

Г.Д. Слабожанин

ГИДРАВЛИКА

ПРАКТИКУМ (НА КОМПЛЕКСЕ «КАПЕЛЬКА»)

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

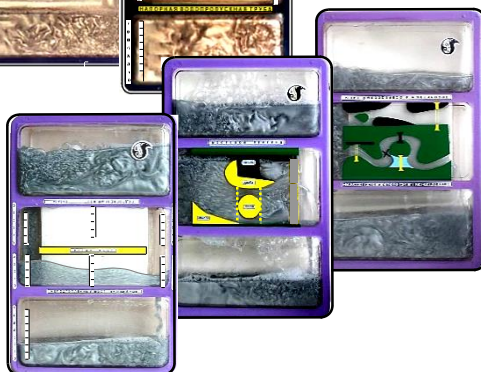
«Капелька-1»



«Капелька-2»



«Капелька-3»



УЧЕБНЫЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «КАПЕЛЬКА»

- разработан в Томском архитектурно-строительном университете
- включен Госкомобразованием в перечень типового учебного оборудования и рекомендован к выпуску
- используется уже в 1000 учебных заведениях России и за рубежом
- защищен патентами РФ и занимал 1 место на Всесоюзном конкурсе



2 **Доцент ТГАСУ, к.т.н., лауреат I премии Гособразования СССР за создание учебной техники Г.Д. Слабожанин представляет комплекс «КАПЕЛЬКА» Международной комиссии по аккредитации учебных заведений**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Серия «Учебники ТГАСУ»

Г.Д. Слабожанин

ГИДРАВЛИКА
ПРАКТИКУМ
(НА КОМПЛЕКСЕ «КАПЕЛЬКА»)

*Рекомендован Учебно-методическим советом ТГАСУ
в качестве практикума для подготовки бакалавров
по направлению 08.03.01 «Строительство»
(профиль «Автомобильные дороги»)*

Томск
Издательство ТГАСУ
2019

УДК 532(076.5)
ББК 30.123я73-5

Серия «Учебники ТГАСУ» основана в 2013 году

Слабожанин, Г.Д. Гидравлика: практикум (на комплексе «Капелька») [Текст] / Г.Д. Слабожанин. – Томск : С47 Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2019. – 144 с.
ISBN 978-5-93057-808-9

В практикуме приводятся основные теоретические сведения, описание содержания и порядка выполнения учебных демонстраций и лабораторных работ по общей гидравлике, гидравлике открытых русел и мостовой гидравлике на учебном комплексе «Капелька», состоящем из трех портативных лабораторий «Капелька-1, 2, 3».

Практикум рекомендован Учебно-методическим советом ТГАСУ. Предназначен для подготовки бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» (профиль «Автомобильные дороги»). Практикум может быть полезен и для студентов вузов технологических и машиностроительных специальностей, а также для учащихся техникумов и колледжей.

УДК 532(076.5)
ББК 30.123я73-5

Рецензенты:

Г.Г. Медведев, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая и промышленная теплотехника» ТПУ;

В.К. Махлаев, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ТГАСУ.

ISBN 978-5-93057-808-9

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2019
© Слабожанин Г.Д., 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пособие предназначено для выполнения учебных экспериментов по гидравлике на комплексе «Капелька», состоящем из трех портативных лабораторий «Капелька-1, 2, 3». Они разработаны в Томском государственном архитектурно-строительном университете под руководством автора. Их используют около 1000 учебных заведений в России и за рубежом. Пособие соответствует примерной программе Минобразования РФ по курсу «Гидравлика (механика жидкости и газа)» и предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Строительство», но может быть полезно для студентов любых специальностей высших и средних учебных заведений.

В разделах 1, 2 и 3 дано описание демонстрационных и учебных лабораторных работ, соответственно, на лабораториях «Капелька-1, 2, 3». В каждой работе содержатся теоретические сведения, описание учебных устройств и потоков жидкости в них, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Автор выражает благодарность профессорам: Л.П. Иванову, А.А. Шейпаку (г. Москва), К.Г. Асатуру, А.Д. Гиргидову, А.М. Курганову, Н.Н. Лапшеву, Б.С. Маховикову, С.С. Смородину (г. С.-Петербург), В.В. Земляному (г. Владивосток), А.Д. Тяну (г. Усть-Каменогорск), доценту В.И. Мелькову (г. Томск) за полезные советы и замечания, высказанные в процессе создания лабораторий и при написании первых вариантов пособия.

Автор глубоко признателен сотрудникам ТГАСУ, принявшим участие в разработке лабораторий: В.Д. Слабожанину, Д.Г. Слабожанину, А.И. Соболеву, К.Н. Ребенкову, Н.А. Калининскому, А.В. Лебединцу, В.А. Вологоцкому, В.А. Носикову и др.

Замечания и предложения по пособию и по лабораториям «Капелька-1, 2, 3» автор с благодарностью примет по e-mail: drop-let@yandex.ru или по адресу: 634003, пл. Соляная, 2, ТГАСУ, лаборатория гидравлики, ауд. 013₂, тел. (3822) 65-34-78.

ВВЕДЕНИЕ

Вся история развития гидравлики от глубокой древности до наших дней тесно связана с экспериментальными исследованиями. Известные гидравлические явления (ламинарный и турбулентный режимы течения, образование вихрей при обтекании тел, кавитация жидкости и др.) были открыты опытным путем. Проведение экспериментов всегда было востребовано практикой. Их результаты требовались для создания гидравлических устройств (прессов, водяных колес, насосов) и гидротехнических сооружений (каналов, водосливов, мостов). Поэтому в конце XIX в. в России и за рубежом начали создавать специальные гидравлические лаборатории, в которых экспериментально исследовались целые комплексы устройств и сооружений. В настоящее время важность, объемы и уровни таких исследований возрастают.

Эксперимент всегда лежит в основе теоретических методов исследований течения жидкостей, так как предварительно опытным путем устанавливаются свойства реальных гидравлических явлений для создания их схемы и составления дифференциальных уравнений. Затем результаты теоретических решений проверяются и корректируются экспериментальными исследованиями, делая их пригодными для инженерных расчетов.

Часто течение жидкости вообще не поддается теоретической схематизации ввиду сложности явлений. И тогда значение эксперимента особенно велико, так как задача решается только опытным путем, например при определении потерь напора в вентилях, задвижках, при получении характеристик насосов.

Исходя из вышеизложенного, *овладение методиками и навыками постановки экспериментов и обработки полученных данных приобретает важное значение.* Поэтому учебный гидравлический эксперимент должен являться неотъемлемой частью курса гидравлики. Удачное сочетание теоретического материала и эксперимента дает наилучший результат обучения.

Методические принципы проведения учебного эксперимента по гидравлике определяются задачами, которые стоят перед будущими специалистами. Учебный эксперимент должен сочетать демонстрационные опыты и лабораторные работы.

Демонстрационные опыты позволяют показать отдельные явления в «чистом виде», вскрыть их физическую сущность и закономерности (например, при расширении потока его скорость уменьшается, а давление повышается), продемонстрировать принципы действия приборов и работу сооружений. Такие опыты наглядны, доступны для понимания, вызывают повышенный интерес к предмету, формируют накопленные ранее знания и подготавливают студентов к лабораторным работам.

Лабораторные работы закрепляют теоретические знания и позволяют приобрести навыки по самостоятельному проведению гидравлических экспериментов и обработке их результатов.

Учебная техника для проведения гидравлического эксперимента должна быть конструктивно проста, многофункциональна, удобна в эксплуатации и способна обеспечить максимальную наглядность изучаемого явления и быстрое проведение опытов. Особое внимание студентов должно быть обращено на изучение физической сущности гидравлических процессов. Поэтому учебные устройства и отдельные части установок должны быть прозрачными.

С учебно-методической точки зрения, набор моделей не должен воспроизводить полностью в миниатюре натуральные сооружения (водосливы, трубы, мосты). Более целесообразным является ознакомление студентов с работой упрощенных моделей отдельных сооружений и проведение на них экспериментов.

В наибольшей степени указанным требованиям отвечают учебные мини-лаборатории «Капелька-1, 2, 3». Они включают 10 прозрачных устройств в виде планшетов с жидкостями, которые работают по принципу песочных часов. Их достаточно перевернуть для демонстрации изучаемого явления, принципа действия прибора или режима работы сооружения и выполнения замеров.

Для повышения эффективности обучения эти мини-лаборатории целесообразно использовать совместно с традиционными стендами, которые имеют совершенное аппаратное оформление, большой диапазон варьирования параметров течения и меньшее нарушение подобия с натуральными объектами.

Порядок выполнения лабораторных работ. Перед каждым лабораторным занятием студент должен изучить соответствующий материал по лекциям, учебникам и настоящему пособию и заготовить бланк отчета, в который включены: цель работы, схема и описание учебного устройства или прибора, порядок выполнения работы, таблица измерений и вычислений, краткие ответы на контрольные вопросы.

В начале занятия готовность каждого студента к проведению лабораторной работы проверяется путем опроса с использованием общих и частных контрольных вопросов.

Список общих вопросов:

1. Цель лабораторной работы и пути ее достижения.
2. Схема и работа опытной установки или устройства.
3. Возможность замены используемого прибора другим.
4. Порядок выполнения работы.
5. Правила заполнения журнала опытных данных.
6. Формулы для обработки результатов измерений.
7. Смысл и размерность используемых величин.

Список частных контрольных вопросов, относящихся к конкретной лабораторной работе, приведен в конце описания каждой лабораторной работы.

Выполнение и защита работ проводится группами, состоящими из 2–3 студентов.

При сдаче работы студент должен дать критическую оценку полученных результатов, для чего в выводах указываются величина и причины отклонения результатов от известных. Дается ответ на вопрос: Подтверждаются ли известные инженерные зависимости и справочные значения коэффициентов?

І. РАБОТЫ ПО ОБЩЕЙ ГИДРАВЛИКЕ НА ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-1»

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-1»

Комплекс «Капелька» разработан в Томском архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) и предназначен для проведения наглядных демонстраций и лабораторных работ по гидравлике. Он содержит 10 миниатюрных устройств, которые сгруппированы в три портативные лаборатории: «Капелька-1», «Капелька-2» и «Капелька-3».

Устройства выполнены в виде плоских планшетов из прозрачной пластмассы (размеры 360×240×45 мм). Они заполнены водой с красителями или с мечеными частицами для обеспечения максимальной наглядности изучаемых явлений (рисунок).



Общий вид лаборатории «Капелька-1»

По сравнению с лабораторными стендами, они имеют следующие отличия: у них нет двигателей, насосов, вентилях; не требуют подвода воды и электроэнергии; удобны для лекционных демонстраций; отвечают эргономическим параметрам при работе сидя; в любой момент и в любой аудитории готовы к работе – для приведения устройств в действие достаточно их перевернуть или наклонить; экономят лабораторные площади и имеют низкую стоимость. Конструкции устройств защищены патентами РФ на изобретения.

Комплекс «Капелька» занимал 1 место на Всесоюзном конкурсе учебной техники на ВДНХ (Москва, 1990 г.), одобрен Международной комиссией по аккредитации учебных заведений в 2002 г. и признан *«Лучшим экспонатом»* в конкурсах *«Сибирские Афины»* (Томск, 2003, 2005 г.).

Научно-методическим советом при Госкомобразовании СССР в 1991 г. комплекс «Капелька» включен в перечень типового учебно-лабораторного оборудования по курсу «Гидравлика (механика жидкости и газа)» для вузов и рекомендован к серийному выпуску. В настоящее время его используют уже почти 1000 учебных заведений России и за рубежом.

Лаборатория «Капелька-1» предназначена для изучения общей гидравлики. Она состоит из 4 портативных демонстрационно-лабораторных устройств (рисунок).

Устройство № 1 позволяет демонстрировать работу сразу нескольких различных приборов для исследования свойств жидкости, быстро измерить основные физико-механические параметры жидкостей и сравнить их значения со справочными.

Устройство № 2 содержит элементы головоломки и помогает быстро приобрести навыки по измерению гидростатического давления на дне опытного резервуара жидкостными приборами. Давление изменяется наклоном или поворотом устройства.

Устройство № 3 предназначено для изучения видов, режимов и структуры потоков жидкости. Оно работает по принципу песочных часов. Попеременно вращая устройство в вертикальной плоскости на 90° , можно наблюдать ламинарный и турбулентный режимы течения, обтекание перегородки, сужение и расширение потока при истечении через щель.

Устройство № 4 позволяет провести иллюстрацию уравнения Бернулли и определить потери напора в опытных каналах устройств жидкостными пьезометрами.

На лаборатории «Капелька-1» выполняется 9 демонстрационно-лабораторных работ. Содержание и порядок их выполнения представлены на сайте: <http://drop-let.yandex.ru>.

Практическая работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Освоение техники измерения плотности, температурного расширения, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей.

1.1. Общие сведения

Жидкостями называют физические тела, обладающие текучестью, т. е. способностью течь под действием весьма малых сил. Процесс течения представляет собой относительное скольжение слоев жидкости (деформацию сдвига). Жидкости разделяют на два класса: *капельные*, приобретающие при малых объемах форму капли (вода, нефть), и *газообразные* (воздух, газы).

Основными характеристиками жидкости являются плотность, сжимаемость, температурное расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

Плотность ρ – отношение массы m жидкости к её объему W , а удельный вес γ – вес G единицы объема жидкости:

$$\rho = m/W; \quad \gamma = G/W = \rho g ,$$

где g – ускорение свободного падения.

Сжимаемость – свойство жидкости уменьшать объем под действием давления. Она оценивается *коэффициентом сжимаемости* β_p , показывающим относительное уменьшение объема жидкости W при повышении давления p на единицу:

$$\beta_p = -(\Delta W/W)/\Delta p.$$

Величина, обратная β_p , называется *модулем объемной упругости* жидкости $E_{\text{ж}} = 1/\beta_p$.

Температурное расширение – свойство жидкости изменять объем при нагревании. Характеризуется *коэффициентом температурного расширения* β_T , равным относительному приращению объема $\Delta W/W$ с изменением температуры T на один градус при постоянном давлении: $\beta_T = (\Delta W/W)/\Delta T$. Как правило, при нагревании объем жидкости увеличивается.

Вязкость – свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев. Ее оценивают *динамическим коэффициентом вязкости* μ , который измеряется в паскаль-секундах (Па·с) и равен касательному напряжению между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения численно равна толщине слоя. *Кинематический коэффициент вязкости* ν определяют из формулы $\nu = \mu/\rho$ и измеряют в квадратных метрах на секунду ($\text{м}^2/\text{с}$) или стоксами ($1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$). Коэффициенты определяются видом жидкости, не зависят от скорости течения и существенно уменьшаются с возрастанием температуры.

Поверхностное натяжение – свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул – характеризуется *коэффициентом поверхностного натяжения* σ , равным силе на единицу длины контура свободной поверхности.

Свойства жидкости проявляются следующим образом. Значения ρ , β_p , β_T , ν и σ для жидкостей при 20 °С и атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) указаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Жидкость	ρ , кг/м ³	β_p , МПа ⁻¹	β_T , °С ⁻¹	ν , м ² /с	σ , Н/м
Вода пресная	998	0,00049	0,00015	0,00000101	0,073
Спирт этиловый	790	0,00078	0,00110	0,00000152	0,023
Масло:					
моторное М-10	900	0,00060	0,00064	0,00080000	0,025
индустриальное 20	900	0,00072	0,00073	0,00011000	0,025
трансформаторное	890	0,00060	0,00070	0,00003000	0,025
АМГ-10	850	0,00076	0,00083	0,00002000	0,025

1.2. Описание устройства № 1

Устройство № 1 предназначено для изучения физических свойств жидкости и содержит 5 приборов, выполненных в общем корпусе (рис. 1.1). На корпусе указаны названия и параметры приборов, необходимые для обработки опытных данных.

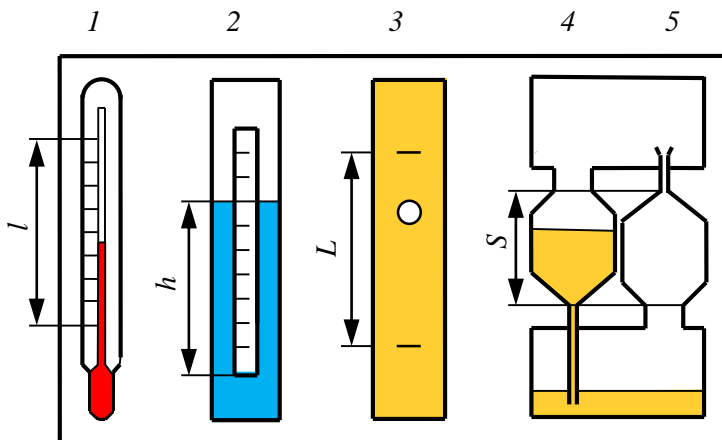


Рис. 1.1. Схема устройства № 1:

1 – термометр; 2 – ареометр; 3 – вискозиметр Стокса; 4 – капиллярный вискозиметр; 5 – сталагмометр

Приборы 3–5 действуют при перевертывании устройства (повороте его в вертикальной плоскости на 180°). Термометр 1 фиксирует температуру окружающей среды и, следовательно, температуру жидкостей во всех устройствах лабораторий.

1.3. Определение коэффициента температурного расширения термометрической жидкости

Термометр 1 имеет стеклянный баллон, капилляр, заполненные термометрической жидкостью, и шкалу. В верхней части капилляра находится воздух. Принцип действия термометра основан

на температурном расширении жидкостей. Варьирование температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре, который указывает значение температуры.

Коэффициент температурного расширения термометрической жидкости определяется в следующем порядке на основе мысленного эксперимента. Предполагается, что температура окружающей среды возросла от нижнего (нулевого) до верхнего (максимального) значения шкалы термометра и уровень жидкости в капилляре повысился на величину l (рис. 1.1).

1. Подсчитать число градусных делений ΔT в шкале термометра и измерить расстояние l между крайними штрихами шкалы.

2. Вычислить предполагаемое приращение объема термометрической жидкости:

$$\Delta W = \pi r^2 l,$$

где r – радиус капилляра термометра. Его значение указано на устройстве № 1.

3. С учетом начального (при 0°C) объема термометрической жидкости W в баллоне (указан на корпусе устройства) найти значение коэффициента температурного расширения $\beta_T = \Delta W / (W \Delta T)$ и сравнить его со справочным значением β_T^* (см. табл. 1.1). Значения используемых и полученных величин занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Вид жидкости	r , см	W , см ³	ΔT , °C	l , см	ΔW , см ³	β_T , °C ⁻¹	β_T^* , °C ⁻¹
Спирт							

1.4. Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 предназначен для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он представляет собой пустотелый

цилиндр с миллиметровой шкалой и грузом в нижней части. Благодаря грузу ареометр плавает в исследуемой жидкости в вертикальном положении. Глубина погружения ареометра является мерой плотности жидкости и считывается со шкалы по верхнему краю мениска жидкости вокруг ареометра. В обычных ареометрах шкала отградуирована сразу по плотности.

В ходе работы выполнить следующие операции.

1. Измерить глубину погружения h ареометра по положению верхнего края мениска жидкости вокруг ареометра на его миллиметровой шкале.

2. Вычислить плотность жидкости

$$\rho = 4m/(\pi d^2 h),$$

где m и d – масса и диаметр ареометра (указаны на корпусе устройства). Эта формула получена путем приравнивания силы тяжести ареометра $G = mg$ и выталкивающей (Архимедовой) силы $P_A = \rho g W$, где объем погруженной части ареометра $W = (\pi d^2/4)h$.

3. Сравнить опытное значение плотности ρ со справочным значением ρ^* для заданной жидкости (см. табл. 1.1). Значения используемых и полученных величин свести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Вид жидкости	m , г	d , см	h , см	ρ , г/см ³	ρ^* , г/см ³
Вода					

1.5. Определение вязкости вискозиметром Стокса

Вискозиметр Стокса 3 достаточно прост, содержит цилиндрическую емкость, заполненную исследуемой жидкостью, и шарик. Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в ней следующим образом.

1. Повернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и измерить с использованием секундомера время t прохождения шариком расстояния L между двумя метками в приборе (см. рис. 1.1). Шарик должен падать по оси емкости без соприкосновения со стенками. Опыт выполнить три раза, а затем определить среднеарифметическое значение времени t .

2. Вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости:

$$\nu = gd^2t(\rho_{\text{ш}}/\rho - 1)/[18l + 43,2l(d/D)],$$

где g – ускорение свободного падения; d, D – диаметры шарика и цилиндрической емкости; $\rho, \rho_{\text{ш}}$ – плотности жидкости и материала шарика (см. на корпусе устройства).

3. Сравнить опытное значение коэффициента вязкости ν с табличным значением ν^* (см. табл. 1.1). Значения используемых и полученных величин свести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Вид жидкости	ρ , кг/м ³	t , с	l , м	d , м	D , м	$\rho_{\text{ш}}$, кг/м ³	ν , м ² /с	ν^* , м ² /с
Масло М-10					0,02			

Примечание. В табл. 1.1 приведены значения коэффициента вязкости жидкостей при температуре 20 °С. Опытные значения при другой температуре могут существенно отличаться от табличных ввиду сильной зависимости его от температуры. Например, для масла М-10 при 20 °С $\nu = 0,00080$ м²/с, а при 25 °С – $\nu = 0,00050$ м²/с

1.6. Измерение вязкости капиллярным вискозиметром

Капиллярный вискозиметр 4 включает емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения жидкости из емкости через капилляр в следующем порядке.

1. Перевернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости и определить время t истечения объема жидкости между метками (высотой S) через капилляр и температуру T .

2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости $\nu = Mt$ (M – постоянная прибора) и сравнить его с табличным значением ν^* (см. табл. 1.1). Данные свести в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Вид жидкости	$M, \text{ м}^2/\text{с}^2$	$t, \text{ с}$	$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\nu^*, \text{ м}^2/\text{с}$
Масло М-10					

1.7. Измерение поверхностного натяжения жидкости сталагмометром

Сталагмометр 5 служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель и содержит емкость с капилляром. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капли от капилляра равна ее весу (силе тяжести), и поэтому определяется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости с заданным объемом.

1. Перевернуть устройство № 1 и подсчитать число капель, оторвавшихся от капилляра при снижении уровня жидкости между двумя метками, т. е. полученных из объема высотой S . Опыт повторить три раза и вычислить среднее арифметическое значение числа капель n .

2. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = Kr/n$ (K – постоянная сталагмометра, указана на корпусе устройства № 1) и сравнить его с табличным значением этого коэффициента σ^* для испытуемой жидкости (см. табл. 1.1). Исходные и полученные данные свести в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Вид жидкости	$K, \text{ м}^3/\text{с}^2$	$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	n	$\sigma, \text{ Н}/\text{м}$	$\sigma^*, \text{ Н}/\text{м}$
Масло М-10					

Контрольные вопросы

1. Перечислите методы измерения плотности жидкости и поясните принцип действия известных плотномеров.
2. Что называют сжимаемостью? Чем она характеризуется?
3. Как определяется коэффициент температурного расширения?
4. Какие величины измеряют при определении коэффициентов вязкости вискозиметрами различных типов?
5. Что подразумевают под термином «вязкость жидкости»? Как связаны динамический и кинематический коэффициенты вязкости?
6. Что такое поверхностное натяжение жидкости? В каких единицах она измеряется? Каким прибором? Как он устроен?

Практическая работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы. Изучение устройства и принципа действия жидкостных приборов для измерения давления.

2.1. Общие сведения

Гидростатическим давлением называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости, т. е. силу, действующую на единицу площади поверхности.

Единицы измерения давления. За единицу измерения давления в системе единиц (СИ) принят *паскаль* ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$), что соответствует давлению столба воды высотой всего 0,1 мм. Поэтому на практике чаще применяются укрупненные единицы: килопаскаль ($1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$) и мегапаскаль ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$). Продолжает применяться и *техническая атмосфера* (*ат*): $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа}$.

Величина давления p может выражаться также *высотой столба жидкости* $h = p/\gamma$, где γ – удельный вес жидкости. Например, давление в 1 ат создается слоем воды высотой 10 м или слоем ртути ($\rho = 13600 \text{ кг}/\text{м}^3$) высотой 735 мм рт. ст.

Следует помнить, что *физическая атмосфера* (атм) создается столбом воды высотой 10,33 м или столбом ртути высотой 760 мм и равна $1 \text{ атм} = 1,033 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 101\,325 \text{ Па}$.

Виды давления. Различают абсолютное, атмосферное, манометрическое и вакуумметрическое давления.

Абсолютное давление отсчитывается от абсолютного вакуума (от абсолютного нуля) и определяется в любой точке покоящейся жидкости по *основному уравнению гидростатики*:

$$p = p_0 + \gamma h,$$

где p_0 – внешнее давление, т. е. абсолютное давление на свободной поверхности жидкости; γ – удельный вес жидкости; $\gamma = \rho g$; h – глубина погружения точки под свободной поверхностью; γh – весовое давление столба жидкости над точкой.

