50	0,645
1,265	0,365	0,55	0,650
1,363	0,395	0,60	0,660
1,457	0,440	0,65	0,675
1,538	0,482	0,70	0,690
1,611	0,529	0,75	0,705

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ш т е р е н л и х т, Д. В. Гидравлика: учебник / Д. В. Штеренлихт. – М.: Колос, 2005. – 656 с.
2. Ч у г а е в, Р. Р. Гидравлика: учебник / Р. Р. Чугаев. – Изд. 4-е, доп. и пераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
3. Нестеров, М. В. Гидравлика: учеб. пособие / М. В. Нестеров, Л. И. Мельникова, И. М. Нестерова. – Горки: БГСХА, 2016. – 223 с.
4. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – 5-е изд. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.
5. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер [и др.]. – Минск: Выш. шк., 1985. – 382 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Выполнение лабораторных работ.....	4
Лабораторная работа 1. Измерение давления.....	6
Лабораторная работа 2. Исследование относительного покоя жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде.....	12
Лабораторная работа 3. Определение силы гидростатического давления жид- кости на плоскую поверхность.....	16
Лабораторная работа 4. Исследование плавания тел в жидкости.....	19
Лабораторная работа 5. Исследование и графическая иллюстрация уравнения Бернулли.....	24
Лабораторная работа 6. Измерение расходов в напорных трубопроводах.....	29
Лабораторная работа 7. Определение коэффициента расхода водомера	
Вентури.....	35
Лабораторная работа 8. Исследование режимов движения жидкости.....	39
Лабораторная работа 9. Определение коэффициентов местных	
Сопротивлений.....	43
Лабораторная работа 10. Определение гидравлических коэффициентов	
трения.....	47
Лабораторная работа 11. Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки при постоянном напоре.....	61
Лабораторная работа 12. Определение времени истечения через отверстия при переменном напоре и постоянном притоке.....	65
Лабораторная работа 13. Определение времени истечения жидкости через отверстия при переменном напоре без притока.....	68
Лабораторная работа 14. Исследование трубопровода из параллельно соединенных труб.....	70
Лабораторная работа 15. Исследование трубопровода с равномерным путевым расходом.....	73
Лабораторная работа 16. Исследование кольцевой водопроводной сети.....	75
Лабораторная работа 17. Исследование гидравлического удара в трубопроводе.....	79
Лабораторная работа 18. Измерение и распределение осредненных местных продольных скоростей в поперечном сечении открытого потока. Определение коэффициентов Кориолиса и Буссинеска.....	82
Лабораторная работа 19. Исследование коэффициента шероховатости в канале.....	88
Лабораторная работа 20. Формирование свободной поверхности потока при установившемся неравномерном, плавно изменяющемся движении.....	92
Лабораторная работа 21. Исследование гидравлического прыжка в прямоугольном горизонтальном лотке.....	98
Лабораторная работа 22. Гидравлические исследования прямоугольного водослива с острым ребром.....	104
Лабораторная работа 23. Гидравлические исследования водослива практического профиля.....	109
Лабораторная работа 24. Гидравлические исследования водослива с широким порогом.....	114

Лабораторная работа 25. Гидравлические исследования истечения из-под затвора	120
Лабораторная работа 26. Исследование характера сопряжения потока и определение длины крепления русла в нижнем бьефе водослива практического профиля	125
Лабораторная работа 27. Исследование свободной поверхности потока на быстротоке.....	131
Приложение.....	138
Библиографический список	144

Учебное издание

Мельникова Людмила Ивановна

ГИДРАВЛИКА

ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Редактор *С. Н. Кириленко*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 23.09.2020. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 8,60. Уч.-изд. л. 8,34.
Тираж 60 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.