За начало (нуль) отсчета может быть принято и *атмосферное давление* p_a , которое создается силой тяжести воздуха атмосферы. Тогда, если абсолютное давление больше атмосферного ($p > p_a$), то его избыток над атмосферным называют *манометрическим* (или избыточным) *давлением*:

$$p_m = p - p_a.$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного ($p < p_a$), то недостаток абсолютного давления до атмосферного называют *вакуумметрическим давлением* (или вакуумом):

$$p_v = p_a - p.$$

Отсюда легко установить пределы изменения каждого вида давлений:

$$p = 0 \dots \infty; \quad p_m = 0 \dots \infty; \quad p_v = 0-1 \text{ атм, или } 10,33 \text{ м вод. ст.}$$

Связь различных видов давления между собой и с высотами столбов жидкости можно рассмотреть на комбинации из двух сосудов с жидкостью (рис. 2.1, а). Свободная поверхность жидкости в нижнем сосуде находится под атмосферным давлением ($p_0 = p_a$). Поэтому, в соответствии с основным уравнением гидростатики, абсолютное давление в точке С равно:

$$p_c = p_a + \gamma h,$$

т. е. больше атмосферного ($p_c > p_a$). Тогда величина γh представляет собой манометрическое давление (рис. 2.1, б):

$$\gamma h = p_c - p_a = p_m.$$

Выделим в верхнем сосуде точку А, находящуюся на уровне свободной поверхности жидкости нижнего сосуда. В этом случае

давление в этой точке равно атмосферному ($p_A = p_a$) и выражается с учетом поверхностного абсолютного давления p_D в верхнем сосуде по основному уравнению гидростатики:

$$p_A = p_a = p_D + \gamma h_B.$$

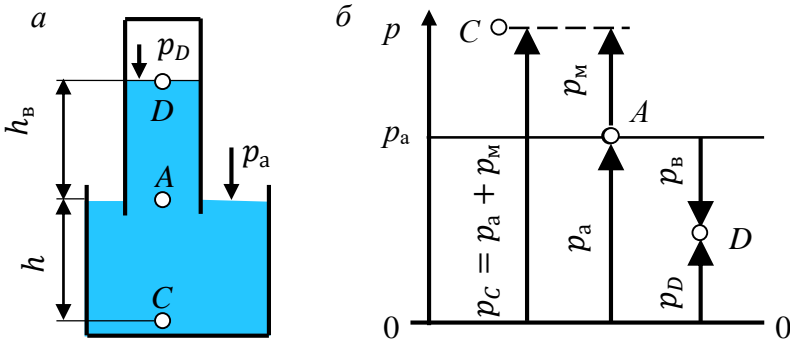


Рис. 2.1. Схема сосудов (а) и связь видов давления (б)

Отсюда видно, что абсолютное давление в точке D меньше атмосферного ($p_D < p_a$). Поэтому величина γh_B представляет собой (вакуум) вакуумметрическое давление (рис. 2.1, б):

$$\gamma h_B = p_a - p_D = p_B.$$

В рассмотренных случаях величину h называют манометрической высотой, а h_B – вакуумметрической.

Виды приборов для измерения давления. Приборы для измерения атмосферного давления называются *барометрами*, манометрического – *манометрами*, вакуума – *вакуумметрами*. По принципу действия приборы подразделяются на жидкостные, механические и электрические.

Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми. Их действие основано на принципе уравнивания измеряемого давления p силой тяжести столба жидкости высотой h

в приборе: $p = \gamma h$. Поэтому величина давления может быть выражена высотой столба жидкости (мм рт. ст., м вод. ст.). Жидкостные приборы имеют простую конструкцию и высокую точность, однако они удобны только при измерении небольших давлений.

В *механических приборах* давление вызывает деформацию чувствительного элемента (трубка, мембрана), которая специальными механизмами передается на указатель. Эти приборы компактны и имеют большой диапазон измеряемых давлений.

В *электрических приборах* воспринимаемое чувствительным элементом давление преобразуется в электрический сигнал. Сигнал регистрируется показывающим (вольтметр, амперметр) или пишущим приборами. В последнем случае можно фиксировать давление при быстропотекающих процессах.

2.2. Жидкостные приборы для измерения давления

Манометры могут быть выполнены в виде *открытого пьезометра* (от греческих слов «давление» и «мера», «измеряю»). Это вертикальная прозрачная трубка *1* (рис. 2.2) диаметром более 5 мм (для исключения ошибок от капиллярного поднятия) со шкалой, отградуированной в единицах длины. Верхний конец трубки открыт, а нижний подсоединяется к резервуару с жидкостью в точке, где измеряется давление. Принцип действия пьезометра основан на уравнивании манометрического давления p_m в точке *C* давлением столба той же жидкости, что и в резервуаре:

$$p_m = \gamma h_m,$$

где h_m – высота столба жидкости в пьезометре, называемая *пьезометрической* или *манометрической высотой* и являющаяся мерой давления. Для измерения манометрического давления служат и двухтрубные пьезометры *4*.

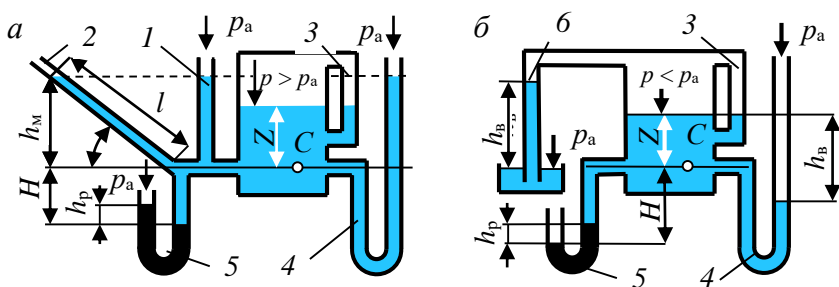


Рис. 2.2. Жидкостные манометры (а) и вакуумметры (б)

Отсчет по пьезометру обычно делают с точностью около 1 мм по нижней поверхности вогнутого мениска (например, для воды) или по верхней поверхности выпуклого мениска (в случае использования ртути). Для повышения точности отсчета до 0,05 мм используют шкалы с нониусом и оптическим устройством. При измерении незначительных давлений с повышенной точностью используют и *микроманометры* 2, представляющие собой наклонную пьезометрическую трубку. Видно, что точность повышается за счет отсчета длины l вместо отсчета малой высоты h_m и увеличивается с уменьшением угла α .

Описанные пьезометры чувствительны и точны, имеют один отсчет, однако они удобны только при измерении небольших давлений (до 0,2 ат). При значительных давлениях трубка должна быть чрезмерно длинной, что осложняет их применение.

Для измерения значительных манометрических давлений (до 2 ат) используют *двухтрубные (U-образные) пьезометры* 5 (рис. 2.2), которые заполняются жидкостью с большей плотностью (обычно ртутью), чем плотность жидкости, в которой измеряется давление. Под действием давления в точке C в сосуде уровень ртути в правом колене пьезометра понижается, а в левом – повышается. При этом манометрическое давление в точке C составляет:

$$p_m = \gamma_p h_p - \gamma H,$$

а абсолютное давление в сосуде над свободной поверхностью

$$p = p_a + p_m - \gamma z,$$

где z – глубина погружения точки C под свободной поверхностью в сосуде; определяется с использованием уровнемера 3 (рис. 2.2).

Вакуумметры измеряют вакуумметрическое давление (вакуум) и могут быть выполнены в виде *обратного пьезометра* $б$ (рис. 2.2, $б$). Верхний конец пьезометра соединяется с сосудом, находящимся под вакуумом, а нижний – опускается в рабочую жидкость, свободная поверхность которой находится под атмосферным давлением. Так как давление в сосуде меньше атмосферного, жидкость в трубке под действием атмосферы поднимается на некоторую высоту, называемую вакуумметрической высотой h_v . Тогда вакуумметрическое давление $p_v = \gamma h_v$.

Эта формула справедлива и при выполнении вакуумметра в виде U -образной трубки 4 (рис. 2.2, $б$). При большом вакууме в сосуде U -образная трубка 5 заполняется ртутью.

Мановакуумметры могут измерять как манометрическое, так и вакуумметрическое давление. Примерами таких приборов являются U -образные трубки 4 и 5 (рис. 2.2, $а, б$).

Дифманометры применяют для измерения разности (перепада) давлений в двух точках, например на участке трубы с движущейся жидкостью. Здесь, как и раньше, перепад давлений Δp определяется разностью уровней ртути в коленях U -образной трубки 1 (рис. 2.3, $а$):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\gamma_p - \gamma)h_p.$$

Для регистрации малых перепадов давления применяют перевернутую U -образную трубку 2 с воздухом в верхней ее части. Перепад давлений определяется по разности уровней жидкости, протекающей в трубопроводе: $\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma \Delta h$. Для повышения точности замеров верхнюю часть трубки иногда заполняют легкой жидкостью (маслом или керосином).

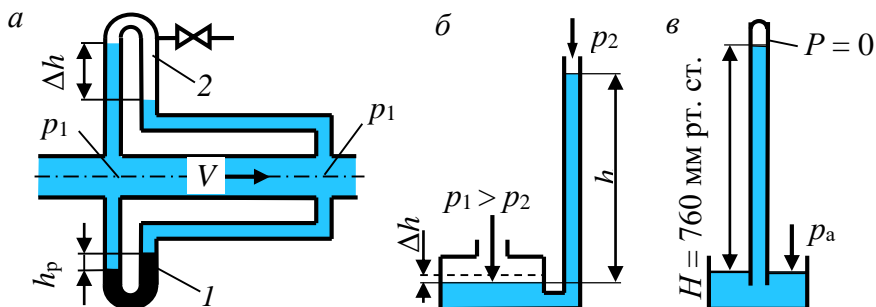


Рис. 2.3. Дифманометр (а) и чашечные приборы (б, в)

Для измерения разности давлений можно использовать *чашечные приборы*. Как и у приборов с U-образной трубкой, их действие основано на принципе сообщающихся сосудов, одним из которых является вертикальная прозрачная трубка со шкалой, а другим – резервуар (чашка) с рабочей жидкостью, к которому подводится большее давление (рис. 2.3, б). При измерениях делается только один отсчет с целью определения высоты столба жидкости h в трубке, т. к. вследствие значительной разности площадей трубки и резервуара величиной понижения уровня жидкости в резервуаре можно пренебречь.

Барометр предназначен для определения абсолютного давления атмосферы и содержит сообщающуюся с атмосферой чашу с рабочей жидкостью (обычно с ртутью) и опущенный в нее *закрытый пьезометр*. Его верхний конец запаян и из него откачан воздух, где абсолютное давление практически равно нулю (рис. 2.3, в). Изменение атмосферного давления p_a приводит к соответствующему изменению высоты столба жидкости H в трубке, являющейся мерой атмосферного давления:

$$p_a = \gamma_p H.$$

Таким прибором впервые было измерено атмосферное давление итальянским ученым Э. Торричелли в 1642 г.



Рис. 2.4. Пружинный манометр

Преимуществами жидкостных приборов являются простота конструкции и высокая точность, однако они удобны только при измерении небольших давлений. Для измерения высокого давления обычно применяют пружинные манометры. В них измеряемое давление передается в изогнутую в виде серпа латунную трубку 1 эллиптического поперечного сечения и частично распрямляет ее (рис. 2.4). С помощью зубчатой передачи 2 деформация трубки преобразуется в поворот стрелки 3, которая указывает величину измеряемого давления.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидростатическое давление? Как оно определяется?
2. Каково соотношение между единицами давления Па и ат?
3. Напишите основное уравнение гидростатики. Поясните, что понимают под терминами: «внешнее давление» и «весовое давление».
4. Как связаны между собой различные виды давления?
5. Назовите жидкостные приборы для измерения гидростатического давления. Поясните принцип их действия.
6. Что такое пьезометрическая и вакуумметрическая высота?

Практическая работа № 3 ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТНЫМИ ПРИБОРАМИ

Цель работы. Приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами.

3.1. Общие сведения

В работе проводятся измерения давлений в опытном резервуаре с жидкостью разными жидкостными приборами. А затем по основному уравнению гидростатики вычисляются абсолютные давления в заданных точках и сравниваются результаты, полученные через показания разных приборов.

3.2. Описание устройства № 2

Устройство № 2 выполнено прозрачным и имеет полость 1, в которой всегда сохраняется атмосферное давление, и резервуар 2, частично заполненный водой (рис. 3.1, а). Для измерения давления и уровня жидкости в резервуаре 2 служат жидкостные приборы 3, 4 и 5. Они представляют собой прозрачные вертикальные каналы со шкалами, размеченными в единицах длины.

Однотрубный манометр (пьезометр) 3 сообщается верхним концом с атмосферой, а нижним – с опытном резервуаром 2. Им определяется манометрическое давление $p_m = \gamma h_{\text{п}}$ на дне резервуара через пьезометрическую высоту $h_{\text{п}}$.

Уровнемер 4 соединен обоими концами с резервуаром и служит для измерения уровня жидкости H в нем.

Мановакуумметр 5 представляет собой U-образный канал, частично заполненный жидкостью. Левым коленом он подключен к резервуару 2, а правым – к полости 1 и предназначен для

определения манометрического $p_m = \gamma h_m$ (рис. 3.1, а) или вакуумметрического $p_v = \gamma h_v$ (рис. 3.1, б) давлений над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2. Давление в резервуаре можно изменять путем наклона устройства.

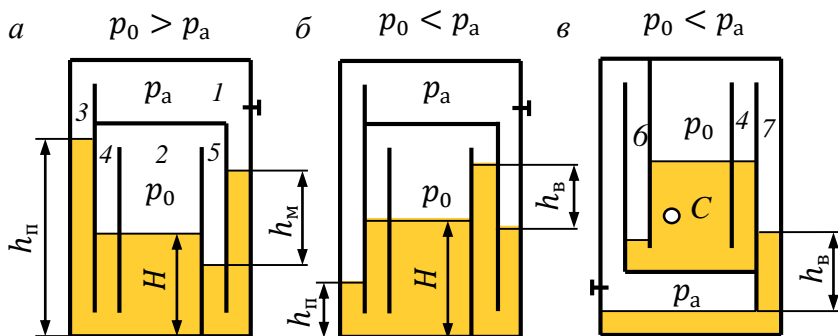


Рис. 3.1. Схема устройства № 2:

1 – полость с атмосферным давлением; 2 – опытный резервуар; 3 – пьезометр; 4 – уровнемер; 5 – мановакуумметр; 6 – пьезометр; 7 – вакуумметр

При повороте устройства в вертикальной плоскости на 180° против часовой стрелки (рис. 3.1, в) канал 4 остается уровнемером, колено мановакуумметра 5 преобразуется в пьезометр 6, а пьезометр 3 – в вакуумметр (обратный пьезометр) 7, служащий для определения вакуума $p_v = \gamma h_v$ над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2.

В работе определяется давление в заданной точке (например, на дне резервуара) через показания различных приборов и затем сравниваются результаты, полученные двумя путями.

3.3. Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ($p_0 > p_a$), о чем свидетельствуют превышение

уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 5 (рис. 3.1, а). Для этого устройство поставить на правую сторону, а затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2 и вернуть в исходное положение (рис. 3.2).

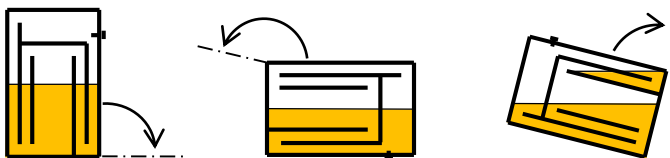


Рис. 3.2. Порядок действий по созданию избыточного давления ($p_0 > p_a$) над жидкостью в опытном резервуаре 2

2. Снять показания пьезометра $h_{п}$, уровнемера H и мановакуумметра $h_{м}$.

3. Вычислить абсолютное давление на дне резервуара через показания пьезометра, а затем – через величины, измеренные уровнемером и мановакуумметром. Для оценки сопоставимости результатов определения давления на дне резервуара двумя путями найти относительную погрешность δp .

4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ($p_0 < p_a$), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад $h_{в}$ (рис. 3.1, б). Для этого поставить устройство на левую сторону, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. Далее выполнить операции по пп. 2 и 3.

5. Перевернуть устройство против часовой стрелки (рис. 3.1, в), определить манометрическое или вакуумметрическое давление в заданной преподавателем точке C через показания пьезометра 6, а затем с целью проверки найти его через показания обратного пьезометра 7 и уровнемера 4.

В процессе проведения опытов и обработки экспериментальных данных заполнить табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Опыт при	
			$p_0 > p_a$	$p_0 < p_a$
1	Пьезометрическая высота, м	$h_{\text{п}}$		
2	Уровень жидкости в резервуаре, м	H		
3	Манометрическая высота, м	$h_{\text{м}}$		
4	Вакуумметрическая высота, м	$h_{\text{в}}$		
5	Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па	$p = p_a + \gamma h_{\text{п}}$		
6	Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, Па	$p_0 = p_a + \gamma h_{\text{м}}$		
		$p_0 = p_a - \gamma h_{\text{в}}$		
7	Абсолютное давление на дне резервуара по показаниям мановакуумметра и уровнемера, Па	$p^* = p_0 + \gamma H$		
8	Погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %	$\delta p = \frac{100(p - p^*)}{p}$		

Примечание. Принять атмосферное давление $p_a = 101\,325$ Па, удельный вес воды $\gamma = 9810$ Н/м³.

Контрольные вопросы

1. Перечислите приборы для измерения давления в жидкости.
2. Назовите жидкостные приборы для измерения гидростатического давления в устройстве № 2 и поясните принцип их действия.
3. Каким образом изменяется давление в устройстве № 2?
4. Как определить различные виды давления в точке С (рис. 3.1, в) через показания приборов?

Практическая работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Приобретение навыков по определению режимов течения жидкости визуальным и расчетным способами.

4.1. Общие сведения

Отличительные признаки режимов течения жидкости.

Различают два основных режима течения жидкости: *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихревой). При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по параллельным траекториям без перемешивания, поэтому поток имеет слоистую структуру, т. е. жидкость движется отдельными слоями. Турбулентное движение характеризуется пульсацией давления и скоростей частиц, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости в потоке, т. е. вихревое движение.

Визуальный способ определения режима течения. Для визуализации течений применяют меченые частицы (например, частицы алюминия) или окрашенные (например, чернилами или тушью) струйки, которые показывают *траектории* движения множества частиц жидкости и *линии тока*.

Вторым способом визуализации пользовался английский ученый О. Рейнольдс при своих классических исследованиях режимов движения жидкости. В исследуемый поток воды вводилась струйка подкрашенной жидкости. При малых скоростях течения воды струйка имела форму нити и не смешивалась с окружающей жидкостью, что свидетельствовало о ламинарном режиме. С увеличением скорости течения в трубе происходил переход к турбулентному режиму, который фиксировался по размыву струйки и окрашиванию ею всего потока воды.

Расчетный способ определения режимов. Критерием режима течения является *число Рейнольдса*

$$Re = Vd/\nu, \quad (4.1)$$

где V – средняя скорость потока; d – внутренний диаметр трубы (канала); если течение происходит в открытом канале или труба некруглого сечения, то диаметр выражают через гидравлический радиус R ($d = 4R$); ν – кинематический коэффициент вязкости.

В инженерной практике режим определяют путем сравнения числа Рейнольдса Re с его *критическим значением* Re_k , соответствующим смене режимов движения жидкости. Для равномерных потоков жидкости в трубах (каналах) круглого сечения принимают $Re_k = 2300$, что соответствует условиям эксплуатации.

Режим считается *ламинарным*, если $Re < Re_k$, и *турбулентным* при $Re \geq Re_k$.

Следует заметить, что в лабораторных условиях при очень плавном входе в трубу, медленном изменении скорости и отсутствии даже незначительных сотрясений труб переход от ламинарного режима к турбулентному может затягиваться до $Re = 4000$, а при обратном переходе при значительной вибрации труб – до $Re = 0,5 Re_k$. Однако такие режимы в практике не встречаются.

Из выражения (4.1) следует, что числа Рейнольдса малы, и, следовательно, режим ламинарный при низких скоростях течения V в каналах с малым диаметром d сечения (в порах грунта, капиллярах) или при движении жидкостей с большим коэффициентом вязкости ν (нефть, масло, битумы).

Турбулентный режим в природе и технике встречается чаще. Его закономерностям подчиняется движение воды в реках, каналах, системах водоснабжения и водоотведения, а также течение бензина, керосина и других маловязких жидкостей в трубах.

4.2. Описание устройства № 3

Устройство № 3 выполнено в прозрачном виде (рис. 4.1, а), имеет баки 1 и 2 с успокоительной стенкой 3 для гашения возмущений в жидкости от падения струй и всплывания пузырей воздуха. Баки между собой соединены опытными каналами 4 и 5.

Конец канала 4 снабжен перегородкой со щелью б, а противоположный конец канала 5 – решеткой (перфорированной перегородкой) 7. Устройство заполнено водой с микроскопическими частицами алюминия для визуализации течения. Уровень воды в баке 2 измеряется по шкале 8.

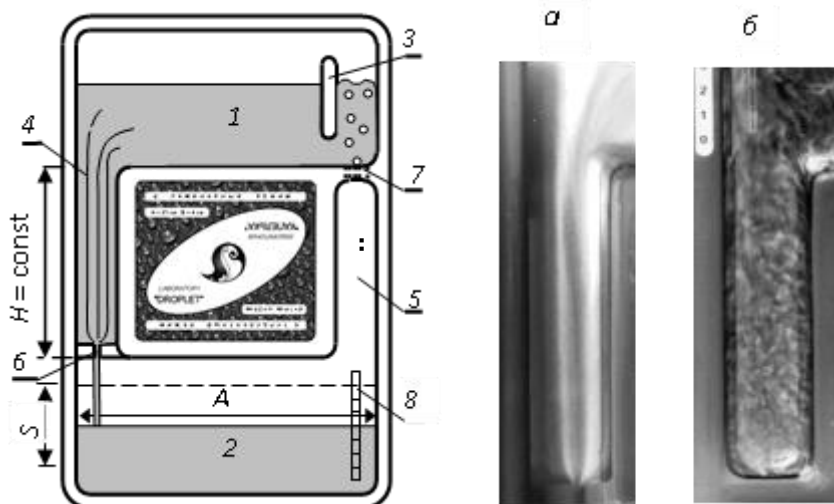


Рис. 4.1. Общий вид устройства № 3 и структура потоков жидкости при ламинарном (а) и турбулентном (б) течении:

1, 2 – баки; 3 – перегородка; 4, 5 – опытные каналы; б – щель; 7 – решетка; 8 – уровневмерная шкала

Устройство работает следующим образом. В положении устройства, указанном на рис. 1.4.1, вода из верхнего бака 1 поступает самотеком через опытный канал 4 в нижний бак 2 и вытесняет из него воздух через решетку 7 в виде пузырей в жидкость в верхнем баке 1 на уровне его дна. Поэтому давление на входе в канал 4 (на дне верхнего бака) и над жидкостью в нижнем баке уравниваются и течение происходит под действием постоянного напора $H = \text{const}$, создаваемого столбом жидкости в канале. Так

обеспечивается *установившееся* (с постоянным во времени расходом) движение жидкости в опытном канале 4 несмотря на понижение уровня в верхнем баке. Причем в нем устанавливается *ламинарный режим (а)* благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели б.

Если устройство перевернуть, то в канале 5 возникает *установившееся турбулентное течение (б)* ввиду больших скоростей из-за малого гидравлического сопротивления решетки 7. Расход можно уменьшать наклоном устройства от себя.

4.2. Порядок выполнения работы

1. Получить в канале 4 течение жидкости (рис. 4.1, а). Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол при произвольном наклоне устройства № 3 от себя. Наблюдая за структурой потока жидкости в канале 4, определить режим течения визуальным способом.

2. При этом режиме измерить время t перемещения уровня воды в баке на заданное расстояние S (обычно 5 см) и снять показания термометра T , находящегося в устройстве № 1. Подсчитать число Рейнольдса по порядку, указанному в табл. 4.1.

3. Повернуть устройство в его плоскости на 180° для получения потока в канале 5. На основе наблюдений определить режим течения в канале 5 и выполнить операции по п. 2.

4. Определить режимы течения путем сравнения рассчитанных значений чисел Рейнольдса с его критическим значением и проверить их соответствие наблюдаемым режимам.

5. Оценить инструментальную погрешность определения экспериментальных величин по формулам:

$$\Delta W = W(\Delta A/A + \Delta B/B + \Delta S/S);$$

$$\Delta V = V(\Delta W/W + \Delta t/t + 2\Delta d/d);$$

$$\Delta Re = Re(\Delta V/V + \Delta d/d + \Delta v/v),$$

где Δ – абсолютная максимальная погрешность измеряемой величины, определяемая точностью прибора; обычно ее принимают равной половине наименьшего деления измерительного прибора. В расчетах принять, что величины A, B, S измерены миллиметровой линейкой; $\Delta t = 0,5$ цены наименьшего деления шкалы секундомера; $\Delta d = 0,01$ мм; $\Delta v/v = 0,01$.

Таблица 4.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	№ опыта	
			1	2
1	Изменение уровня воды в баке, см	S		
2	Время наблюдения за уровнем, с	t		
3	Температура воды, °C	T		
4	Кинематический коэффициент вязкости, см ² /с	$\nu = \frac{17,9}{1000 + 34T + 0,22T^2}$		
5	Объем воды, поступившей в бак за время t , см ³	$W = ABS$		
6	Расход воды, см ³ /с	$Q = W/t$		
7	Средняя скорость течения в канале, см/с	$V = Q/\omega$		
8	Число Рейнольдса	$Re = Vd/\nu$		
9	Название режима течения	$Re(<, >)Re_k = 2300$		
10	Абсолютная погрешность определения Re	ΔRe		

Примечания:

1. Размеры поперечного сечения бака A, B , гидравлический диаметр d и площадь поперечного сечения ω опытных каналов указаны на корпусе устройства № 3.

2. $A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $d = \dots$ см; $\omega = \dots$ см².

Контрольные вопросы

1. Как определить режим движения жидкости?
2. Напишите формулы расчета критерия Рейнольдса для трубы круглого и произвольного поперечного сечения.
3. В каких системах жидкости движутся в ламинарном режиме? Приведите примеры турбулентного движения жидкости.
4. Поясните принцип действия устройства № 3. Как в нем достигается установившееся течение?
5. От каких факторов зависит переход от одного режима к другому и за счет чего он осуществляется в устройстве № 3?
6. Как в работе определяется расход жидкости и средняя по сечению потока скорость?
7. Как в работе оценивается точность измерений?

Практическая работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ВИДОВ И СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Наблюдение потоков жидкости разного вида с различной структурой и выявление факторов, влияющих на их характеристики.

5.1. Общие сведения

Кинематические элементы потока. Для схематизации движения жидкости вводят понятие «линия тока». *Линия тока* образована частицами жидкости, движущимися в данный момент времени одна за другой, и при установившемся течении совпадает с общей траекторией движения этих частиц. В настоящей работе для визуализации траекторий применяются меченые частицы (частицы алюминия).

Благодаря свойству вязкости местные скорости u (скорости в точках) распределены по живому сечению потока реальных жидкостей неравномерно (рис. 5.1, *а*): слои жидкости около стенок канала прилипают к ним и поэтому имеют практически нулевую скорость, а по мере удаления от стенки скорость слоев возрастает и становится максимальной в центре потока. С целью упрощения инженерных гидравлических расчетов вводится понятие «средняя скорость потока». V – это скорость, осредненная по площади ω живого сечения: $V = Q/\omega$. Таким образом, действительное распределение скоростей приводится к фиктивному равномерному распределению (рис. 5.1, *б*) и формула для определения расхода потока реальной жидкости приобретает простой вид: $Q = V\omega$.

Тогда из уравнения неразрывности (постоянства расхода по длине потока) следует, что средние скорости в потоке несжимаемой жидкости обратно пропорциональны площадям сечений: $V_1/V_2 = \omega_2/\omega_1$.

Структура отрывных течений. При резком изменении поперечного сечения (рис. 5.2) или направления канала от его стенки отрывается *транзитная струя*, а у стенки жидкость начинает двигаться в обратном направлении, приводя к вращению жидкости между транзитной струей и стенкой. Эта область называется *циркуляционной (вальцовой) зоной*.

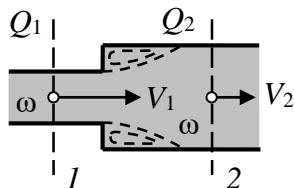
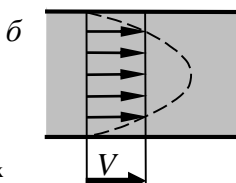
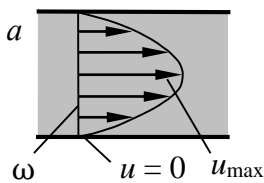


Рис. 5.1. Эпюры скоростей для потока в круглой трубе

Рис. 5.2. Схема потока при расширении

Виды движения жидкости. Различают установившееся и неустановившееся движение жидкости. При *установившемся* движении средняя скорость V жидкости в сечении потока не изменяется во времени t . В противном случае движение является *неустановившимся*. Примером установившегося движения является истечение жидкости через отверстие в резервуаре при постоянном уровне (напоре), что может быть обеспечено, например, за счет постоянного перелива избыточной жидкости через верх стенки резервуара (рис. 5.3, а). В этом случае расход и скорость через отверстие также не изменяются во времени.

Если перекрыть подачу жидкости в резервуар, то он начнет опорожняться, а скорость истечения через отверстие начнет уменьшаться. Это пример неустановившегося движения.

Установившееся движение может быть равномерным и неравномерным. При *равномерном* движении жидкости средняя скорость потока не изменяется по его длине, например, при течении в цилиндрической трубе (рис. 5.3, б). Если средняя скорость

потока изменяется по его длине, то движение жидкости называется *неравномерным*. Это происходит при изменении поперечного сечения канала или его направления (рис. 5.3, в, з).

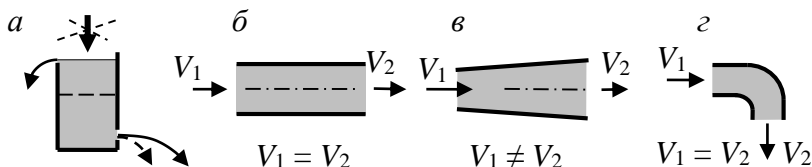


Рис. 5.3. Установившееся и неустановившееся (а), равномерное (б) и неравномерное (в, з) движение жидкости

Движение также может быть напорным и безнапорным. При *напорном* – поток ограничен со всех сторон твердой стенкой канала, например, в системах водопровода (рис. 5.4, а). При *безнапорном* течении поток ограничен твердой стенкой частично или вообще не ограничен и имеет свободную поверхность: при течении сточной жидкости в системах канализации (б), воды в реках (в), в случае свободной струи (з).

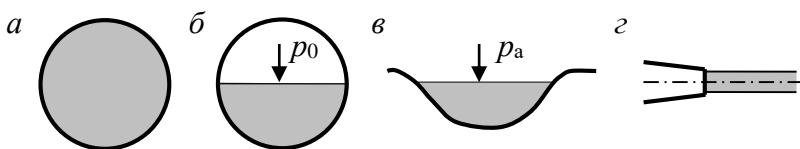


Рис. 5.4. Примеры напорного (а) и безнапорных (б, в, з) потоков

5.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 3. В случаях, указанных на рис. 5.5, б, в, г, в каналах возникает *неустановившееся* движение жидкости за счет непосредственного соединения воз-

душных полостей баков. Это позволяет проследить за изменением структуры потоков в процессе уменьшения их скорости до нуля. Работа выполняется в следующем порядке.

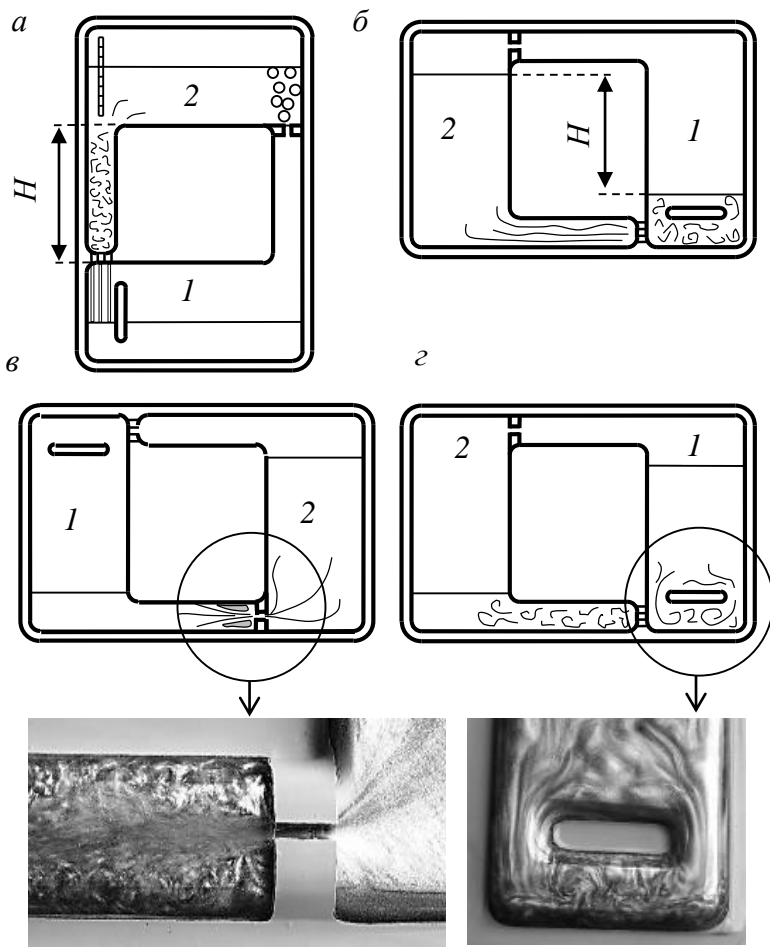


Рис. 5.5. Структура потоков жидкости при турбулентном (а) течении, плавном уменьшении скорости (б), сужении и расширении потока (в), обтекании стенки (г)

1. Создать в канале 4 (см. рис. 4.1) ламинарный режим движения жидкости. Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол. Наблюдать структуру потока жидкости в канале 4. Обратит внимание на процесс пробулькивания воздуха на дне верхнего резервуара и на стабильность скорости течения во времени.

2. Повернуть устройство в вертикальной плоскости по часовой стрелке на 180° (рис. 5.5, а). Наблюдать турбулентный режим течения в левом канале. Обратит внимание на турбулентность, возникающую в других каналах устройства № 3.

3. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал с решеткой занял нижнее горизонтальное положение (рис. 5.5, б). Наблюдать уменьшение скорости течения в канале со временем и процесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному. Следует обратит внимание на турбулизацию потока за решеткой.

4. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал со щелью занял нижнее горизонтальное положение (рис. 5.5, в). Наблюдать за структурой потока в баке 2 перед входом в щель. Обратит внимание на появление линий тока в жидкости и на их изменение по мере опорожнения бака 2. Повторить операции по этому пункту и рассмотреть начальную фазу течения при выходе из щели. Наблюдать поток в нижнем канале при его частичном заполнении (при наличии у потока свободной поверхности). После полного заполнения нижнего канала жидкостью наблюдать внезапное расширение потока в канале за щелью и при его выходе из канала в бак 1. Обратит внимание на циркуляционные (вальцовые) зоны, транзитные струи и связь скоростей течения жидкости с площадями сечений каналов в соответствии с уравнением неразрывности.

5. При заполненном баке 1 наблюдать структуру течения при обтекании перегородки 3 и процесс турбулизации потока за решеткой (рис. 5.5, г).

6. Сделать зарисовку структуры потоков жидкости для случаев, указанных в табл. 5.1, отметить вид и режим течения для этих случаев значком «+».

Таблица 5.1

Название случая течения и канала	Схема канала и направление течения	Вид течения					Режим		
		Установившееся	Неустановившееся	Равномерное	Неравномерное	Напорное	Безнапорное	Ламинарный	Турбулентный
1. Течение в канале 4 (рис. 4.1)									
2. Свободное истечение из щели b на поверхность (рис. 4.1)									
3. Течение в канале постоянного сечения (рис. 5.5, а)									
4. Вход жидкости в трубу из бака (рис. 5.5, б)									
5. Внезапное сужение потока при входе в щель (рис. 5.5, в)									
6. Течение со свободной поверхностью потока (рис. 5.5, в)									
7. Внезапное расширение потока (рис. 5.5, в)									
8. Обтекание стенки (рис. 5.5, г)									

Контрольные вопросы

1. Назовите виды движения жидкости и их отличия.
2. Как изменяются скорости по живому сечению потока?
3. Как определяется средняя по сечению скорость?
4. Каким образом изменяются скорости по длине потока?
5. Как изменяется вид движения жидкости в устройстве № 3?
6. Опишите структуру отрывных течений.

Практическая работа № 6 ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы. Опытное подтверждение уравнения Д. Бернулли, т. е. понижения механической энергии по течению в канале переменного сечения и перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно (связи давления со скоростью).

6.1. Общие сведения

Механическая энергия жидкости. Жидкость всегда обладает энергией, т. е. способностью совершить определенную работу. Обозначим в потоке кружком (рис. 6.1) объем движущейся жидкости весом G . Его *полная механическая энергия* E складывается из *энергии положения* $E_{\text{пол}}$, *энергии давления* $E_{\text{давл}}$ и *кинетической энергии* $E_{\text{кин}}$.

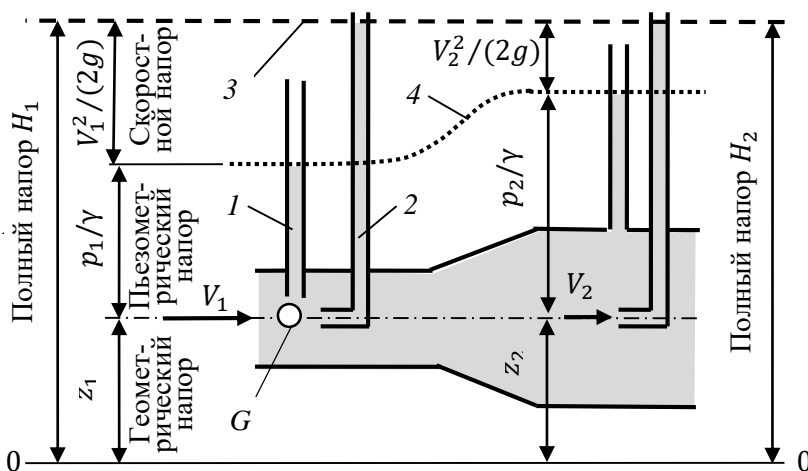


Рис. 6.1. Графическая интерпретация уравнения Бернулли для потока идеальной жидкости:
1 – пьезометр; 2 – трубка Пито; 3 – линия (напорная) полной энергии; 4 – линия (пьезометрическая) потенциальной энергии

Энергия положения равна работе по подъему жидкости весом G на геометрическую высоту z с заданной горизонтальной плоскости сравнения 0–0: $E_{\text{пол}} = Gz$.

Энергия давления представляет работу давления p , под действием которого объем жидкости весом G может подняться на пьезометрическую высоту $h_{\text{п}} = p/\gamma$, в пустом пьезометре I после открытия его нижнего конца: $E_{\text{давл}} = G p/\gamma$.

Кинетическая энергия равна работе по подъему жидкости весом G с уровня в пьезометре I на уровень в скоростной трубке 2 , т. е. на высоту $h_{\text{к}} = V^2/(2g)$: $E_{\text{кин}} = GV^2/(2g)$. Скоростная трубка (трубка Пито) изогнута и направлена отверстием против потока для восприятия дополнительного давления от частиц набегающего потока со скоростью V (рис. 6.1).

Тогда *полная механическая энергия* рассматриваемого объема жидкости в потоке выразится в виде:

$$E = Gz + Gp/\gamma + GV^2/(2g). \quad (6.1)$$

Понятие «напор». В гидравлике принято относить механическую энергию E к единице веса G жидкости. Энергия единицы веса жидкости $H = E/G$ называется *удельной энергией* или *напором* и измеряется в метрах: Дж/Н = Н·м/Н = м.

Поделив все члены уравнения (6.1) на G , получим выражение для *полного напора* (для полной удельной механической энергии) жидкости в виде суммы отдельных напоров:

$$H = z + p/\gamma + V^2/(2g), \quad (6.2)$$

где z – *геометрический напор* (удельная энергия положения); p/γ – *пьезометрический напор* (удельная энергия давления); $V^2/(2g)$ – *скоростной напор* (удельная кинетическая энергия).

Уравнение Бернулли для потока идеальной (невязкой) жидкости выражает закон сохранения механической энергии и для двух сечений потока 1–1 и 2–2 записывается так:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}, \quad (6.3)$$

где индексы «1» и «2» указывают номер сечения, к которому относится величина.

Из уравнения следует, что для потока идеальной (невязкой) жидкости полная удельная энергия (полный напор) неизменна вдоль потока, и поэтому изменение одного вида энергии по длине потока приводит к противоположному по знаку изменению другого. Таков энергетический смысл уравнения Бернулли. Например, при расширении горизонтального потока скорость V и, следовательно, кинетическая энергия $V^2/(2g)$ уменьшаются, что в силу сохранения баланса вызывает увеличение потенциальной энергии p/γ . Другими словами, понижение скорости потока V по течению приводит к возрастанию давления p (рис. 6.1), и наоборот.

Из этого же рисунка очевиден и геометрический смысл уравнения Бернулли. Он заключается в том, что его слагаемые измеряются в единицах длины и представляют собой геометрическую, пьезометрическую и скоростную высоты, сумма которых постоянна вдоль потока идеальной жидкости.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. При течении реальной (вязкой) жидкости между ее слоями возникает трение, что приводит к существенной неравномерности распределения скоростей по сечению потока, а также к потерям напора (энергии) при перемещении жидкости от одного сечения к другому (рис. 6.2). Поэтому уравнение Бернулли для потока реальной жидкости принимает такой вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{\text{тр}}, \quad (6.4)$$

где α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока, в расчетах часто не учитывается; $h_{\text{тр}}$ – суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями 1–1 и 2–2 (гидравлические потери). Они определяются суммой потерь напора на трение по длине $h_{\text{д}}$ и местных потерь $h_{\text{м}}$:

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{д}} + h_{\text{м}}.$$

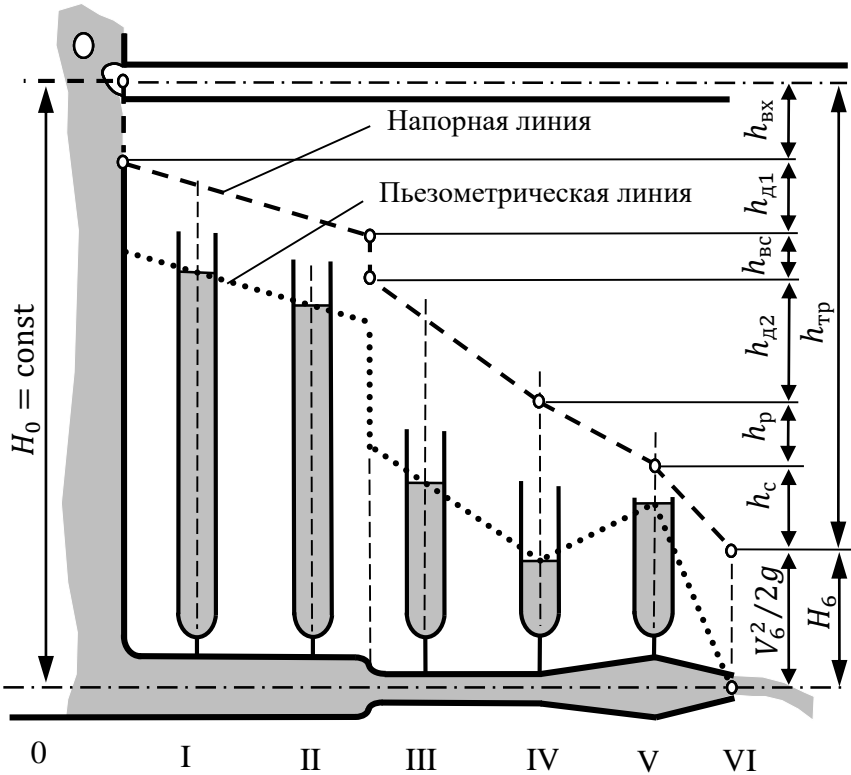


Рис. 6.2. Иллюстрация уравнения Бернулли:

H_0, H_6 – полные напоры на входе и выходе из канала; $h_{\text{вх}}$ – потери напора на вход в канал; $h_{\text{д1}}, h_{\text{д2}}$ – по длине на линейных участках 1 и 2; $h_{\text{вс}}$ – на внезапное сужение; $h_{\text{р}}, h_{\text{с}}$ – на плавные расширения и сужение; $h_{\text{тр}}$ – суммарные потери напора на преодоление сил гидравлического трения во всем канале; $V_6^2/2g$ – скоростной напор в сечении VI

Потери на трение по длине $h_{\text{д}}$ (линейные потери) возникают из-за трения слоев жидкости между собой в прямых участках труб постоянного сечения, т. е. при равномерном течении.

Они возрастают пропорционально длине трубы. *Местные потери напора* h_m вызваны деформацией потока и вихреобразованием в отдельных местах гидравлических систем (при изменении сечения и повороте труб, в вентилях, клапанах). Такие участки называют местными гидравлическими сопротивлениями.

Линия, соединяющая уровни жидкости в пьезометрах, называется *пьезометрической*. Она иллюстрирует изменение потенциальной энергии (потенциального напора $z + p/\gamma$) по длине потока. Линия, проведенная через уровни жидкости в трубках Пито, отражает распределение полной удельной механической энергии (полного напора) вдоль потока и именуется *напорной*. Падение полного напора, приходящееся на единицу длины потока l , называется *гидравлическим уклоном* $I = h_{тр}/l$.

Напорная и пьезометрическая линии дают наглядное представление о переходе одного вида энергии в другой по длине потока и позволяют установить значения основных параметров течения жидкости. Линии строятся, в соответствии с нижеприведенными правилами, вытекающими из уравнения Бернулли.

1. *Напорная линия* (полный напор $H = z + p/\gamma + \alpha V^2/(2g)$) постоянно понижается по течению (если на рассматриваемом участке нет насоса) ввиду необратимого преобразования механической энергии в тепловую при преодолении потоком сил гидравлического трения. Причем уклон линии (потери напора $h_{тр}$) тем больше, чем меньше сечение участка потока (рис. 6.2).

2. *Пьезометрическая линия* отражает изменение потенциальной энергии ($z + p/\gamma$), и, в отличие от напорной, может не только понижаться, но и *повышаться по течению*. Это происходит при расширении потока (рис. 6.1, 6.2) за счет повышения давления p ввиду уменьшения скорости V . Пьезометрическая линия проходит через центр тяжести выходного сечения канала (трубопровода) при истечении жидкости в атмосферу и ниже оси канала, если давление в нем меньше атмосферного.

3. Расстояние между пьезометрической и напорной линиями численно равно кинетической энергии $\alpha V^2/(2g)$ и поэтому обратно пропорционально диаметру трубы. Для участков потоков постоянного сечения средние скорости одинаковы по пути, поэтому такие линии, как правило, параллельны между собой (рис. 6.2). Эти линии для потоков в конфузорах (конических сходящихся патрубках) расходятся, а в диффузорах (конических расходящихся патрубках) – сходятся. В баках и водоёмах, где жидкость не движется ($V = 0$), напорная и пьезометрическая линии энергий совпадают со свободной поверхностью, если она находится под атмосферным давлением.

6.2. Описание устройства № 4

Устройство № 4 содержит баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы постоянного 3 и переменного 4 сечений (рис. 6.3). Каналы соединены между собой равномерно расположенными пьезометрами I–V, служащими для измерения пьезометрических напоров в характерных сечениях. Устройство заполнено подкрашенной водой. В одном из баков предусмотрена шкала 5 для измерения уровня воды. При перевертывании устройства, благодаря постоянству напора истечения H_0 во времени, обеспечивается установившееся движение воды в нижнем канале. Другой канал в это время пропускает воздух, вытесняемый жидкостью из нижнего бака в верхний.

6.3. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 (рис. 6.3) перевернуть устройство и получить течение в канале переменного сечения 4.
2. Снять показания пьезометров $h_{п} = p/\gamma$ по нижним частям менисков воды в них.
3. Измерить время t перемещения уровня в баке на произвольно заданную величину S .

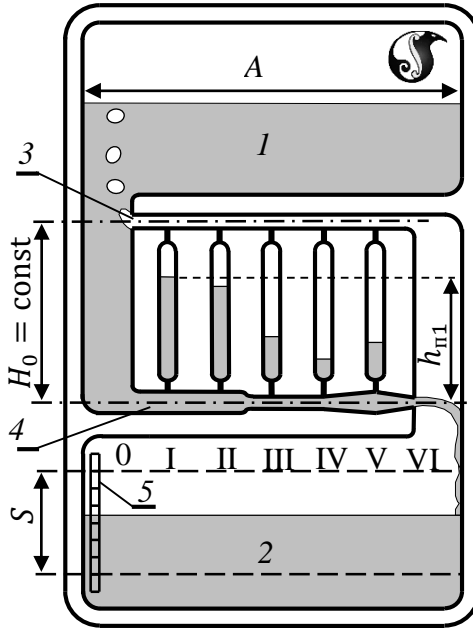


Рис. 6.3. Схема устройства № 4:

1, 2 – баки; 3 – опытный канал постоянного сечения; 4 – опытный канал переменного сечения; 5 – уровнемерная шкала; I–V – пьезометры

4. По размерам A и B поперечного сечения бака, перемещению уровня S и времени t определить расход Q воды в канале, а затем скоростные h_k и полные H напоры в сечениях канала по порядку, указанному в табл. 6.1. Скорость в нулевом сечении (перед входом в канал) принять равной нулю. Так как опытный канал горизонтальный и плоскость сравнения 0–0 проведена через его ось, то геометрический напор $z_1 = z_2 = 0$.

5. Вычертить в масштабе канал с осями пьезометров (рис. 6.2). Отложить от оси канала пьезометрические напоры $h_{п1}$ на осях пьезометров, наметить уровни жидкости и соединить их между собой и центром выходного сечения VI. Получится *пьезометрическая линия*, показывающая изменение потенциальной

энергии (давления) вдоль потока. Для получения *напорной линии* (линии полной механической энергии) отложить от оси канала полные напоры H и соединить полученные точки.

Таблица 6.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Сечения канала						
			0	I	II	III	IV	V	VI
1	Площадь сечения канала, см	ω							
2	Средняя скорость, см/с	$V = Q/\omega$							
3	Пьезометрический напор, см	$h_p = p/\gamma$							
4	Скоростной напор, см	$h_k = V^2/(2g)$							
5	Полный напор, см	$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}$							

Примечание. $A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $S = \dots$ см; $t = \dots$ с; $Q = ABS/t = \dots$ см³/с.

6. Проанализировать изменения полной механической H , потенциальной p/γ , кинетической $V^2/(2g)$ энергий жидкости вдоль потока и их соответствие уравнению Бернулли.

Контрольные вопросы

1. Поясните энергетический и геометрический смысл слагаемых уравнения Бернулли. Что такое гидравлический уклон?
2. Какими приборами измеряется напор жидкости?
3. Может ли напорная линия располагаться ниже пьезометрической, а пьезометрическая – ниже оси трубопровода? Почему?
4. Объясните, чем обусловлены потери напора по длине и местные гидравлические потери.
5. Как изменятся напорная и пьезометрическая линии для неравномерного движения при замене реальной жидкости на идеальную?

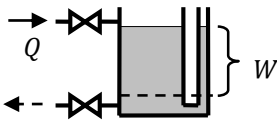
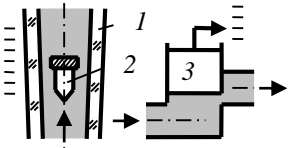
Практическая работа № 7 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ЖИДКОСТИ

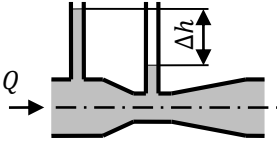
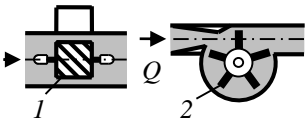
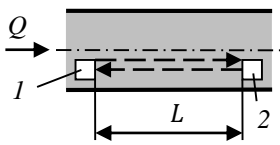
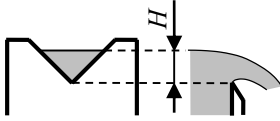
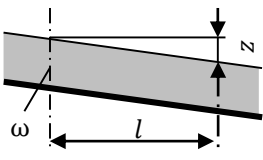
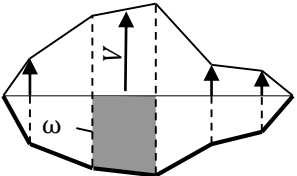
Цель работы. Изучение принципов работы устройств для измерения расхода и скорости жидкости; приобретение навыков по измерению расхода по перепаду напора на сужении канала.

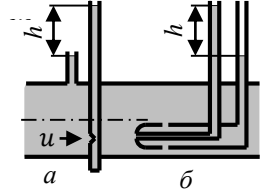
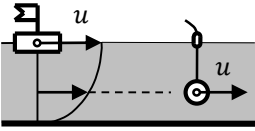
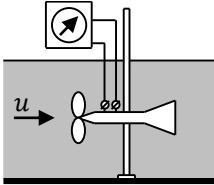
7.1. Общие сведения

Основные понятия. Прибор, измеряющий количество жидкости, протекающей через заданное сечение за некоторый промежуток времени (смену, сутки и т. д.), называют *счетчиком количества жидкости*, или просто *счетчиком*. При этом количество жидкости определяется как разность показаний счетчика в начале и конце этого промежутка. Прибор, измеряющий расход, т. е. количество жидкости, протекающей через живое сечение потока в единицу времени, называют *расходомером*. В табл. 7.1 приводятся основные методы измерения расхода.

Таблица 7.1

Название метода измерения расхода и приборов измерения скорости	Схема устройства
<p>1. <i>Объемный метод</i> сводится к определению времени наполнения мерного сосуда. Расход определяется отношением объема W мерного сосуда к времени t его наполнения: $Q = W/t$</p>	
<p>2. <i>Метод постоянного перепада давления</i> основан на измерении вертикального смещения поплавка 2 в конической трубке 1 в <i>ротаметрах</i> или поршня 3 в <i>поршневых расходомерах</i>, создающих своим весом постоянный перепад давления</p>	

<p>Название метода измерения расхода и приборов измерения скорости</p>	<p>Схема устройства</p>
<p>3. <i>Метод переменного перепада давления</i> основан на зависимости перепада давления (напоров Δh) в канале с сужающим устройством (сопло, труба Вентури, диафрагма) от расхода в нем</p>	
<p>4. <i>Турбинный метод</i> основан на зависимости частоты вращения турбинки в потоке от его расхода. Расходомер имеет аксиальную 1 или тангенциальную 2 турбинку</p>	
<p>5. <i>Ультразвуковой метод</i> основан на измерении разности времени хода ультразвуковой волны по направлению и против потока</p>	
<p>6. <i>Метод переменного уровня</i> основан на зависимости уровня жидкости перед препятствием (водосливом) от расхода</p>	
<p>7. <i>Метод «уклон – площадь»</i> основан на использовании зависимости расхода Q от геометрического уклона свободной поверхности потока $i = z/l$ и площади его живого сечения ω</p>	
<p>8. <i>Метод «площадь – скорость»</i> заключается в том, что живое сечение потока разбивается на участки, например, вертикалями. Затем определяются расходы Q через эти участки путем перемножения их площадей ω и средних скоростей V течения через них</p>	

Название метода измерения расхода и приборов измерения скорости	Схема устройства
<p>9. Скоростная и пьезометрическая трубки (а) позволяют определить скорость u через скоростной напор $h = u^2/(2g)$. Их конструктивно объединяют в гидродинамическую трубку (б)</p>	
<p>10. Поплавки используют для определения скоростей течения водотока из формулы $u = L/t$, где L – длина пути поплавок, пройденного им за время t</p>	
<p>11. Гидрометрические вертушки используются для измерения скорости течения воды в открытых руслах. Метод измерения основан на зависимости частоты вращения лопастного винта от скорости u набегающего на него потока</p>	

7.2. Описание расходомера переменного перепада давления в устройстве № 4

В настоящей работе на устройстве № 4 (рис. 6.3) изучается расходомер переменного перепада давления. В качестве расходомера используется сужение канала 4 между сечениями II–II и III–III и два пьезометра в этих сечениях (рис. 7.1).

При выводе расчетной формулы для расхода используем уравнения Бернулли и неразрывности. Плоскость сравнения проведем через ось канала, тогда $z_2 = z_3 = 0$. Пренебрегая в первом приближении величиной потерь напора ($h_{тр} = 0$) и неравномерностью распределения скоростей по сечению потока ($\alpha_2 = \alpha_3 = 1$), получим уравнение Бернулли (6.4) в виде:

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} \text{ или } \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_3}{\gamma} = \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}. \quad (7.1)$$

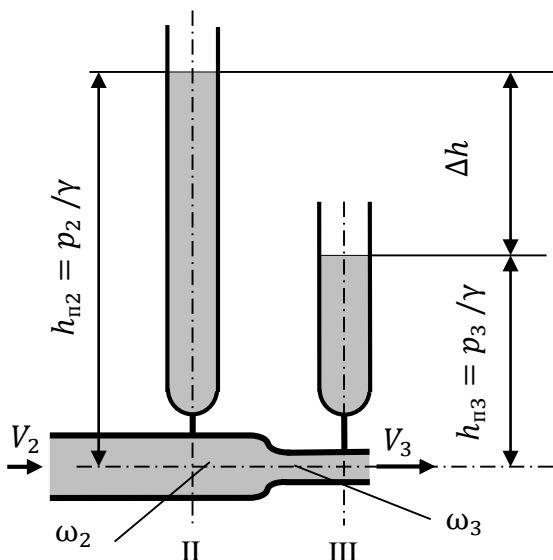


Рис. 7.1. Схема расходомера переменного перепада давления

Обозначим в последнем уравнении разность показаний пьезометров $(p_2/\gamma - p_3/\gamma)$ в сечениях II–II и III–III через Δh , а скорости V_2 и V_3 выразим в соответствии с уравнением неразрывности ($V_2\omega_2 = V_3\omega_3 = Q$) через расход Q и площади поперечных сечений ω_2, ω_3 сужения ($V_2 = Q/\omega_2, V_3 = Q/\omega_3$). Тогда имеем:

$$\Delta h = [(Q/\omega_3)^2 - (Q/\omega_2)^2]/(2g),$$

откуда, после введения коэффициента расхода μ для учета потерь напора, получим формулу для определения расхода напорного потока жидкости по перепаду показаний пьезометров на сужении канала:

$$Q = \mu \sqrt{2g\omega_2^2\omega_3^2/(\omega_2^2 - \omega_3^2)} \sqrt{\Delta h} = \mu C \sqrt{\Delta h}, \quad (7.2)$$

где C – постоянная (константа) расходомера, зависящая от соотношения площадей сечений широкой и узкой частей сужения канала (сужающего устройства):

$$C = \sqrt{2g\omega_2^2\omega_3^2/(\omega_2^2 - \omega_3^2)}.$$

Величина μ может быть получена с необходимой точностью только опытным путем. Опытное определение коэффициента μ и зависимости перепада напоров Δh от расхода Q называется градуировкой расходомера. В дальнейшем, зная Δh , по градуировочному графику $\Delta h = f(Q)$ легко определить измеряемый расход. Величина коэффициента μ зависит от геометрических параметров сужающего устройства и при превышении некоторого граничного значения числа Рейнольдса $Re_{гр}$ становится постоянной. Расходомеры описанного типа удобно использовать при $\mu = \text{const}$, т. е. в квадратичной зоне турбулентного течения жидкости (при $Re > Re_{гр}$). В противном случае возрастает погрешность измерений расхода в связи с изменением вязкости жидкости в зависимости от ее температуры.

7.3. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 (см. рис. 6.3) перевернуть устройство № 4 для получения течения в канале 4.

2. Снять показания пьезометров $h_{п2}$ и $h_{п3}$ в сечениях II–II и III–III по нижним частям менисков воды в них (рис. 7.1).

3. Измерить время t перемещения уровня жидкости в баке с равномерной шкалой на произвольно заданную величину S .

4. Определить расход Q^* методом переменного перепада давления по порядку, указанному в табл. 7.2 (пп. 1–8). Значение коэффициента расхода сужения принять равным $\mu = 0,56$.

5. По размерам A и B поперечного сечения бака, перемещению уровня S и времени t определить расход воды Q в канале 4 объемным методом.

6. Оценить относительное расхождение определения расхода двумя методами.

Таблица 7.2

№ п/п	Наименование величин, единицы измерения	Обозначение, формула	Значение величин
1	Площадь сечений сужения канала, см	ω_2, ω_3	
2	Показания пьезометров, см	$h_{п2}, h_{п3}$	
3	Разность показаний пьезометров, см	$\Delta h = h_{п2} - h_{п3}$	
4	Постоянная расходомера, см ^{5/2} /с	$C = \sqrt{\frac{2g\omega_2^2\omega_3^2}{\omega_2^2 - \omega_3^2}}$	
5	Коэффициент расхода	μ	
6	Расход, измеренный расходомером, см ³ /с	$Q^* = \mu C \sqrt{\Delta h}$	
7	Размеры поперечного сечения бака, см	$A; B$	
8	Изменение уровня воды в баке, см	S	
9	Время наблюдения за уровнем, с	t	
10	Объем воды, поступившей в бак за время t , см ³	$W = ABS$	
11	Расход, измеренный объемным методом, см ³ /с	$Q = W/t$	
12	Погрешность определения расхода, %	$\delta p = \frac{100(Q - Q^*)}{Q}$	

Контрольные вопросы

1. Что называют объемным расходом? Чем отличается расходомер от счетчика?
2. Какие приборы применяются для измерения расхода жидкости? Как измерялся расход в настоящей работе?
3. Принцип действия дроссельных расходомеров. Что учитывает коэффициент расхода и постоянная расходомера?
4. Что такое градуировка расходомера? Опишите порядок выполнения градуировки расходомера Вентури.
5. Какова зависимость перепада напоров от расхода?

Практическая работа № 8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Цель работы. Освоение экспериментального и расчетного способов определения потерь напора на трение по длине.

8.1. Общие сведения

Расчет потерь напора (потерь удельной механической энергии) при движении жидкостей составляет одну из основных задач практической гидравлики. В зависимости от потерь напора в гидросистемах назначаются диаметры трубопроводов, высота расположения баков, напор и мощность насосов.

Полные потери напора $h_{\text{тр}}$ на преодоление сил гидравлического трения при течении жидкости складываются из потерь напора по длине $h_{\text{д}}$ и местных потерь напора $h_{\text{м}}$:

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{д}} + h_{\text{м}}. \quad (8.1)$$

Потери напора по длине $h_{\text{д}}$ (линейные потери) вызваны турбулентным действием стенок, приводящим к вязкостному трению частиц и струек жидкости друг о друга вдоль трубопровода. В *опытах* такие потери можно определить разностью показаний пьезометров, установленных на концах опытного участка трубы (канала), т. к. скоростной напор не изменяется по пути (рис. 8.1).

Для *расчета* потерь напора при равномерном течении в круглых трубах используется формула Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (8.2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения или коэффициент Дарси; l, d – соответственно, длина и внутренний диаметр трубы (канала); V – средняя скорость потока.

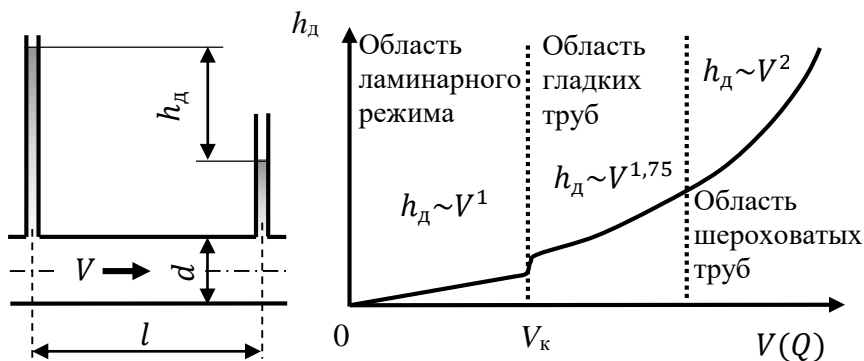


Рис. 8.1. Схема измерения потерь напора по длине h_d и вид их зависимости от скорости V (или расхода Q) жидкости

Коэффициент трения λ в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости стенок трубы Δ/d , где Δ – средняя высота выступов шероховатости стенок, или абсолютная шероховатость.

При *ламинарном режиме* (при $Re < 2300$) коэффициент трения вычисляется по теоретической формуле Пуазейля:

$$\lambda = 64/Re. \quad (8.3)$$

Подставляя это выражение для λ в формулу (8.2) и расписывая число Рейнольдса $Re = Vd/\nu$, получаем, что в ламинарном потоке потери напора по длине пропорциональны средней скорости в первой степени ($h_d \sim V$) (рис. 8.1).

При *турбулентном режиме* течения различают области гидравлически гладких и шероховатых труб (стенок). Трубу или стенку считают *гидравлически гладкой*, если соблюдается условие $2300 \leq Re \leq 10d/\Delta$. В этом случае толщина δ прилегающего к стенке ламинарного подслоя турбулентного потока превышает высоту Δ выступов шероховатости. Они покрываются подслоем и поток не испытывает дополнительных завихрений от шероховатости (рис. 8.2, а). Поэтому в области гидравлически гладких труб,

как в ламинарном режиме, λ зависит только от числа Рейнольдса и вычисляется по эмпирической формуле Блазиуса:

$$\lambda = 0,316/Re^{0,25}. \quad (8.4)$$

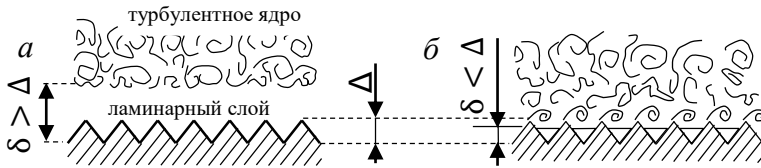


Рис. 8.2. Гидравлически гладкая (а) и шероховатая стенка (б)

Подставляя выражение для λ в формулу (8.2), легко показать, что в этой области $h_d \sim V^{1,75}$ (рис. 8.1).

С увеличением числа Рейнольдса, например за счет повышения скорости течения, толщина ламинарного подслоя δ турбулентного потока уменьшается, и при $Re > 10d/\Delta$ становится меньше высоты выступов шероховатости Δ . Они оголяются и начинают вносить дополнительные возмущения (вихри) в турбулентное ядро потока (рис. 8.2, б), что приводит к возрастанию потерь напора. В этом случае труба (стенка) называется *гидравлически шероховатой*, а коэффициент трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0.11(68/Re + \Delta/d)^{0,25}. \quad (8.5)$$

Формула указывает на увеличение коэффициента трения λ с возрастанием относительной шероховатости Δ/d стенок. При достаточно больших числах Рейнольдса $Re \geq 500\Delta/d$ коэффициент λ не зависит от Re . Он зависит лишь от относительной шероховатости Δ/d стенок и определяется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25},$$

а потери напора по длине становятся пропорциональными квадрату средней скорости $h_d \sim V^2$. Поэтому эту часть области шероховатых труб называют *зоной квадратичного сопротивления*.

Итак, для вычисления потерь напора по длине необходимо предварительно выявить область сопротивления (область ламинарного движения, область гладких или шероховатых стенок турбулентного течения), а затем определить коэффициент трения по соответствующим этим областям формулам. Для этого также может быть использован график Колбрука – Уайта (рис. 8.3).

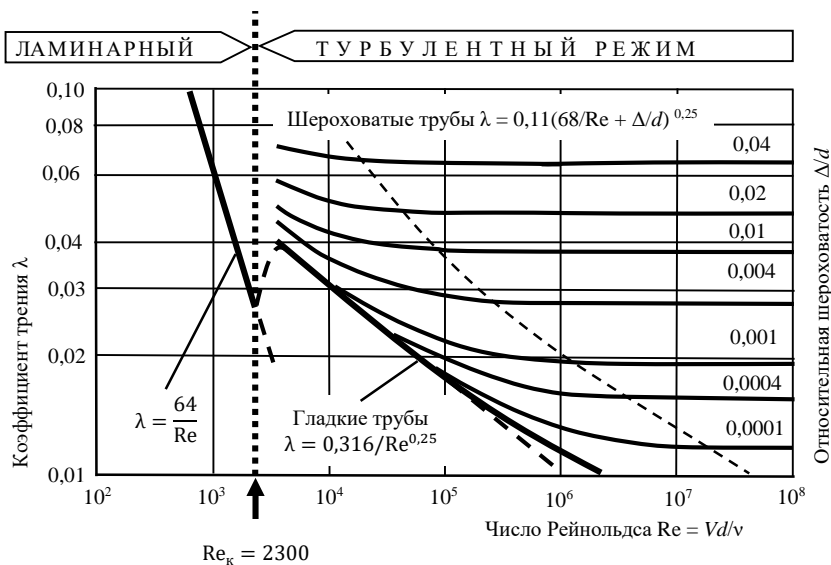


Рис. 8.3. График Колбрука – Уайта

8.2. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 2 поставить устройство № 4 на стол баком 1 (см. рис. 6.2) и наблюдать течение в канале постоянного сечения 3. Обратит внимание на повышенные перепады уровней в соседних пьезометрах на начальном участке канала.

2. На участке с равномерным (стабилизированным) течением снять показания ($h_{п3}$ и $h_{п5}$) пьезометров III и V (рис. 8.4),

измерить время t изменения уровня в баке 2 на заданную величину S , длину l участка III–V и температуру T в помещении.

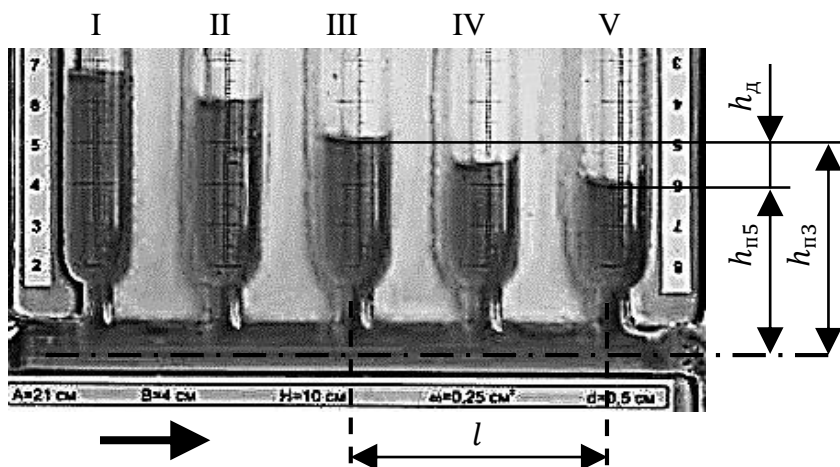


Рис. 8.4. Схема замеров при опытном определении потерь напора

3. Определить *опытное* значение потерь напора по длине h_d по показаниям крайних пьезометров на опытном участке III–V.

4. Вычислить число Рейнольдса и значение коэффициента трения λ по порядку, указанному в табл. 8.1. Оценить его по графику на рис. 8.3.

Таблица 8.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение
1	Показания пьезометров, см	$h_{п3}$ и $h_{п5}$	
2	Длина участка с равномерным течением, см	l	
3	Опытное значение потерь напора по длине, см	$h_d = h_{п3} - h_{п5}$	
4	Кинематический коэффициент вязкости воды ν , см ² /с	$\frac{17,9}{1000 + 34T + 0,22T^2}$	

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение
5	Число Рейнольдса	$Re = Vd/\nu$	
6	Коэффициент трения при: $Re < 2300$ $2300 < Re < 10d/\Delta$ $Re > 10d/\Delta$	$\lambda = 64/Re$ $\lambda = 0,316/Re^{0,25}$ $\lambda = \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d}\right)^{0,25}$	
7	Расчетное значение потерь напора по длине, см	$h_d^* = \lambda \frac{l V^2}{d 2g}$	
8	Расхождение опытного и расчетного значений потерь	$\delta_h = \frac{h_d - h_d^*}{h_d}$	

Примечания:

1. Абсолютную шероховатость стенок канала принять равной $\Delta = 0,001$ мм.

2. $d = \dots$ см; $\omega = \dots$ см²; $A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $T = \dots$ °C; $S = \dots$ см; $t = \dots$ с;

$Q = \frac{ABS}{t} = \dots$ см³/с; $V = Q/\omega = \dots$ см/с.

5. Найти *расчетное* значение потерь напора h_d^* и оценить относительное расхождение его с опытным значением h_d . Объяснить это расхождение.

Контрольные вопросы

1. Что такое потери напора по длине (линейные потери)?
2. Напишите и поясните формулу Дарси – Вейсбаха.
3. Какие трубы называются гидравлически гладкими и шероховатыми?
4. Как определяют коэффициент трения λ в опытах и при расчетах?
5. Как определяются границы областей сопротивления?
6. Чем объясняются повышенные потери на начальном участке трубы?
7. Как зависят потери h_d от диаметра трубы при постоянном расходе?

Практическая работа № 9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА

Цель работы. Определение опытных значений местных потерь напора, сравнение их с рассчитанными по инженерным формулам.

9.1. Общие сведения

Местные потери напора (энергии) жидкости возникают на коротких участках трубопровода с препятствиями для потока, называемыми *местными сопротивлениями*. К ним относят фасонные части трубопроводов (внезапное расширение и сужение труб, диффузоры, конфузоры, колена) и различные устройства (вентили, краны, задвижки, клапаны, фильтры, расходомеры).

Местные сопротивления вызывают изменение скорости движения жидкости по величине и направлению, что почти всегда приводит к отрыву потока (транзитной струи) от стенок и возвратному течению жидкости около них, т. е. к образованию *циркуляционных зон*. На вращение жидкости в них и вихреобразование поглощается энергия потока, которая, в основном, и составляет местные потери напора. Их величина экспериментально определяется разностью полных напоров до и после местного сопротивления. Для более точного опытного определения местных потерь из вышеуказанной величины нужно вычесть потери по длине на участке с местным сопротивлением.

В инженерных расчетах для определения местных потерь напора используется формула Вейсбаха, выражающая потери в долях от скоростного напора:

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (9.1)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления (выбирается по справочнику); V – средняя скорость потока. Чаще всего за расчетную скорость принимают скорость за местным сопротивлением или в сечении с меньшей площадью.

При расчете местных потерь используются справочные эмпирические значения ξ , которые зависят от вида, геометрии местных сопротивлений и числа Рейнольдса Re (рис. 9.1).

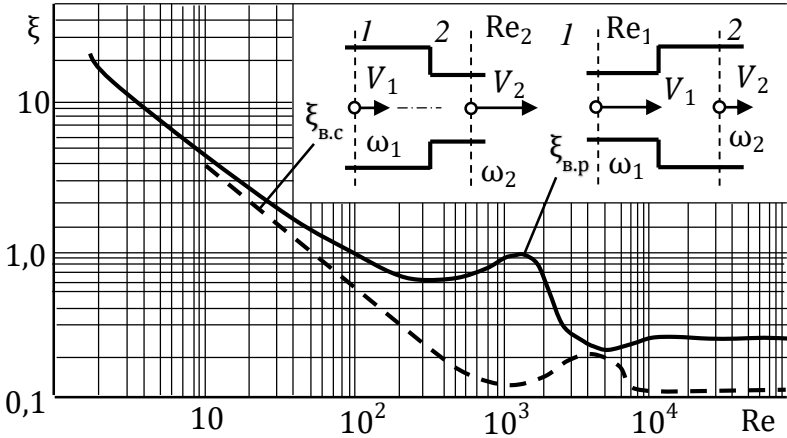


Рис. 9.1. Зависимость коэффициента ξ от числа Рейнольдса Re для внезапного сужения при $\omega_2/\omega_1 = 0,6$ и для внезапного расширения при $\omega_1/\omega_2 = 0,5$

Установлено, что развитый турбулентный режим течения жидкости в местных сопротивлениях с резким изменением геометрии потока устанавливается уже при $Re > 3000$, а при плавном изменении геометрии – при $Re > 10\,000$. В этом случае коэффициенты ξ приобретают постоянные значения, не зависящие от числа Рейнольдса (рис. 9.1). Их величина определяется только геометрией местного сопротивления. Так, для внезапного расширения потока $\xi_{в.р.} = (1 - \omega_1/\omega_2)^2$, а для внезапного сужения они составляют: $\xi_{в.с.} = 0,5(1 - \omega_2/\omega_1)$. Здесь ω_1 и ω_2 – площади сечений потока до и после сопротивления.

При постепенном расширении развитого турбулентного потока (при течении в диффузоре) при углах конусности ($\theta \leq 10^\circ$) течение происходит безотрывно, а коэффициент сопротивления диффузора $\xi_{\text{диф}}$ составляет всего около 0,2 от коэффициента сопротивления при внезапном расширении $\xi_{\text{в.р}}$. Но с увеличением угла свыше 10° возникает сначала частичный, а затем и полный, отрыв потока от стенки и увеличение коэффициента диффузора до максимального значения $\xi_{\text{диф}} = 1,2 \xi_{\text{в.р}}$ при $\theta = 60 - 70^\circ$. Дальнейшее увеличение угла конусности диффузора до $\theta = 180^\circ$ (при внезапном расширении) снижает значение коэффициента диффузора до $\xi_{\text{в.р}}$. Поэтому для снижения потерь напора на переходных участках трубопроводов вместо диффузоров с углом более 40° следует применять внезапное расширение.

9.2. Порядок выполнения работы

1. Перенести из табл. 6.1 в табл. 9.1 значения площадей сечений II, III, IV и V канала и скоростей течения в сечениях III и IV.

Таблица 9.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Вид сопротивления			
			сужение		расширение	
			1 (II)	2 (III)	1 (IV)	2 (V)
1	Площади сечений, см ²	ω_1, ω_2				
2	Расчетная средняя скорость, см/с	V				
3	Опытные значения потерь, см	$h_m (h_{\text{в.с}} \text{ и } h_p)$				
4	Коэффициенты местных сопротивлений в квадратичной области	$\xi_{\text{в.с}} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$				
		$\xi_{\text{в.р}} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2$				

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Вид сопротивления			
			сужение		расширение	
			1 (II)	2 (III)	1 (IV)	2 (V)
5	Расчетное значение числа Рейнольдса	$Re = \frac{Vd}{\nu}$				
6	Коэффициенты ξ с учетом числа Re из рис. 9.1	ξ				
7	Расчетные значения местных потерь с уче- том Re	$h_m^* = \xi \frac{V^2}{2g}$				

Примечание. Диаметр канала в расчетном сечении принять $d = 0,6$ см, а кинематический коэффициент воды $\nu = 0,01$ см²/с.

2. Из ранее построенного графика (см. рис. 6.2) путем замеров перепадов на напорной линии определить опытные значения потерь напора $h_{в,с}$ – на внезапное сужение и h_p – на расширение потока.

3. Вычислить значения коэффициентов местных потерь $\xi_{в,с}$ и $\xi_{в,р}$ в квадратичной области сопротивления, где они не зависят от числа Re. Сравнить их со значениями, найденными из справочных зависимостей на рис. 9.1 при $Re > 10\,000$.

4. Найти расчетные значения местных потерь h_m^* с учетом Re по указанному в таблице порядку, сравнить их с опытными значениями h_m . На основе приведенных общих сведений объяснить возможные расхождения.

Контрольные вопросы

1. Что такое местные сопротивления? Перечислите их виды.
2. Объясните физическую сущность местных потерь напора.
3. Изобразите схемы течения жидкости при резком повороте, резком расширении и резком сужении трубопровода.
4. Напишите и поясните формулу Вейсбаха для местных потерь.
5. Что характеризуют коэффициенты местных сопротивлений ξ ? От каких факторов в общем случае они зависят?
6. Как определяют коэффициенты ξ при расчетах?
7. Как определяют коэффициенты ξ опытным путем?

II. РАБОТЫ ПО ГИДРАВЛИКЕ ОТКРЫТЫХ РУСЕЛ НА ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-2»

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-2»

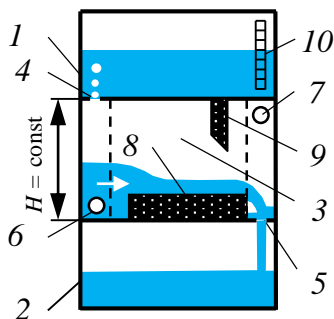
Практические работы на портативной лаборатории «Капелька-2» позволяют закрепить теоретические знания и приобрести навыки проведения опытов *по гидравлике открытых русел*.

Лаборатория «Капелька-2» состоит из устройств (№ 5–7). Устройства (рисунок) имеют прозрачные корпуса и содержат по два бака 1 и 2, соединённых между собой щелевым каналом (лотком) 3 через отверстия 4, 5 и 6, 7. В щелевом лотке установлены модели гидротехнических сооружений: в устройстве № 5 – модели водослива с широким порогом 8 и водослива с тонкой стенкой 9; в устройстве № 6 – модели щита (затвора) 11 и водосливов практического профиля с криволинейным 12 и с полигональным (многоугольным) 13 очертаниями; в устройстве № 7 – модели безнапорной 14 и напорной 15 водопропускных труб.

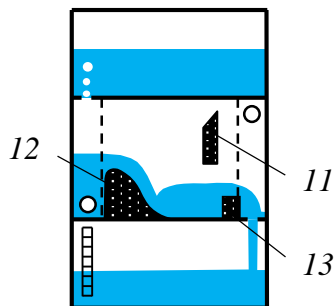
Устройства заполнены водой с микроскопическими частицами алюминия для визуализации течения. В одном из баков предусмотрена шкала 10 для измерения уровня воды.

Устройства работают следующим образом. При перевёртывании устройства жидкость из верхнего бака 1 поступает через отверстие 6 в нижнюю часть лотка 3 и через отверстие 5 отводится в нижний бак 2, вытесняя из него воздух через отверстие 7 в верхнюю часть лотка 3 и отверстие 4 в верхний бак 1 в виде пузырьков. Благодаря пузырьковому перепуску воздуха обеспечиваются постоянный во времени напор питания H лотка и стабилизированный расход Q в нем, несмотря на изменение уровней в баках. Это позволяет легко и точно провести замеры параметров установившегося течения в ходе опыта.

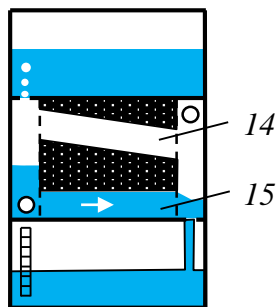
Устройство № 5



Устройство № 6



Устройство № 7



Общий вид и схемы устройств № 5, № 6 и № 7:

1, 2 – баки; 3 – щелевой канал (лоток); 4, 5 и 6, 7 – отверстия, соединяющие баки; 8 и 9 – водосливы с широким порогом и с тонкой стенкой; 10 – равномерная шкала; 11 – щит (затвор); 12 и 13 – водосливы практического профиля с криволинейным и полигональным очертаниями; 14 и 15 – безнапорная и напорная водопропускные трубы

Расход в лотке измеряется объемным способом. Его можно регулировать наклоном устройств от себя, влево или вправо.

Часть потока перед водосливом называется верхним бьефом (в. б.), а за ним – нижним бьефом (н. б.). Верхняя кромка водослива именуется гребнем, а наибольшее превышение уровня воды в верхнем бьефе над гребнем – геометрическим напором H . Он обычно фиксируется перед водосливом на расстоянии приблизительно $3H$ от гребня. Глубина воды в нижнем бьефе называется *бытовой глубиной* h_6 .

Если изменение уровня воды в нижнем бьефе не влияет на величину напора H , водослив называется *неподтопленным* (при этом свободная поверхность воды показана на рис. 10.1 сплошной линией). Если увеличение h_6 вызывает повышение уровня в верхнем бьефе, водослив называют *подтопленным*, а свободная поверхность занимает положение, показанное пунктиром. Условие подтопления имеет вид

$$h_6 > P, Z/P < \left(\frac{Z}{P}\right)_{\text{кр}} \approx 0,75,$$

где Z – геометрический перепад уровней на водосливе, т. е. превышение уровня в верхнем бьефе над уровнем в нижнем бьефе; P – высота водослива. Превышение уровня в нижнем бьефе над гребнем водослива называется *глубиной подтопления* $h_{\text{п}}$.

Расход воды через неподтопленные водосливы любого типа без бокового сжатия определяется по общей формуле:

$$Q = mb\sqrt{2g} H_0^{1,5}, \quad (10.1)$$

где Q – расход; b – ширина водослива; g – ускорение свободного падения; m – коэффициент расхода, зависящий от типа и геометрии водослива; H_0 – полный напор на водосливе;

$$H_0 = H + \frac{\alpha V^2}{2g}, \quad (10.2)$$

где α – коэффициент Кориолиса; $V = Q/[b(H + P)]$ – скорость потока в верхнем бьефе (на подходе). При $H > 0,5P$ скоростным напором можно пренебречь и считать $H_0 = H$.

Расчетное значение коэффициента расхода m^* для неподтопленного водослива с тонкой стенкой без бокового сжатия определяют по инженерной формуле, приведенной в табл. 10.1. Для подтопленного водослива в формулу (10.1) вводится множитель – справочный коэффициент подтопления $\sigma_{\text{п}} < 1$.

Таблица 10.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Высота водослива, см	P	
2	Геометрический напор, см	H	
3	Изменение уровня воды в баке, см	S	
4	Время наблюдения за уровнем, с	t	
5	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
6	Скорость потока перед водосливом, см/с	$V = Q/[b(H + P)]$	
7	Полный напор, см	$H_0 = H + \frac{\alpha V^2}{2g}$	
8	Коэффициент расхода опытный	$m = Q/(b\sqrt{2g} H^{1,5})$	
9	Коэффициент расхода расчётный	$m^* = 0,40 + \frac{0,05H}{P}$	

Примечание. Размеры сечения бака: $A = \dots$ см; $B = \dots$ см; ширина водослива $b = \dots$ см; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; ускорение свободного падения $g = 981$ см/с².

10.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 5, представленном на рисунке общего вида и схемы устройств.

1. Привести устройство в исходное состояние, для чего установить его на стол так, чтобы водослив с тонкой стенкой

находился сверху (в верхней части щелевого лотка). Подождать, пока вся жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в его вертикальной плоскости.

3. Наблюдать картину течения воды через водослив с тонкой стенкой (рис. 10.2). Выяснить влияние наклона устройства влево и вправо на отрыв струи от стенки и положение гидравлического прыжка за водосливом.



Рис. 10.2. Картина течения жидкости через водослив с тонкой стенкой в устройстве № 5

4. Повторить операции по пп. 1 и 2, после чего измерить геометрический напор H (см. рис. 10.1) на водосливе с тонкой стенкой и время t изменения уровня в баке со шкалой на произвольно выбранную величину S , например на 5 см.

5. Замерить высоту водослива P . Размеры горизонтального сечения бака A, B и ширина водослива (щелевого лотка) b указаны на корпусе устройства.

6. Результаты измерений занести в табл. 10.1. Сделать вычисления и сравнить опытные и расчётные значения коэффициентов расхода.

Контрольные вопросы

1. Что такое нормальный водослив?
2. Напишите формулу для определения расхода через водослив.
3. Как проявляется подтопление водослива?
4. Укажите условия подтопления водослива с тонкой стенкой.
5. Как учитывается в расчетах влияние подтопления на пропускную способность водослива?
6. Изобразите схемы потока через неподтопленный и подтопленный прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой.

Практическая работа № 11

ИЗУЧЕНИЕ ВОДОСЛИВА С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Цель работы. Изучение картины течения воды через водослив с широким порогом, определение коэффициента расхода, построение кривой свободной поверхности на пороге водослива и сравнение результатов опыта с расчётными величинами.

11.1. Общие сведения

Водосливом с широким порогом называют водослив, у которого толщина стенки (длина горизонтального порога)

$$\delta > 2H,$$

где H – геометрический напор. Такие водосливы наиболее часто применяют в гидротехнической практике для водозаборных и водосборных сооружений. Типичные схемы водослива с широким порогом приведены на рис. 11.1, где $K-K$ – линия критических глубин. Форма свободной поверхности потока на водосливе с широким порогом зависит в основном от величины δ/H .

Для короткого водослива (рис. 11.1, *a*) устанавливается единая кривая спада с непрерывным понижением глубины. Для нормального водослива (рис. 11.1, *б*) наблюдается кривая спада до сжатого сечения – h_c , затем следует кривая подпора до глубины h , которая меньше или равна критической h_k . При дальнейшем увеличении относительной длины порога происходит переход от бурного потока через гидравлический прыжок к спокойному течению. На рис. 11.1, *в* приведена схема потока для длинного водослива с гидравлическим прыжком в сжатом сечении. На рис. 11.1, *г* представлена схема подтопленного водослива. Условие подтопления обычно записывают в виде $h_{п} > 0,8H$.

Как указывалось выше, расход воды через неподтопленный водослив определяется формулой

$$Q = mb\sqrt{2g} H_0^{1,5}, \quad (2.2.1)$$

где m – коэффициент расхода; его расчетное значение m^* для водослива с широким порогом определяется в инженерной практике по формуле Смыслова, приведенной в табл. 11.1.

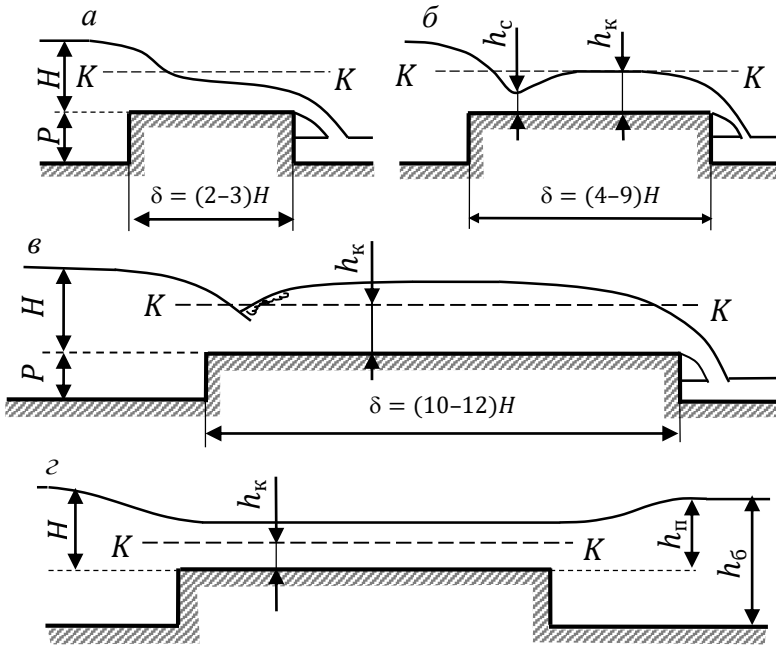


Рис. 11.1. Водосливы с широким порогом

Таблица 11.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Высота водослива, см	P	
2	Толщина водослива, см	δ	
3	Геометрический напор, см	H	
4	Изменение уровня воды в баке, см	S	

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
5	Время наблюдения за уровнем, с	t	
6	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
7	Критическая глубина, см	$h_k = \sqrt[3]{\alpha Q^2 / (gb^2)}$	
8	Скорость потока до водослива, см/с	$V = Q/[b(H + P)]$	
9	Полный напор, см	$H_0 = H + \frac{\alpha V^2}{2g}$	
10	Коэффициент расхода опытный	$m = \frac{Q}{b\sqrt{2g} H^{1,5}}$	
11	Коэффициент расхода расчётный	$m^* = 0,30 + \frac{0,08}{1 + P/H}$	

Примечание. Размеры сечения бака: $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина водослива $b = \dots$ см; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; ускорение свободного падения $g = 981$ см/с².

11.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 5 (рисунок общего вида и схемы устройств).

1. Привести устройство в исходное состояние, для чего установить его на стол так, чтобы водослив с широким порогом был сверху, и подождать, пока жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в его вертикальной плоскости.

3. Наблюдать картину течения жидкости через водослив с широким порогом, наклоняя устройство то влево, то вправо.

4. Повторить операции по пп. 1, 2. Замерить геометрический напор H (рис. 11.1) и время t изменения уровня в баке со шкалой на произвольно выбранную величину S .

5. Замерить высоту P и толщину δ водослива. Размеры горизонтального сечения бака A , B и ширина водослива b указаны на корпусе устройства.

6. Результаты измерений занести в табл. 11.1, сделать вычисления и сравнить опытные и расчётные значения коэффициента расхода.

7. Повторить наблюдения за истечением через водослив с широким порогом, в ходе которого снять отметки h поверхности воды вдоль водослива (рис. 11.2) и занести их в табл. 11.2.

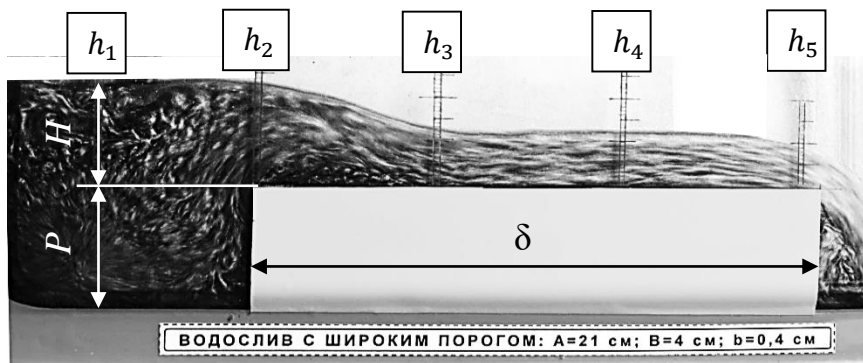


Рис. 11.2. Картина течения жидкости через водослив с широким порогом в устройстве № 5

Таблица 11.2

№ сечения	1	2	3	4	5
Отметка, см					

8. По результатам замеров отметок (глубин) построить в масштабе водослив с широким порогом и кривую свободной поверхности на водосливе с нанесением линии критических глубин, сравнить её с кривыми на рис. 11.1.

Контрольные вопросы

1. Что такое водослив с широким порогом? Область применения этого водослива.

2. Критерии подтопления водослива с широким порогом.
3. Изобразите кривые свободной поверхности при течении жидкости через неподтопленный водослив с широким порогом.
4. Изобразите кривую свободной поверхности при течении жидкости через подтопленный водослив с широким порогом.
5. Укажите значения коэффициента расхода водослива с широким порогом и факторы, влияющие на величину этого коэффициента.
6. Охарактеризуйте исследуемый водослив исходя из классификации водосливов.

Практическая работа № 12

ИЗУЧЕНИЕ ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Цель работы. Изучение картины течения воды через водослив практического профиля, опытное определение коэффициента расхода и сравнение его с литературными данными.

12.1. Общие сведения

Водосливы практического профиля занимают промежуточное положение между водосливами с тонкой стенкой и с широким порогом. Толщина их стенки составляет: $\delta = (0,5-2)H$.

Водосливы практического профиля могут быть с полигональным (прямоугольным, трапецеидальным) и с криволинейным (безвакуумные, вакуумные) очертаниями. Водосливы полигонального очертания применяются как водопропускные сооружения при малых расходах воды и как гасители энергии. Водосливы криволинейного очертания обычно служат в качестве водосливных плотин в гидроузлах.

Безвакуумные водосливы (рис. 12.1) имеют вертикальную (верховую) напорную грань, а сливная (низовая) грань очерчена по форме нижней поверхности струи, переливающейся через неподтопленный водослив с тонкой стенкой. Очертание такого водослива строится для определенной величины напора $H_{пр}$, называемого проектным (профилирующим), по опытным данным Кригера – Офицерова, и обеспечивает его плавное обтекание и атмосферное давление под струей. Коэффициент расхода такого водослива $m = 0,48-0,51$, что существенно больше, чем для водослива с тонкой стенкой и с широким порогом.

Если сливная поверхность срезана (на рис. 12.1 показана пунктиром), то под струей устанавливается давление менее атмосферного, водослив называется *вакуумным*, а коэффициент расхода водослива m увеличивается до $0,54-0,57$.

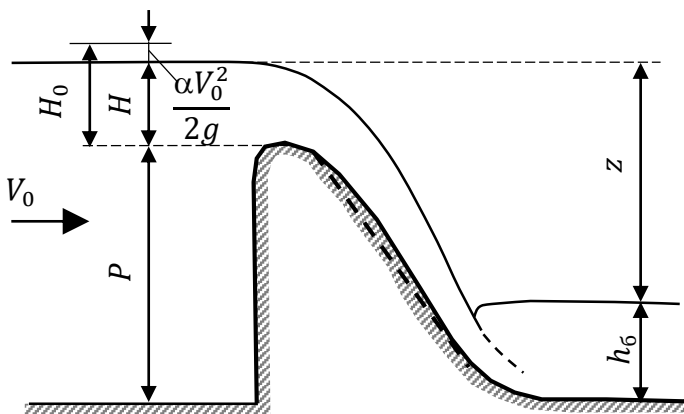


Рис. 12.1. Схема течения жидкости через водослив практического профиля с криволинейным очертанием

Условия подтопления водосливов практического профиля те же, что и для водосливов с тонкой стенкой.

Любой безвакуумный водослив может стать вакуумным из-за увеличения напора H , по сравнению с проектным $H_{пр}$, и отрыва струи от сливной грани с образованием вакуума. Ввиду опасности кавитационного разрушения водосливной поверхности при образовании вакуума, водосливы чаще всего проектируют безвакуумными.

12.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 6 (рисунок общего вида и схемы устройств).

1. Привести устройство в исходное состояние, для чего установить его на стол так, чтобы водослив практического профиля находился сверху, и подождать, пока вся жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в его вертикальной плоскости.

3. Наблюдать картину течения воды через водосливы практического профиля с криволинейным *12* и с полигональным *13* очертаниями, а также процесс гашения кинетической энергии водосливом *13*, играющим роль водобойной стенки (рисунок общего вида и схемы устройств, рис. 12.2).



Рис. 12.2. Картина течения жидкости в устройстве № 6 через водосливы практического профиля с криволинейным (*а*) и полигональным (*б*) очертаниями

4. Повторить действия по пп. 1, 2. Замерить геометрический напор H (рис. 12.1) и время t изменения уровня воды в баке со шкалой на произвольно выбранную величину S , например на 5 см.

5. Замерить высоту водослива P . Размеры сечения бака A , B и ширина водослива b указаны на корпусе устройства.

6. Результаты измерений занести в табл. 12.1, сделать вычисления и сравнить опытные и справочные значения коэффициентов расхода.

Таблица 12.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Высота водослива, см	P	
2	Геометрический напор, см	H	
3	Изменение уровня воды в баке, см	S	

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
4	Время наблюдения за уровнем, с	t	
5	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
6	Скорость потока перед водосливом, см/с	$V = Q/[b(H + P)]$	
7	Полный напор, см	$H_0 = H + \frac{\alpha V^2}{2g}$	
8	Коэффициент расхода опытный	$m = Q/(b\sqrt{2g} H^{1.5})$	
9	Коэффициент расхода справочный	m^*	

Примечание. Размеры сечения бака $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина водослива $b = \dots$ см; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; ускорение свободного падения $g = 981$ см/с².

Контрольные вопросы

1. Что такое водослив практического профиля? Его применение.
2. Условия подтопления водослива практического профиля.
3. Как строится профиль криволинейного безвакуумного водослива практического профиля?
4. Напишите формулу для определения расхода через водослив практического профиля.
5. Какие факторы влияют на величину коэффициента расхода водослива практического профиля?
6. Что такое перепад в сооружении z , глубина подтопления $h_{\text{п}}$ и проектный напор $H_{\text{пр}}$?
7. Когда безвакуумный водослив может стать вакуумным?

Практическая работа № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА

Цель работы. Изучение картины гидравлического прыжка, определение его параметров и сравнение их с литературными данными.

13.1. Общие сведения

Гидравлический прыжок представляет собой форму перехода потока из бурного состояния в спокойное. Этот переход сопровождается резким возрастанием глубины потока от величины h' , меньшей критической глубины h_c , до величины h'' , большей критической. Глубины h' и h'' называются, соответственно, первой и второй сопряжёнными глубинами. Гидравлический прыжок возникает после водосливных плотин, различных водомерных лотков и водосливов, дорожных труб и т. п.

Схема гидравлического прыжка, возникающего при истечении жидкости из-под щита, приведена на рис. 13.1.

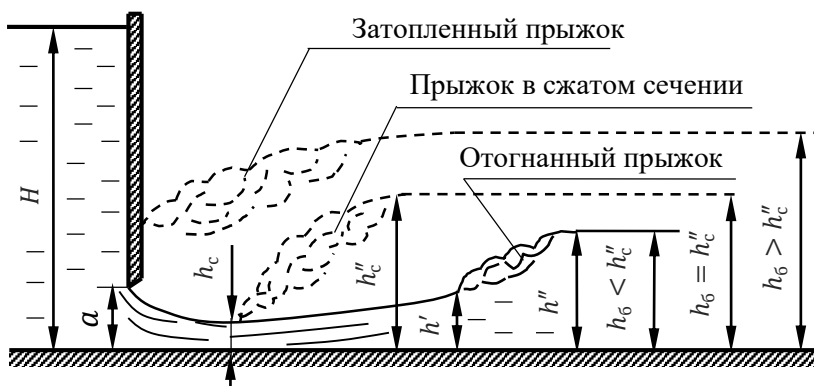


Рис. 13.1. Виды гидравлических прыжков

В гидравлическом прыжке различают две зоны. В верхней зоне образуется аэрированный вращающийся водяной валец, а в нижней наблюдается поступательное движение воды.

В зависимости от положения начала прыжка в нижнем бьефе относительно сжатого сечения потока различают *отогнанный* (от сжатого сечения) прыжок, прыжок *в сжатом сечении* (надвинутый прыжок) и *затопленный прыжок* (рис. 13.1).

В инженерной практике для определения вида прыжка рассчитывается вторая сопряжённая глубина h_c'' относительно глубины в сжатом сечении h_c , т. е. такая глубина в нижнем бьефе h_6 , при которой прыжок начинается в сжатом сечении, а $h' = h_c$:

$$h_c'' = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_c} \right)^3} - 1 \right], \quad h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}, \quad (13.1)$$

где Q – расход воды; b – ширина потока (лотка); $g = 981 \text{ см/с}^2$; h_c – глубина в сжатом сечении.

Сравнение h_c'' с бытовой глубиной h_6 позволяет определить вид прыжка: при $h_6 < h_c''$ – отогнанный (от сжатого сечения) прыжок; при $h_6 = h_c''$ – прыжок в сжатом сечении; при $h_6 > h_c''$ – затопленный прыжок.

13.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 6 (рисунок общего вида и схемы устройств).

1. Установить устройство на стол так, чтобы модель щита оказалась сверху, и подождать, пока вся жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в вертикальной плоскости и небольшим поворотом его влево или вправо установить после щита отогнанный гидравлический прыжок (рис. 13.1, 13.2, а), наблюдать его, при этом замерить бытовую глубину (глубину за прыжком) h_6 и время t изменения уровня в баке со шкалой на произвольную величину S .



Рис. 13.2. Виды гидравлического прыжка в устройстве № 6:

a – отогнанный от сжатого сечения; *б* – у сжатого сечения; *в* – надвинутый на сжатое сечение (затопленный)

3. Повторить действия по пп. 1 и 2, создав в канале прыжок у сжатого сечения (рис. 13.2, *б*), а затем провести аналогичный опыт при затопленном прыжке (рис. 13.2, *в*).

4. Результаты занести в табл. 13.1, сделать вычисления и проанализировать их.

Таблица 13.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Изменение уровня воды в баке, см	S	
2	Время наблюдения за уровнем, с	t	
3	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
4	Глубина в сжатом сечении, см	$h_c = \varepsilon a$	
5	Критическая глубина, см	$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$	
6	Сопряжённая глубина, см	$h_c'' = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_c} \right)^3} - 1 \right]$	
7	Отогнанный прыжок Бытовая глубина, см	h_6	
8	Критерии прыжка	$h_6 < h_c''$	
9	Прыжок в сжатом сечении Бытовая глубина, см	h_6	
10	Критерии прыжка	$h_6 = h_c''$	
11	Затопленный прыжок Бытовая глубина, см	h_6	
12	Критерии прыжка	$h_6 > h_c''$	

Примечание. Размеры сечения бака $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина лотка $b = \dots$ см; высота отверстия под щитом $a = \dots$ см; $\varepsilon = 0,62$; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; $g = 981 \text{ см/с}^2$.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидравлический прыжок?
2. Изобразите схему и структуру гидравлического прыжка.
3. Перечислите основные параметры прыжка.
4. Что такое сопряженные глубины и как они определяются?
5. Как определить вид гидравлического прыжка?
6. Как изменяется вид прыжка в устройстве № 6?
7. Как в работе определяется глубина в сжатом сечении?

Практическая работа № 14 ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ-ПОД ЩИТА

Цель работы. Наблюдение истечения воды из-под щита в горизонтальном прямоугольном русле, определение при свободном истечении опытного и расчетного значений коэффициента расхода и их сравнение.

14.1. Общие сведения

Отверстия на многих водозаборных и водопропускных гидротехнических сооружениях частично или полностью перекрываются затворами (щитами).

Рассмотрим истечение через отверстие под плоским вертикальным щитом в прямоугольном горизонтальном русле шириной b . Если уровень воды за щитом (в нижнем бьефе) не влияет на пропускную способность отверстия, то истечение называется *свободным*. Такое истечение наблюдается, когда в канале за щитом устанавливается безпрыжковое сопряжение потока в нижнем бьефе при $h_б < h_к$ (рис. 14.1) и в случае образования отогнанного прыжка или прыжка у сжатого сечения (см. рис. 13.1, 13.2, а, б).

Расход воды при свободном истечении из-под щита

$$Q = \mu ab \sqrt{2g(H_0 - h_c)}, \quad (14.1)$$

где μ – коэффициент расхода отверстия при свободном истечении;

$$\mu = \varphi \epsilon, \quad (14.2)$$

φ – коэффициент скорости, который для рассматриваемого случая можно принимать равным: $\varphi = 0,95-0,97$; H_0 – напор перед щитом с учетом скорости подхода $V = Q/(bH)$;

$$H_0 = H + \frac{\alpha V^2}{2g}, \quad (14.3)$$

где H – глубина потока перед щитом; h_c – глубина потока в сжатом сечении; определяется по формуле

$$h_c = \varepsilon a, \quad (14.4)$$

где a – открытие щита; ε – коэффициент вертикального сжатия струи. В соответствии с теоретическим решением Н.Е. Жуковского и экспериментальными исследованиями, он зависит от относительного открытия щита a/H (табл. 14.1).

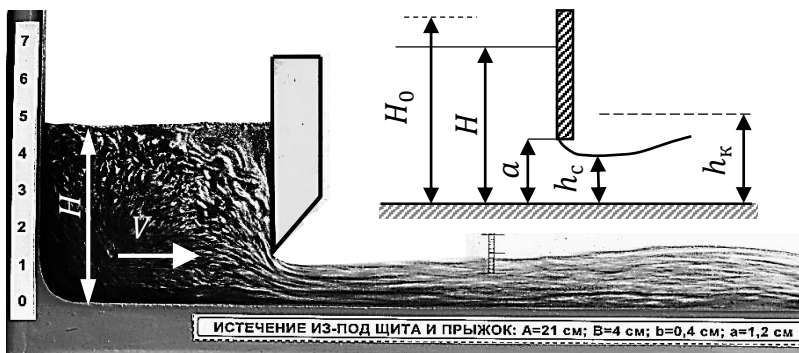


Рис. 14.1. Свободное истечение из-под щита в устройстве № 6

Таблица 14.1

a/H	ε	a/H	ε	a/H	ε
0,10	0,615	0,30	0,625	0,60	0,660
0,15	0,618	0,40	0,630	0,65	0,675
0,20	0,620	0,50	0,645	0,70	0,690

Несвободное истечение возникает, если отверстие оказывается затопленным за щитом. Это происходит при образовании затопленного гидравлического прыжка или при высоте поднятия щита $a > h_c$ и глубине в нижнем бьефе $h_6 > a$, когда поток за

щитом не переходит в бурное состояние, и поэтому гидравлический прыжок вообще не образуется. Для определения расхода при малых степенях затопления прыжка в формулу (14.1) вместо величины h_c вводится глубина h_z в начале прыжка (в плоскости сжатого сечения). В остальных случаях вместо h_c используется бытовая глубина в нижнем бьефе h_b . Коэффициент расхода μ может определяться так же, как при свободном истечении.

14.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 6 (рисунок общего вида и схемы устройств).

1. Установить устройство на стол так, чтобы модель щита оказалась сверху, и подождать, пока вся жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в вертикальной плоскости.

3. Наблюдать поток воды из-под щита, создавая небольшим поворотом устройства влево и вправо свободную и несвободную формы истечения.

4. Повторить действия по пп. 1 и 2, создав в опытном канале свободное истечение из-под щита. Наблюдать его, при этом замерить напор перед щитом H и время t изменения уровня в баке со шкалой на произвольную величину S . Линейкой замерить высоту отверстия под щитом a .

5. Результаты измерений занести в табл. 14.2, сделать вычисления и проанализировать их.

Таблица 14.2

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Открытие щита, см	a	
2	Геометрический напор, см	H	
3	Изменение уровня воды в баке, см	S	
4	Время наблюдения за уровнем, с	t	

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
5	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
6	Скорость подхода, см/с	$V = Q/(bH)$	
7	Полный напор, см	$H_0 = H + \frac{\alpha V^2}{2g}$	
8	Коэффициент расхода опытный	$\mu = \frac{Q}{ab\sqrt{2g(H_0 - h_c)}}$	
9	Относительное открытие шита	a/H	
10	Коэффициент вертикального сжатия струи по табл. 14.1	ε	
11	Коэффициент расхода расчетный (справочный)	$\mu^* = \varphi\varepsilon$	
12	Относительное отклонение, %	$\Delta\mu = \frac{\mu^* - \mu}{\mu^*} 100$	

Примечание. Размеры сечения бака $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина опытного канала $b = \dots$ см; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; $g = 981$ см/с²; коэффициент скорости $\varphi = 0,95$.

Контрольные вопросы

1. Что такое свободное и несвободное истечение воды из-под шита?
2. Изобразите схему свободного истечения из-под шита в горизонтальном русле.
3. Напишите формулу для определения расхода воды при свободном истечении из-под шита в горизонтальном русле.
4. Чем отличается формула для расхода при несвободном истечении из-под шита в горизонтальном русле?
5. Изобразите схему несвободного истечения из-под шита в горизонтальном русле.
6. От чего зависит и как выражается коэффициент расхода при истечении из-под шита в горизонтальном русле?
7. Как определить опытным путем величину коэффициента расхода при истечении из-под шита?

Практическая работа № 15 ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВОДОПРОПУСКНОЙ ТРУБЫ

Цель работы. Наблюдение работы водопропускной трубы в различных режимах и определение напора перед ней опытным и расчётным способами.

15.1. Общие сведения

Различают следующие режимы работы водопропускных труб.

Безнапорный режим (рис. 15.1, а). Входное сечение трубы не затоплено, на всём протяжении поток имеет свободную поверхность. Труба в этом режиме работает аналогично водосливу с широким порогом при наличии бокового сжатия.

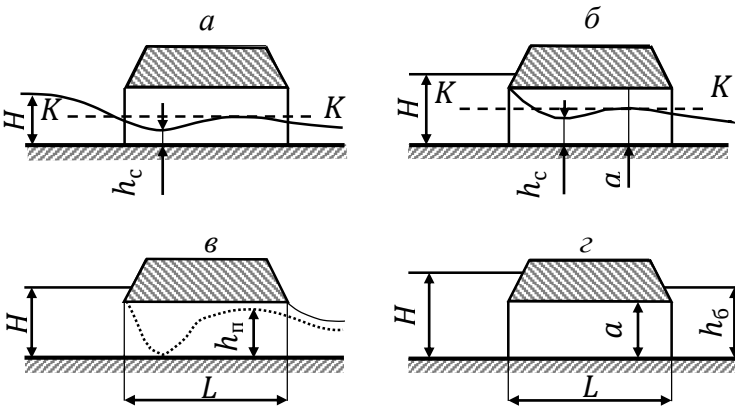


Рис. 15.1. Режимы работы водопропускных труб

Расход в прямоугольной трубе определится как

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{1,5}, \quad (15.1)$$

где m – коэффициент расхода; b – ширина трубы; H_0 – полный напор перед трубой. Значение коэффициента расхода в инженерных расчётах можно принять для труб без оголовка: $m = 0,31$. Специальные оголовки могут увеличить его до 0,36.

Полунапорный режим (рис. 15.1, б). Входное сечение трубы затоплено, но поток на всём протяжении трубы имеет свободную поверхность. Труба работает по схеме истечения через отверстие, поэтому расход воды определяется по формуле:

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2g(H_0 - \varepsilon a)}, \quad (15.2)$$

где H_0 – полный напор перед трубой; μ_0 – коэффициент расхода входного отверстия; $\omega = ab$ – площадь сечения трубы; a – высота трубы; $\varepsilon = h_c / a$ – коэффициент вертикального сжатия потока; h_c – глубина в сжатом сечении. Для инженерных расчётов можно принять: $\mu_0 = 0,63$; $\varepsilon = 0,86$.

Напорный режим (рис. 15.1, в). Труба работает по схеме насадка, т. е. полным сечением по всей своей длине или большей её части. Выходное сечение трубы не затоплено. Для такого режима работы характерно наличие вакуума в трубе. На рис. 15.1, в штриховой линией нанесено ориентировочно положение пьезометрической линии. Для количественной характеристики вакуума вводится величина $\eta = h_{\text{п}} / a$ – отношение пьезометрического напора на выходе из трубы к высоте трубы.

Расход определяется по формуле:

$$Q = \mu_{\text{н}} \omega \sqrt{2g(H_0 + iL - \eta a)}, \quad (15.3)$$

где i – уклон трубы; L – длина трубы; $\mu_{\text{н}}$ – коэффициент расхода, определяемый по формуле:

$$\mu_{\text{н}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L}{4R}}}. \quad (15.4)$$

Здесь $\alpha = 1,1$ – коэффициент Кориолиса; $\xi_{\text{вх}} = 0,5$ – коэффициент сопротивления входа в трубу; R – гидравлический радиус трубы;

$\lambda = 0,025$ – коэффициент гидравлического трения. Для инженерных расчётов можно принять $\eta = 0,85$.

Напорный – затопленный режим (рис. 15.1, з). Труба работает полным сечением, а выходное сечение полностью затоплено.

Расход определяется по формуле:

$$Q = \mu_3 \omega \sqrt{2g(H_0 + iL - h_6)}, \quad (15.5)$$

где h_6 – бытовая глубина потока после трубы; μ_3 – коэффициент расхода, определяемый по формуле:

$$\mu_3 = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{ВВЫХ}} + \xi_{\text{ВХ}} + \lambda \frac{L}{4R}}}, \quad (15.6)$$

где $\xi_{\text{ВВЫХ}} = 1,0$ – коэффициент сопротивления выхода из трубы.

Остальные величины в (15.5) и (15.7) аналогичны вышеописанным.

Безнапорный режим работы наблюдается, когда напор перед трубой $H \leq 1,2 a$, *полунапорный режим* – при $H > 1,2 a$. *Напорный режим* возникает в трубах с обтекаемыми оголовками при выполнении условий:

$$H > 1,4 a; \quad i \leq I = Q^2 / (\omega^2 C^2 R),$$

где i – уклон дна трубы; I – гидравлический уклон, называемый уклоном трения; Q – расчетный расход; ω – площадь живого сечения потока в трубе.

При уклонах дна $i = 0$ и $i \leq i_{\text{тр}}$ труба будет *подтопленной*, если

$$h_{\text{п}} \geq 0,8H_0 \text{ или } h_{\text{п}} \geq 1,3h_{\text{к}},$$

где $h_{\text{п}}$ – глубина подтопления (разность отметок уровня воды в нижнем бьефе и дна трубы в выходном сечении); H_0 – полный напор перед трубой; $h_{\text{к}}$ – критическая глубина в трубе. При проведении расчётов в лабораторной работе следует, для упрощения

вычислений, полный напор H_0 заменить геометрическим напором H , так как они практически не отличаются ввиду малой скорости потока перед трубой.

15.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 7 (см. рисунок общего вида и схемы устройств).

1. Привести устройство в исходное положение. Для этого устройство расположить так, чтобы наклонная труба находилась вверх (над горизонтальной трубой) и подождать пока жидкость перетечёт из верхнего бака в нижний.

2. Перевернуть устройство в его плоскости, наблюдать безнапорное течение жидкости в трубе (рис. 15.2, а) и при этом замерить напор H перед трубой и время t изменения уровня жидкости в баке со шкалой на величину S .

3. Результаты измерений и геометрические параметры A, B, b (указаны на корпусе устройства) занести в табл. 15.1 и по указанному в ней порядку найти расчётный напор (глубину) перед трубой и сравнить его с измеренным.

Таблица 15.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Глубина перед трубой опытная, см	H	
2	Изменение уровня воды в баке	S	
3	Время наблюдения за уровнем, с	t	
4	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
5	Коэффициент расхода (справочное значение)	m	
6	Глубина перед трубой расчётная, см	$H' = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{2/3}$	
7	Относительное отклонение, %	$\delta = \frac{H - H'}{H} 100$	

Примечание. Размеры сечения бака $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина трубы $b = \dots$ см; $g = 981$ см/с².

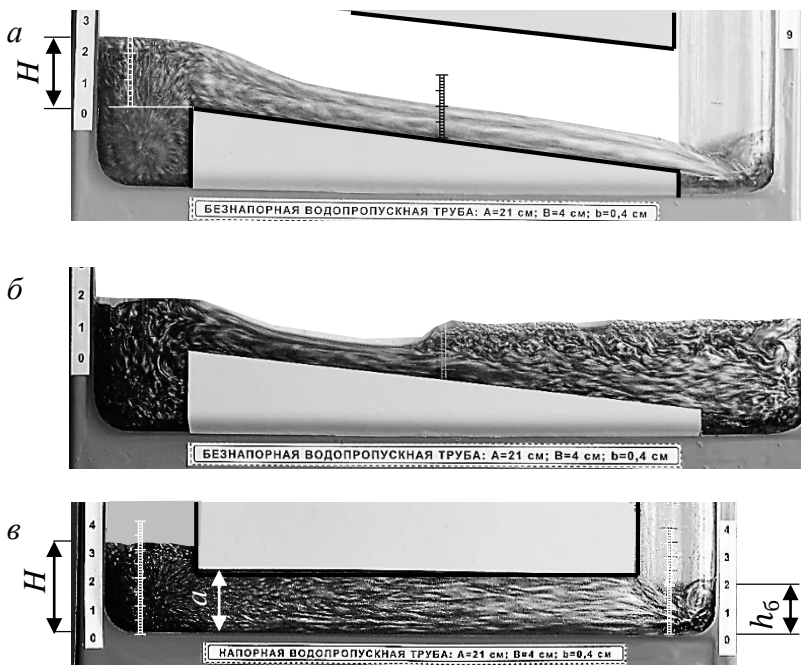


Рис. 15.2. Режимы работы моделей труб в устройстве № 7

4. Перевернуть устройство, наблюдать напорное течение в трубе и замерить величины H , h_6 , S , t , a (рис. 15.2, в).

5. Результаты замеров и известные геометрические параметры занести в табл. 15.2. По указанному в ней порядку найти расчётный напор (глубину) перед напорной трубой и сравнить его с измеренным.

Таблица 15.2

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Глубина перед трубой опытная, см	H	
2	Глубина после трубы, см	h_6	
3	Изменение уровня в баке, см	S	

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
4	Время наблюдения за уровнем, с	t	
5	Размеры сечения бака, см	A, B	
6	Размеры поперечного сечения трубы, см	a, b	
7	Длина трубы, см	L	
8	Гидравлический радиус, см	$R = 0,5ab/(a + b)$	
9	Коэффициент расхода	$\mu_H = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{вх} + \lambda \frac{L}{4R}}}$	
10	Глубина перед трубой расчётная, см	$H' = \eta a + \left(\frac{Q}{\mu_H \omega \sqrt{2g}} \right)^2$	
11	Относительное отклонение, %	$\delta = \frac{H - H'}{H} 100$	

Примечание. Коэффициент входа в трубу принять $\xi_{вх} = 0,5$; $g = 981 \text{ см/с}^2$; коэффициент трения (Дарси) $\lambda = 0,025$.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена дорожная водопропускная труба?
2. По каким признакам классифицируются дорожные трубы?
3. Каким устройствам можно уподобить трубу при ее работе в безнапорном, полунпорном и напорном режимах?
4. Укажите условия работы трубы в различных режимах.
5. Напишите и поясните расчетные зависимости для труб, работающих в безнапорном, полунпорном и напорном режимах.
6. От каких факторов зависит коэффициент расхода трубы?
7. Изобразите схемы потока жидкости в дорожной трубе, работающей в различных режимах.

Практическая работа № 16 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ В КАНАЛЕ

Цель работы. Экспериментальное определение коэффициента шероховатости стенок канала прямоугольного сечения и сравнение его с литературными данными.

16.1. Общие сведения

Безнапорное равномерное течение характеризуется наличием свободной поверхности и постоянством скорости и глубины по длине потока. Глубина при этом называется *нормальной* и обозначается через h_0 . Такое движение жидкости устанавливается при неизменности поперечного сечения, шероховатости стенок и продольного уклона канала по его длине.

При расчётах равномерного течения воды в различных каналах и трубах широко используется формула Шези:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (16.1)$$

где Q – расход воды; ω – площадь живого сечения потока; C – коэффициент Шези; i – продольный уклон канала; χ – смоченный периметр живого сечения; $R = \omega / \chi$ – гидравлический радиус.

Величина C зависит от формы и размеров канала, а также от шероховатости его стенок. Для вычисления коэффициента Шези предложен ряд эмпирических формул.

Наибольшее распространение получила формула Маннинга соответственно для метровых и сантиметровых размеров:

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}; \quad C = \frac{4,64R^{\frac{1}{6}}}{n}, \quad (16.2)$$

где 4,64 – коэффициент перевода единиц измерения; n – коэффициент шероховатости.

Если геометрические параметры выражены в сантиметрах, то из (16.1) и (16.2) получаем формулу для определения коэффициента шероховатости стенок канала n :

$$n = \frac{4,64\omega R^{\frac{2}{3}}\sqrt{i}}{Q}. \quad (2.7.3)$$

Продольный уклон канала определяется по формуле

$$i = Z/L,$$

где Z – перепад отметок в начале и в конце канала; L – длина канала. Глубину потока h_0 , учитывая малый уклон, можно определять по вертикали, а не по нормали к дну канала.

16.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 7 (см. рисунок общего вида и схемы устройств).

1. Расположить устройство в вертикальной плоскости так, чтобы наклонная труба находилась вверху (над горизонтальной трубой), и подождать пока жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в его плоскости, наблюдать поток на участке равномерного течения и измерить на нем нормальную глубину h_0 (рис. 16.1), а также величины H, S, t, Z, L .

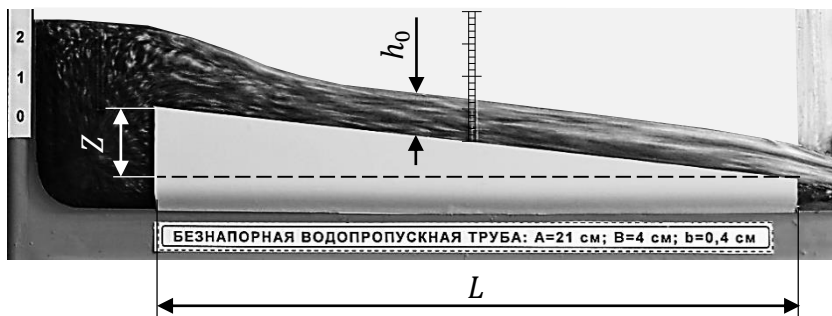


Рис. 16.1. Схема замеров для определения коэффициента шероховатости стенок канала в устройстве № 7

3. Результаты измерений и геометрические параметры A, B, b (указаны на корпусе устройства) занести в табл. 16.1. По указанному в ней порядку определить коэффициент шероховатости стенок канала, сравнить его со справочным значением для стеклянной стенки (обычно $n = 0,010\text{--}0,012$).

Таблица 16.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин
1	Нормальная глубина, см	h_0	
2	Изменение уровня в баке, см	S	
3	Время наблюдения за уровнем, с	t	
4	Перепад отметок дна канала, см	Z	
5	Длина канала, см	L	
6	Уклон канала	$i = Z/L$	
7	Расход жидкости, см ³ /с	$Q = ABS/t$	
8	Площадь живого сечения, см ²	$\omega = bh$	
9	Смоченный периметр, см	$\chi = b + 2h$	
10	Гидравлический радиус, см	$R = \omega/\chi$	
11	Коэффициент шероховатости опытный	$n = \frac{4,64\omega R^{\frac{2}{3}}\sqrt{i}}{Q}$	
12	Коэффициент шероховатости справочный	n^*	

Примечание. Размеры сечения бака $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина канала $b = \dots$ см.

Контрольные вопросы

1. Что характеризует коэффициент шероховатости n ? Какие факторы влияют на его величину?
2. Как устанавливают величину n при проектировании гидротехнических сооружений?
3. Как определяют величину коэффициента шероховатости n опытным путем?
4. Напишите формулу Шези.
5. Изобразите продольный разрез потока в открытом русле между двумя сечениями при равномерном движении жидкости.

III. РАБОТЫ ПО МОСТОВОЙ ГИДРАВЛИКЕ НА ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-3»

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-3»

Лаборатория «Капелька-3» позволяет выполнять наглядные лекционные демонстрации и три учебные лабораторно-практические работы *по мостовой гидравлике*.

Лаборатория состоит из трех прозрачных пластмассовых устройств № 8, 9 и 10 для изучения, соответственно, малых мостов, мостовых переходов и русловых процессов (рис. 1). Они заполнены водой с микроскопическими частицами алюминия и работают по принципу песочных часов.



Рис. 1. Общий вид учебной лаборатории «Капелька-3», состоящей из устройств № 8, 9 и 10

Устройства содержат по два бака 1 и 2, соединённых между собой двумя опытными каналами 3 и 4 через отверстия 5, 6 и 7, 8 (рис. 2). Опытный канал 4 в устройстве № 8 является моделью

русла неподтопленного малого моста (рис. 2, *a*), а канал 3 – его моделью при подтоплении (рис. 2, *б*). В устройстве № 9 опытные каналы служат для иллюстрации гидравлических явлений на мостовом переходе, а в устройстве № 10 они являются моделями русел с различными типами русловых процессов.

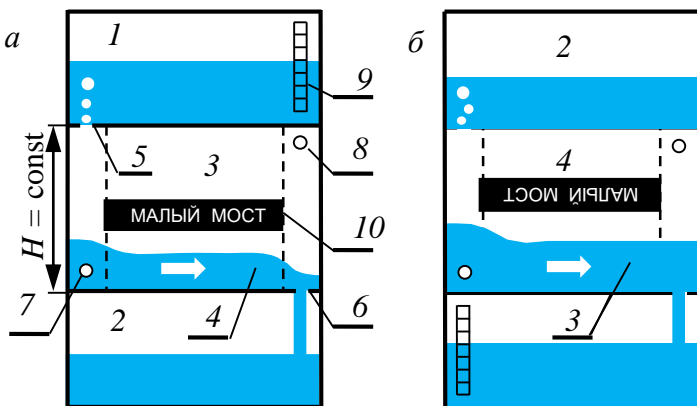


Рис. 2. Схема устройства № 8 для изучения малых мостов:

- 1, 2 – баки; 3, 4 – опытные щелевые каналы (русла); 5, 6 и 7, 8 – отверстия;
9 – уровнемерная шкала; 10 – малый мост

При перевёртывании устройства № 8 жидкость из верхнего бака 1 поступает через отверстие 7 в опытный канал 4 и через отверстие 6 – в нижний бак 2 (рис. 2, *a*). При этом жидкость вытесняет из него воздух через отверстие 8, опытный канал 3 и отверстие 5 – в верхний бак 1 в виде пузырьков. Пузырьковый перепуск воздуха обеспечивает в устройстве при наблюдениях установившееся свободное течение в канале 4. При очередном перевертывании устройства наблюдают подтопленное течение уже в другом его опытном канале – в канале 3 (рис. 2, *б*).

Глубины потока измеряют по шкалам на стенке опытного канала. Расход определяют по времени наполнения или опорожнения заданного объема бака со шкалой 9. Аналогично работают и другие устройства лаборатории «Капелька-3».

Практическая работа № 17 ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИКИ МАЛЫХ МОСТОВ

Цель работы. Изучение картины свободного и подтопленного течения воды под малым мостом с определением глубины воды перед мостом путем измерения и расчета.

17.1. Общие сведения

Мост – это сооружение, прокладывающее путь над препятствием, в частности через реки и другие водотоки (рис. 17.1, 17.2). Мост состоит из пролётных строений и опор. На пролётном строении расположены: проезжая часть для транспорта, пешеходные проходы, трубопроводы. Промежуточные опоры моста называют *быками*, а концевые – *устоями*.



Рис. 17.1. Думский мост на р. Ушайке (г. Томск, начало XX в.)

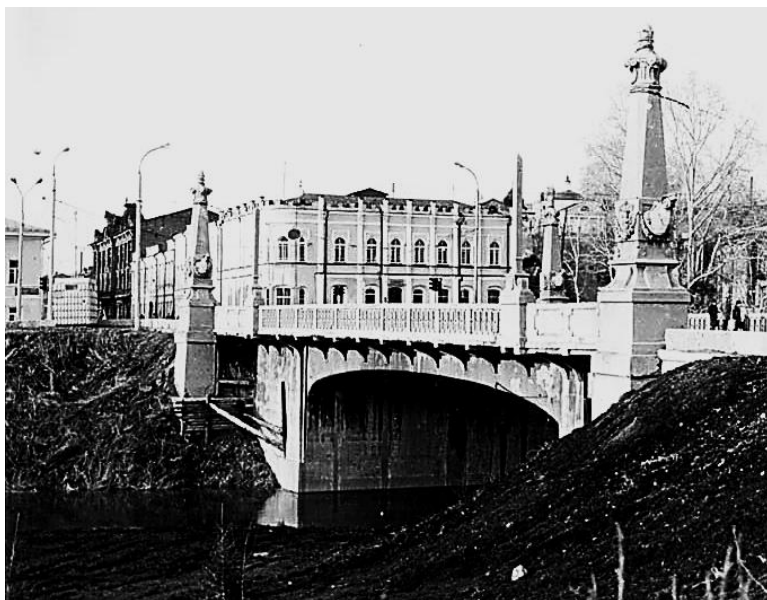


Рис. 17.2. Каменный мост на р. Ушайке – памятник архитектуры (г. Томск, построен вместо Думского в 1916 г.)

Основными размерами моста являются его длина L и ширина отверстия b (расстояние между опорами по свободной поверхности). Мосты длиной до 25 м условно называют *малыми*, от 25 до 100 м – *средними*, а более 100 м – *большими*. Но в гидравлике используют другую классификацию. *Малыми* именуют все мосты с *укрепленными* (неразмываемыми) подмостовыми руслами, так как укрепление целесообразно только под мостами малой длины. А все мосты с *неукрепленными* (размываемыми) руслами считают *большими*. Наиболее часто малые мосты сооружают из сборных железобетонных элементов заводского изготовления с пролетными строениями длиной 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 и 24 м, т. е. с модулем 3 м. Подмостовые русла обычно имеют прямоугольное или трапецидальное поперечные сечения.

Основной целью гидравлического расчета малого моста является определение его отверстия b и напора H перед ним (отметки подпертого уровня). Условия протекания воды через эти мосты аналогичны условиям протекания воды через водослив с широким порогом, несмотря на то, что порог под мостами отсутствует, а поток испытывает в основном боковое сжатие. Поэтому в основе гидравлического расчета малых мостов лежит теория водослива с широким порогом.

Мосты могут работать по схеме неподтопленного или подтопленного водослива с широким порогом (рис. 17.3).

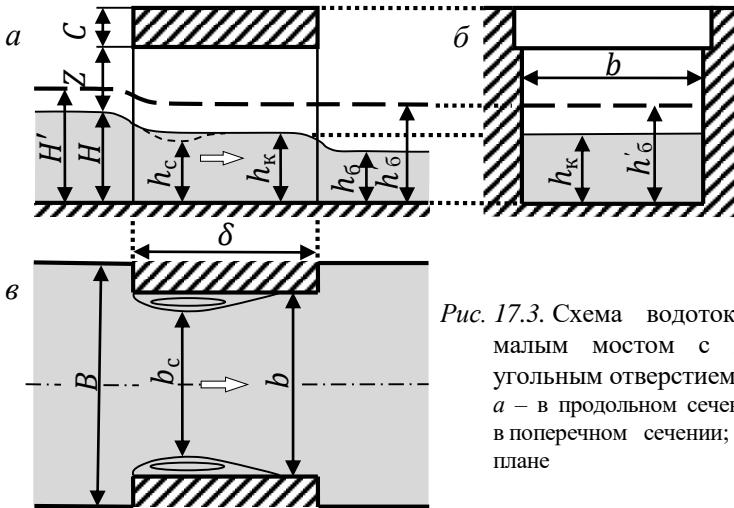


Рис. 17.3. Схема водотока под малым мостом с прямоугольным отверстием: а – в продольном сечении; б – в поперечном сечении; в – в плане

При *неподтопленном (свободном) течении* поверхность воды (на рис. 17.3, а показана сплошной линией) имеет перепады на входе и выходе из отверстия моста, а под мостом чаще устанавливается критическая глубина: $h_m = h_k$. В этом случае бытовая глубина h_6 в нижнем бьефе (за мостом) не оказывает влияния на положение уровня воды в верхнем бьефе (перед мостом). Этот режим течения наблюдается при условии, что $h_6 \leq 1,3h_k$.

Мост работает с *подтоплением*, если $h_6 > 1,3h_k$. В этом случае уровень воды под мостом (на рис. 17.3, *a* показан пунктиром) совпадает с уровнем воды в нижнем бьефе, т. е. под мостом устанавливается бытовая глубина $h_m = h_6$.

Расчет обычно ведется по допустимой неразмывающей скорости в расчетном сечении подмостового русла (в сечении с критической глубиной h_k или в сжатом сечении с глубиной h_c).

Расчет малого моста по критической глубине при прямоугольном сечении подмостового русла проводится в следующем порядке:

1. Сначала определяется бытовая глубина h_6 водотока за мостом одним из известных способов.

2. В зависимости от рода грунта или типа выбранного укрепления подмостового русла по справочным данным назначается допустимая (неразмывающая) скорость под мостом V_d .

3. Определяется критическая глубина потока под мостом:

$$h_k = V_d^2/g, \quad (17.1)$$

где g – ускорение свободного падения.

4. Устанавливается характер течения воды под мостом путем сравнения бытовой глубины h_6 с величиной $1,3h_k$.

Если $h_6 \leq 1,3h_k$, то течение воды под мостом – *свободное* (неподтопленное). В этом случае глубина под мостом h_m принимается равной критической глубине h_k : $h_m = h_k$.

При $h_6 > 1,3h_k$ течение воды под мостом будет *несвободным* (подтопленным), а глубина под мостом становится равной бытовой за мостом: $h_m = h_6$.

5. Из формул для расхода $Q = \omega V_d$ и площади живого сечения подмостового водотока $\omega = \varepsilon b h_m$ определяется ширина отверстия моста b (рис. 17.3, *б*):

$$b = Q/(\varepsilon h_m V_d), \quad (17.2)$$

где $\varepsilon = b_c/b$ – коэффициент сжатия потока в плане; для устоев с конусами $\varepsilon = 0,90$, для выступающих из конуса устоев $\varepsilon = 0,80$; b_c – ширина потока в сжатом сечении (рис. 17.3, в).

6. Принимается ближайшее к найденному b большее значение отверстия b_T из типового ряда отверстий мостов.

7. Уточняется скорость под мостом при типовом отверстии моста b_T для ранее принятого характера течения (свободного или несвободного) по соответствующей формуле:

$$V_T = \sqrt[3]{gQ/(\varepsilon b_T)}, \text{ или } V_T = Q/(\varepsilon h_6 b_T). \quad (17.3)$$

8. Определяется вновь критическая глубина при типовом отверстии:

$$h_{к.т} = V_T^2/g. \quad (17.4)$$

9. Проверяется сохранение схемы течения воды под мостом путем сравнения бытовой глубины h_6 с величиной $1,3h_{к.т}$.

10. Подсчитывается глубина воды перед мостом:

$$H = h_m + V_T^2/(2g\varphi^2), \quad (17.5)$$

где φ – коэффициент скорости, учитывающий потери напора в подмостовом русле; для устоев с конусами $\varphi = 0,90$, для выступающих из конуса устоев $\varphi = 0,85$.

11. Находится минимальная высота моста H_m (рис. 17.3, а):

$$H_m = H + Z + C, \quad (17.6)$$

где Z – возвышение пролетного строения над уровнем воды перед мостом; $Z = 0,5-1,0$ м; C – конструктивная (строительная) высота пролетного строения.

Расчет малого моста по глубине в сжатом сечении.

Схема протекания воды под мостом с образованием сжатого по вертикали сечения с глубиной h_c (см. рис. 17.3, а) характерна для относительно длинных ($\delta/H > 10$) водосливов, для отверстий мостов малых пролетов и труб. В этом случае расчетная формула

для расхода при свободном истечении через прямоугольное отверстие малого моста (аналогия – водослив с широким порогом) имеет вид:

$$Q = \varphi h_c b \sqrt{2 g(H - h_c)} = 1,33 b H^{3/2}, \quad (17.7)$$

где глубина в сжатом сечении принята $h_c = 0,5H$; коэффициент скорости $\varphi = 0,85$; ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Расчет с использованием этой формулы и соотношений $h_c = 0,9 h_k = 0,9 V_k^2/g = 0,73V_c^2/g$; $H = 2h_c = 1,45 V_c^2/g$ рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1) по допустимой неразмывающей скорости $V_d = V_c$ для выбранного типа укрепления русла под мостом находят напор

$$H = 1,45 V_d^2/g;$$

2) определяют ширину отверстия $b = Q/(1,33 H^{3/2})$ и выбирают его типовое значение b_T ;

3) пересчитывают напор (глубину воды перед мостом) для выбранного значения b_T по формуле (17.7):

$$H = 0,83(Q/b_T)^{2/3}.$$

Примечание. Если расчеты выполнять в сантиметровых размерах, тогда в формуле (17.7) $g = 981 \text{ см/с}^2$, откуда

$$H = 0,18(Q/b)^{2/3}. \quad (17.8)$$

17.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 8 в следующем порядке:

1. Привести устройство в исходное состояние. Для этого установить его на стол так, чтобы канал 4 с моделью неподтопленного моста находился сверху (см. рис. 2, б), и подождать, пока вся жидкость перетечет из верхнего бака 2 в нижний бак 1.

2. Перевернуть устройство в вертикальной плоскости и наблюдать свободное истечение (I случай) под моделью моста (рис. 2, а; 17.4, а).

3. Замерить геометрический напор H (рис. 17.4) перед мостом, глубину потока после моста h_6 и время t изменения уровня воды в баке со шкалой на произвольно выбранную величину S , например на 5 см. Если за время опорожнения верхнего бака не удалось произвести все указанные замеры, то действия по пп. 1–3 повторить.

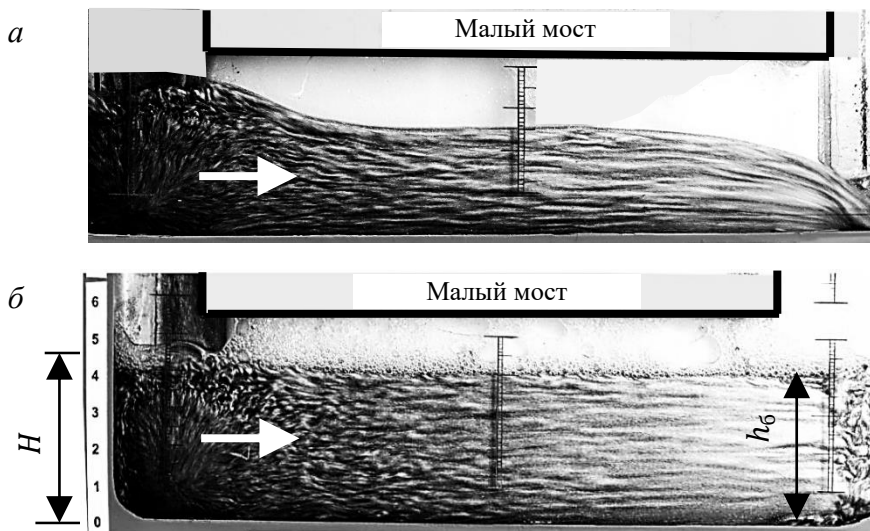


Рис. 17.4. Картина свободного (а) и подтопленного (б) истечения через отверстие моста

4. Результаты измерений и размеры (A, B, b), указанные на корпусе устройства № 8, занести в табл. 17.1.

Таблица 17.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин	
			I случай	II случай
1	Бытовая глубина, см	h_6		
2	Измеренный напор, см	H		
3	Изменение уровня в баке, см	S		

Окончание табл. 17.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение величин	
			I случай	II случай
4	Время изменения уровня, с	t		
5	Расход воды, см ³ /с	$Q = ABS/t$		
6	Критическая глубина, см	$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{\varepsilon g b^2}}$		
7	Критерий подтопления	$h_b \leq 1,3h_k$		
8	Расчетная глубина под мостом, см	$h_m = h_k$ или $h_m = h_b$		
9	Скорость под мостом, см/с	$V_m = \frac{Q}{\varepsilon h_m b}$		
10	Расчетный напор при $h_m = h_k$, см	$H_p = h_m + \frac{V_m^2}{2g\varphi^2}$		
11	Расчетный напор при $h_m = h_b$, см	$H_p = 0,18 \left(\frac{Q}{b}\right)^{2/3}$		

Примечания.

1. Принять $\varepsilon = 0,9$; $\varphi = 0,9$; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$; ускорение свободного падения $g = 981$ см/с².

2. Размеры сечения бака: $A = \dots$ см, $B = \dots$ см; ширина опытного канала (отверстия модели моста) $b = \dots$ см.

5. Сделать вычисления по формулам, соответствующим наблюдаемой схеме течения, и сравнить измеренное H и расчётное H_p значения напора перед мостом.

6. Перевернуть устройство № 8 в вертикальной плоскости, наблюдать подтопленное истечение (II случай) через отверстие моста (рис. 2, б; 17.4, б); выполнить все действия по пп. 3–5.

Контрольные вопросы

1. Какие мосты являются малыми с различных точек зрения?
2. Что понимается под термином «ширина отверстия» моста?

3. Что определяют при гидравлическом расчете малых мостов?
4. По принципу какого водослива работают малые мосты?
5. Какие схемы течения рассматривают в русле малого моста?
6. Что означает свободное и несвободное течение под мостом?
7. Как записывается критерий подтопления малого моста?
8. Каков порядок гидравлического расчета малого моста?
9. Как зависит глубина перед мостом от формы устоев?

Практическая работа № 18

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИКИ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Цель работы. Изучение процессов течения воды, размыва русла и основ гидравлических расчетов на мостовом переходе.

18.1. Общие сведения о мостовых переходах

Мостовой переход предназначен для проведения дороги над водным препятствием. Он представляет собой комплекс инженерных сооружений, включающий мост (рис. 18.1, 18.2), подходы к мосту, регулиционные и берегозащитные сооружения.



Рис. 18.1. Понтонный мост через р. Томь (г. Томск, 1950-е гг.)



Рис. 18.2. Мост на р. Томь (построен вместо понтонного в 1972 г.)

Мосты переходов содержат пролетное строение и опоры. Они обычно имеют размываемые (неукрепленные) подмостовые русла, поэтому, с гидравлической точки зрения, как упоминалось выше, являются *большими*. Укрепление русел при большой их ширине менее целесообразно по сравнению с сооружением опор, запроектированных с учетом глубины размыва русла. Как правило, в состав мостового перехода входит один мост.

Подходы к мосту от берегов речной долины, имеющей ширину B , выполняют в виде земляных насыпей I (рис. 18.3, *a*), которые перекрывают поймы реки. Между насыпями остается перекрываемое мостом водопропускное отверстие (*отверстие моста*) шириной B_M (расстояние между насыпями на отметке расчетного уровня воды). Оно обычно включает русло реки шириной B_{PM} и незначительную часть пойм ΔB . Насыпи заканчиваются конусами, закрывающими крайние опоры моста, – *устоями*.

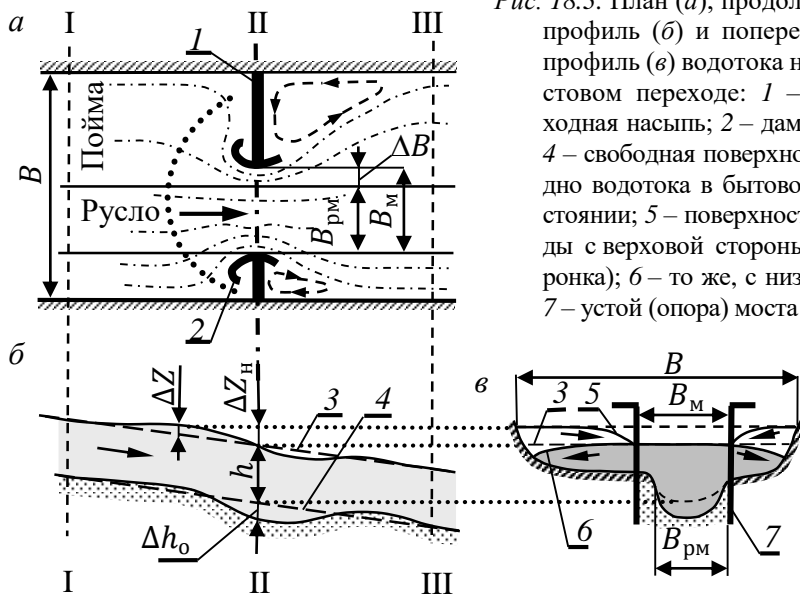


Рис. 18.3. План (*a*), продольный профиль (*б*) и поперечный профиль (*в*) водотока на мостовом переходе: 1 – подходная насыпь; 2 – дамба; 3, 4 – свободная поверхность и дно водотока в бытовом состоянии; 5 – поверхность воды с верхней стороны (воронка); 6 – то же, с нижней; 7 – устой (опора) моста

Регуляционные сооружения имеют различную форму и конструкцию. Они позволяют сделать неизбежные русловые деформации безопасными для сооружений мостового перехода. Например, чтобы разгрузить пойменные участки отверстия моста от излишнего количества воды и исключить опасный размыв у конуса насыпи, применяют струенаправляющие дамбы 2. Благодаря им, поток перед мостом становится симметричным, а распределение расхода по ширине – более равномерным.

Берегозащитные сооружения предохраняют мост и подходы от воздействия водотока. Они исключают перемещение берегов русла, которое может создать угрозу устойчивости струенаправляющих сооружений и подходных насыпей. Берегозащитные сооружения могут быть выполнены в виде *продольного вала* с подошвой, защищенной от подмыва (например, гибким покрытием, опускающимся в размыв по мере его развития), или в виде струеотбойных поперечных сооружений – *траверсов*, размещаемых по длине берега, если ставится задача не только защитить берег, но и отодвинуть береговую линию в сторону реки.

Схема водотока на мостовом переходе при расчетном паводке показана на рис. 18.3, где *створ* (ось) мостового перехода II–II расположен нормально к направлению течения. В этом случае ширина отверстия (длина) моста является наименьшей.

Сооружения мостового перехода представляют собой местное гидравлическое сопротивление. Они стесняют речной поток и поэтому вызывают перед собой увеличение отметок свободной поверхности, т. е. создают *подпор* ΔZ перед мостом (рис. 18.3, б). Подпор распространяется вверх по течению до створа I–I, выше которого влияние моста на речной поток не сказывается, т. е. бытовые (естественные) условия не нарушаются.

Перед мостом струи сходятся, а свободная поверхность понижается к отверстию моста и имеет форму воронки (ее дугообразная граница на рис. 18.3, а показана точечной линией). Свободная поверхность перед воронкой близка к горизонтальной.

Поэтому у верхового откоса насыпи около берегов долины устанавливается наибольший подпор ΔZ_n , который уменьшается вдоль насыпи к отверстию моста (рис. 18.3, в, кривая 5).

Под мостом в сечении II–II поток получает наибольшее сжатие насыпями, его струи параллельны, скорости воды имеют наибольшие значения, а *уровень воды близок к бытовому*.

За мостом поверхность воды b имеет вид бугра, поток расширяется (растекается в стороны), струи расходятся, а скорости потока уменьшаются. За подходными насыпями около границ крайних транзитных струй образуются обширные водовороты (циркуляционные области). За сечением III–III происходит восстановление бытовых (естественных) условий водотока.

Общий размыв подмостовых русел. В бытовых условиях (до возведения перехода) весь расход реки Q проходит по всей ширине долины B (рис. 18.4, а). Причем только часть его приходится на участок в пределах ширины отверстия B_m будущего моста, равный сумме расхода $Q_{pб}$ в русле шириной $B_{pб}$ и расхода $Q_{пмб}$ на небольшом участке поймы шириной ΔB : $B_m = B_{pб} + \Delta B$. После возведения мостового перехода (рис. 18.4, б) произойдет стеснение потока. Весь его расход Q будет проходить под мостом ($Q_m = Q$). Это приведет к увеличению скоростей в пределах ширины B_m отверстия моста и к возникновению размывов.

По всей ширине $B_{pм}$ подмостового русла будет происходить увеличение глубин на величину Δh_o за счет размыва 5 (рис. 18.4, б) и, следовательно, уменьшение скоростей течения до тех пор, пока не наступит стабилизация русла после восстановления баланса наносов на участке мостового перехода. Этот вид русловых деформаций называют *общим размывом*. Его глубина Δh_o представляет собой величину понижения дна в отверстии моста в процессе размыва или разность глубин потока в русле после ($h_{pм}$) и до размыва ($h_{pб}$): $\Delta h_o = h_{pм} - h_{pб}$. Общий размыв русла оценивается *коэффициентом размыва* P . Он представляет отношение средних (или максимальных) глубин в русле под мостом после и до размыва:

$$P = h_{pm} / h_{pb}. \quad (18.1)$$

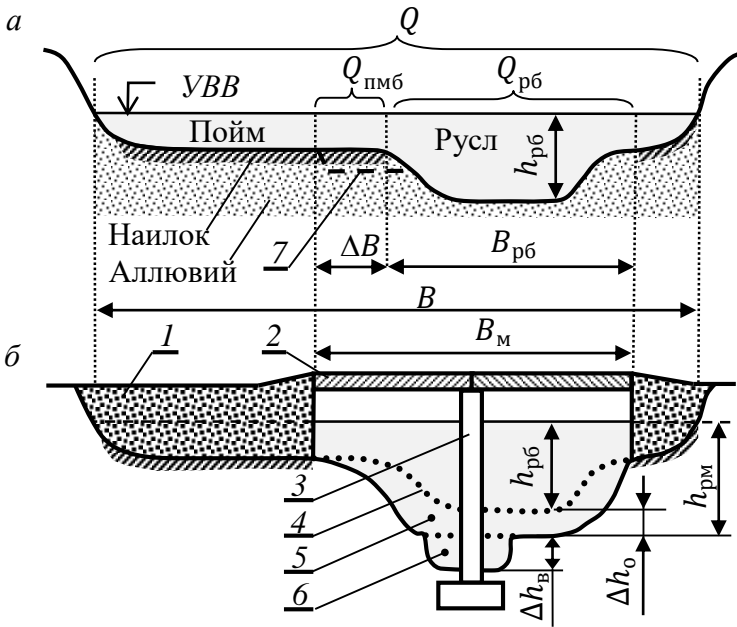


Рис. 18.4. Поперечный профиль водотока в естественном (а) и стесненном (б) состояниях:

1 – подходная насыпь; 2 – пролетное строение; 3 – опора; 4 – линия дна реки в естественном (бытовом) состоянии; 5 – общий размыв; 6 – местный размыв (воронка размыва); 7 – срезка

Расчет отверстия большого моста и общего размыва.

Расход реки Q при пике паводка можно выразить через ширину отверстия моста B_m , среднюю скорость V_m и среднюю глубину h_m потока под мостом после размыва:

$$Q = V_m \omega_m = V_m B_m h_m. \quad (18.2)$$

Среднюю скорость в русле, при которой заканчивается размыв под мостом, можно определить по формуле О.В. Андреева:

$$V_{\text{рм}} = V_{\text{рб}} (B_{\text{рб}} / B_{\text{рм}})^{1/4} (h_{\text{рм}} / h_{\text{рб}})^{1/8}. \quad (18.3)$$

Тогда для ширины отверстия моста $B_{\text{м}}$ и глубины русла под мостом $h_{\text{рм}}$, с учётом (18.3) и $h_{\text{рм}} / h_{\text{рб}} = P$, можно получить:

$$B_{\text{м}} = B_{\text{рб}} (1 / \mu) (Q / Q_{\text{рб}})^{4/3} (1 / P)^{3/2}; \quad (18.4)$$

$$h_{\text{рм}} = h_{\text{рб}} (Q_{\text{рм}} / Q_{\text{рб}})^{8/9} (B_{\text{рб}} / B_{\text{рм}})^{2/3}. \quad (18.5)$$

Здесь $Q_{\text{рб}}$, $h_{\text{рб}}$, $B_{\text{рб}}$ – расход в русле, средняя глубина и ширина русла в бытовом состоянии потока; μ – коэффициент, учитывающий стеснение потока опорами и сжатие его в отверстии.

Из последней формулы следует, что уширение русла (увеличение ширины русла под мостом $B_{\text{рм}}$) ведет к снижению размыва. Поэтому предусматривают искусственное уширение подмостового русла путем *срезки 7* (рис. 18.4, а) связных грунтов (наилка) с пойменной части отверстия моста с обнажением несвязных аллювиальных грунтов. В этом случае происходит равномерный размыв уширенного русла по всей его ширине.

Обычно стоимость единицы длины подходов к мосту значительно ниже стоимости единицы длины моста, что побуждает при проектировании увеличивать длину подходов и за счет этого уменьшать длину (ширину отверстия $B_{\text{м}}$) моста. В этом случае сокращается не только длина дорогих пролётных строений, но уменьшается и число опор моста. Однако это вызывает увеличение подпора перед мостом и подтопление сооружений. Кроме того, увеличивается глубина общего размыва, что угрожает устойчивости моста и насыпей подходов. Поэтому в целях отыскания оптимального решения можно изменять значения $B_{\text{м}}$ и $h_{\text{м}}$ в ходе технико-экономического расчета. Кроме того, строительными нормами установлены предельные коэффициенты общего размыва (1,5 – для судоходных рек; 2,0 – для несудоходных рек), что также ограничивает уменьшение $B_{\text{м}}$.

Пример 1. Определить среднюю глубину в русле под мостом после общего размыва, если при расчётном паводке расход

реки $Q = 5800 \text{ м}^3/\text{с}$; русловой бытовой расход $Q_{\text{рб}} = 2400 \text{ м}^3/\text{с}$; бытовая ширина русла $B_{\text{рб}} = 340 \text{ м}$; отверстие моста $B_{\text{м}} = 400 \text{ м}$; средняя глубина в русле до размыва $h_{\text{рб}} = 5,45 \text{ м}$. Под мостом устроена срезка русла, за счёт которой ширина русла под мостом увеличена до значения $B_{\text{рм}} = 380 \text{ м}$.

Решение. Определим среднюю глубину в подмостовом русле после размыва по О.В. Андрееву из выражения (18.5), приняв расход через русловую часть отверстия $Q_{\text{рм}} = Q = 5800 \text{ м}^3/\text{с}$, так как русло под мостом уширено на всю величину отверстия:

$$h_{\text{рм}} = 5,45(5800/2400)^{8/9}(340/380)^{2/3} = 11,09 \text{ м}.$$

Местный размыв подмостового русла б (см. рис. 18.4, б) возникает у опор и вызван изменением структуры потока около них, что выражается в увеличении скоростей сбоку опор и в возникновении циркуляционных течений. Наибольшая глубина местного размыва (глубина воронки) $\Delta h_{\text{в}}$ образуется перед опорой, что может привести к потере ее устойчивости. По этой причине подмытая опора всегда падает вверх по течению. Местные размывы возникают также около струенаправляющих дамб и траверсов. Однако они наиболее опасны для опор мостов (рис. 18.5).



Рис. 18.5. Обрушение двух пролетов моста через реку Абакан из-за подмыва опоры

При определении отметки заложения фундамента опор учитывается общий и местный размыв. Глубина водотока после размыва у опоры:

$$h = h_{\text{рб}} + \Delta h_o + \Delta h_{\text{в}}, \quad (18.6)$$

где $h_{\text{рб}}$ – бытовая глубина в русле (до сооружения моста); $\Delta h_o, \Delta h_{\text{в}}$ – глубина, соответственно, общего и местного размыва.

Схема образования воронки размыва около цилиндрической опоры показана на (рис. 18.6). На некотором расстоянии выше по течению опоры *1* не возмущает поток и не влияет на эпюру скоростей *2* (рис. 18.6, *а*). При ее обтекании при неразмытом дне русла *3* скорости сбоку опоры увеличиваются почти в 2 раза (эпюра *4*), а ударяющиеся в опору струи отклоняются во все стороны. Восходящие струи вызывают циркуляцию жидкости в виде поверхностного вальца *5* с горизонтальной осью. Нисходящие струи формируют донный валец *6*, что и является причиной образования воронки размыва *7* у опоры. Донный валец, благодаря боковым струям, приобретает подковообразную форму *9* и вырабатывает углубление *8* в дне воронки размыва. Наибольшая глубина воронки размыва $\Delta h_{\text{в}}$ образуется перед опорой.

После образования воронки глубина потока около опоры увеличивается, что приводит к уменьшению скорости обтекания опоры (эпюра скорости *10*) и стабилизации размыва около опоры (рис. 18.6, *б*). За опорой образуется зона с пониженным давлением (уровнем), где может возникать застойная зона (при малых скоростях потока), парный вихрь или вихревая дорожка *11*. За воронкой наносы откладываются в виде гряд намыва (песчаных волн) с профилем *12* и контуром в плане *13* (рис. 18.6, *б, в*).

Расчет глубины воронки размыва. Основная задача расчета местного размыва у опор мостов сводится к определению глубины воронки, которая обычно увеличивается с ростом скорости потока, его глубины и ширины опоры. Следует помнить, что размыв у опоры начинается, когда скорость течения в русле перед опорой V почти в 2 раза меньше неразмывающей скорости $V_{\text{нр}}$.

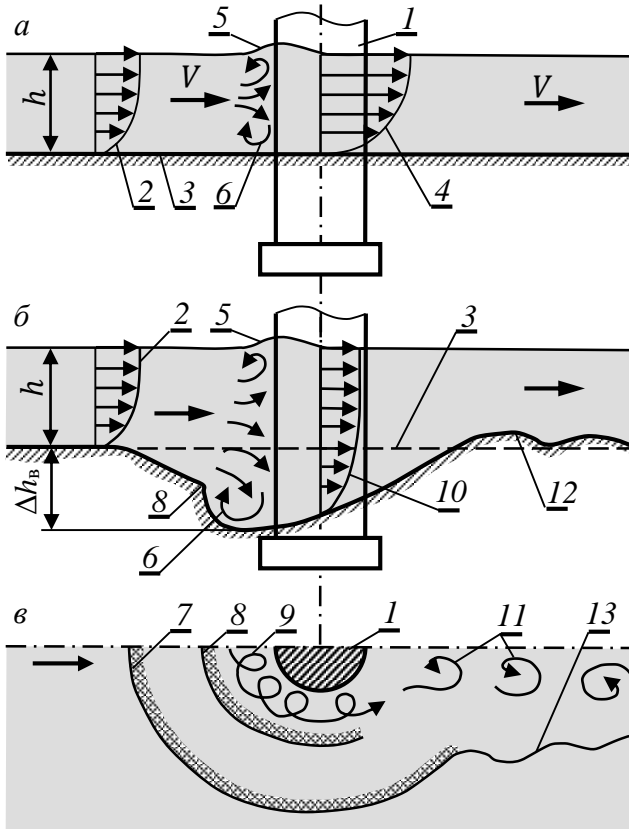


Рис. 18.6. Схема образования воронки размыва около опоры:
a – продольный профиль русла до размыва; *б* – продольный профиль русла после размыва; *в* – план воронки размыва; 1 – опора; 2 – эпюра скоростей перед опорой; 3 – дно русла до размыва; 4 – эпюра скоростей сбоку опоры до размыва; 5 – поверхностный валец; 6, 9 – донные вальцы; 7 – контур воронки размыва; 8 – контур углубления дна в воронке размыва; 10 – эпюра скоростей сбоку опоры после размыва; 11 – вихревая дорожка; 12 – продольный профиль намыва за опорой; 13 – контур намыва в плане

При проектировании мостов ориентируются на наиболее невыгодную русловую ситуацию, когда опора располагается

в подвалье скоплений наносов (побочной, отмелей). В этом случае приток руслоформирующих наносов в воронку размыва ничтожен и поэтому она имеет наибольшую глубину.

В практике проектирования, для определения глубины воронки местного размыва $\Delta h_{\text{в}}$ у опоры в несвязных грунтах, используется теоретико-эмпирическая формула И.А. Ярославцева:

$$h_{\text{в}} = KK_{\phi} b^{0,1} (V_{\text{оп}}^2 / g)^{0,9} - 30d, \quad (18.7)$$

где K – коэффициент, учитывающий относительную глубину потока $h_{\text{рм}}/b_{\text{оп}}$ (отношениям $h_{\text{рм}}/b_{\text{оп}} = 5; 3; 1$ соответствуют значения $K = 0,38; 0,44; 0,73$); K_{ϕ} – коэффициент формы опоры, принимаемый для прямоугольной в плане опоры равным 12,4; для круглой – 10,0; для овальной – 8,5; $V_{\text{оп}}$ – скорость набегания потока на опору на наиболее глубокой вертикали; $b_{\text{оп}}$ – ширина опоры по фасаду моста; d – крупность несвязного аллювия.

Скорость набегания потока на русловую опору $V_{\text{оп}}$ определяют с учетом общего размыва на наиболее глубокой вертикали:

$$V_{\text{оп}} = V_{\text{рм}} \alpha_{\text{р}}^{2/3}, \quad (18.8)$$

где $V_{\text{рм}}$ – средняя скорость после общего размыва; $\alpha_{\text{р}}$ – коэффициент формы русла (отношение максимальной глубины в русле $h_{\text{рм max}}$ к ее среднему значению $h_{\text{рм}}$). Его значение можно принять равным бытовому ($\alpha_{\text{р}} = \alpha_{\text{рм}} = \alpha_{\text{рб}} = h_{\text{рб max}} / h_{\text{рб}}$).

Расчет подпоров на мостовых переходах. Значения подпоров используются для назначения отметок насыпей подходов, струенаправляющих дамб, траверсов, для прогнозирования затопления ценных земель и населенных пунктов.

Полный подпор ΔZ (см. рис. 18.3, а) можно определить по выражению О.В. Андреева, полученному на основе формулы Шези и уравнения Бернулли для створа перехода в месте полного подпора и нижнего створа III–III с бытовым уровнем:

$$\Delta Z = \Sigma [l(I - i_0)] = 1,5L_c i_0 (\beta^2 - 1)(1 + L_{\text{в}} / L_c), \quad (18.9)$$

где $L_c = (B - B_M) / [1 + (B_{пм} / B_{пб})]$ – длина зоны сжатия; $\beta = Q / Q_M$ – коэффициент общего стеснения; Q_M – сумма расходов, проходящих в бытовых условиях в пределах ширины отверстия моста; $B_{пм}, B_{пб}$ – ширина пойм малой и большой; L_B – длина верховых струенаправляющих дамб; I – гидравлический уклон; i_0 – бытовой уклон водной поверхности.

Подпор у насыпи (см. рис. 18.3, б, в) равен:

$$\Delta Z_H = \Delta Z + L_c i_0. \quad (18.10)$$

Пример 3. Определить полный подпор ΔZ и подпор ΔZ_H у насыпи мостового перехода через водоток при ширине долины $B = 1550$ м; ширине коренного русла $B_{рб} = 525$ м; односторонней левобережной пойме $B_{пб} = 1025$ м ($B_{пм} = 0$). Отверстие моста ($B_M = 550$ м) перекрывает только русло. Часть ширины поймы, перекрытая насыпью, составляет: $B_{пер.б} = 1000$ м ($B_{пер.м} = 0$). В состав перехода входит левобережная струенаправляющая дамба, имеющая длину верховой части $L_B = 300$ м. Коэффициент общего стеснения потока мостовым переходом $\beta = 1,3$. Уклон свободной поверхности $i_0 = 0,0002$.

Решение. Найдем длину зоны сжатия потока перед мостом:

$$L_c = (1550 - 550) / [1 + (0 / 1025)] = 1000 \text{ м.}$$

Тогда полный подпор по формуле (18.9) равен:

$$\Delta Z = 1,5 \cdot 1000 \cdot 0,0002 (1,3^2 - 1) (1 + 300 / 1000) = 0,27 \text{ м.}$$

Подпор воды у насыпи по формуле (18.10):

$$\Delta Z_H = 0,27 + 1000 \cdot 0,0002 = 0,47 \text{ м.}$$

18.2. Порядок выполнения работы

1. Поставить устройство № 9 вертикально на стол так, чтобы надпись «мостовой переход в плане» на лицевой стороне устройства была перевернута, и подождать, когда верхний бак опорожнится.

2. Перевернуть устройство в его вертикальной плоскости, наблюдать картину течения воды на модели мостового перехода в плане с циркуляционными и застойными зонами (рис. 18.7, а), зарисовать и описать ее. Обозначить основные размеры: ширину долины, ширину отверстия моста и опоры, сужение и расширение потока.

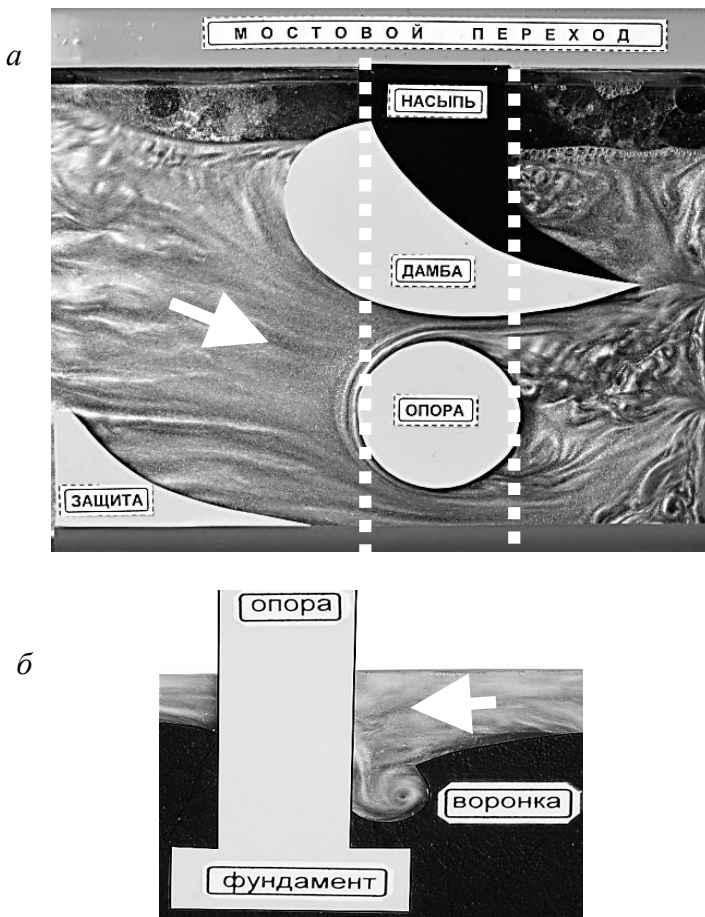


Рис. 18.7. Картина течения воды на мостовом переходе в плане (а) и около мостовой опоры в вертикальном сечении (б)

3. Перевернуть еще раз устройство в его вертикальной плоскости, наблюдать на обратной стороне устройства картину течения воды около мостовой опоры и механизм образования воронки размыва (рис. 18.7, б).

4. Зарисовать структуру потоков около опоры и описать процесс образования местного размыва.

Контрольные вопросы

1. Что называется мостовым переходом?
2. Перечислите основные сооружения мостового перехода.
3. В какой части живого сечения реки движение воды происходит круглогодично?
4. С какой целью на мостовых переходах устраиваются регуляционные сооружения?
5. Какое назначение имеют укрепительные сооружения?
6. Каковы причины образования подпора перед мостом?
7. Назовите характерные подпоры перед мостом.
8. Какие виды размывов наблюдаются на мостовых переходах? Каковы причины их образования?
9. В чем заключаются основные задачи гидравлического расчета мостовых переходов?
10. Чем характеризуется общий размыв подмостового русла?
11. От каких факторов зависит скорость динамического равновесия?
12. От каких факторов зависит глубина местного размыва при установившемся течении?
13. Каков порядок развития местного размыва у опоры?

Практическая работа № 19 ИЗУЧЕНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Цель работы. Изучить типы русловых процессов и особенности их учета при назначении створа моста.

19.1. Общие сведения о реках и русловых процессах

Общие сведения о реке. Река – водный поток (водоток) в разработанном им русле в углублениях земной поверхности. Она имеет *исток* – начало и *устье* – место впадения реки в море, озеро, водохранилище, другую реку. Река 1, которая впадает в море 3, называется *главной* (рис. 19.1). Реки, непосредственно впадающие в главную реку, являются *притоками* I порядка. В них впадают притоки II порядка и т. д.

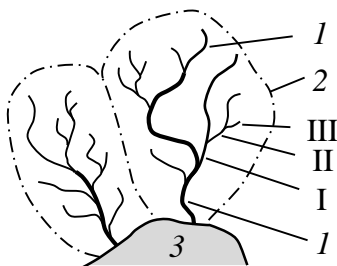


Рис. 19.1. Речная система:
1 – главная река; 2 – водораздел;
3 – море, озеро, океан; I, II, III –
притоки главной реки первого,
второго и третьего порядков

Главная река и все её притоки образуют *речную систему*, а территория, с которой поверхностные и подземные воды стекают в речную систему, именуется водосбором или *бассейном* реки. Граница между бассейнами проходит по наиболее возвышенным участкам местности и называется *водоразделом* 2. В зависимости от площади бассейна реки делятся на большие (более 50 тыс. км²), средние (2–50 тыс. км²) и малые (менее 2 тыс. км²).

Река протекает по пониженной части бассейна – *долине*, выработанной в ходе многовековой деятельности самой рекой. Долина имеет склоны 1 и дно 2 (рис. 19.2). Обычно она заполнена

слоем продуктов разрушения земной коры (ил, песок, гравий, валуны). Они перемещаются потоком и называются *аллювием*, или *наносами* 3. Слой наносов прорезан *руслom* 4, в котором сосредоточен речной поток в маловодные периоды (в межень). *Поймой* 5 называется часть долины, затапливаемая только в многоводные периоды (во время паводков и половодий). Поймы обычно имеют плоскую поверхность и покрыты травяной и кустарниковой растительностью. В течение тысячелетий русла рек размываются текущей водой, поэтому меняют свою форму как в поперечном сечении, так и в плане (блуждают в пределах долины).

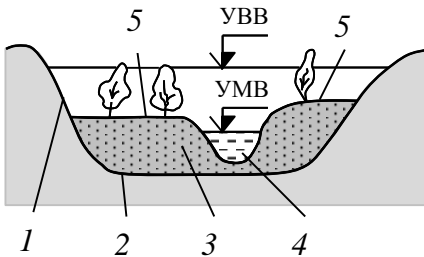


Рис. 19.2. Долина реки:

1 и 2 – склон и дно долины; 3 – наносы (аллювий); 4 – русло; 5 – поймы; УВВ – уровень высоких вод; УМВ – уровень меженных вод

Уровнем воды H в реке называют высоту поверхности воды, отсчитываемую от некоторой плоскости сравнения. *Урез воды* – граница воды у берега водоема. *Ширина реки b* – расстояние между урезами воды у противоположных берегов. *Глубина h* – расстояние по вертикали от поверхности воды до дна. *Расход Q* – объем воды, протекающей через живое сечение потока в единицу времени (обычно в секунду). *Сток W* – количество воды, стекающей с данного участка суши (водосбора) за продолжительное время (сутки, месяц, год).

Речной сток имеет четыре *источника питания*: дождевое, снеговое, ледниковое и подземное. Питание рек подземными водами происходит постоянно. Дождевое питание имеет периодический характер и может вызвать значительные колебания

уровня воды. Существенную долю в питании большинства рек России дает снежный покров на площадях их бассейнов.

Водный режим рек характеризуется изменением во времени уровней, расходов и объемов воды в реках и почвогрунтах. Основными фазами (периодами) водного режима равнинных рек России является весеннее половодье, дождевые паводки, летняя и зимняя межени. *Половодье* – фаза водного режима реки, которая характеризуется наибольшей в году водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды с выходом воды из русла на пойму. *Паводок* – кратковременный подъем уровня воды, возникающий нерегулярно. *Межень* – период года, в течение которого наблюдается низкая водность.

Виды морфологических структурных образований. Речной поток постоянно изменяет форму своего русла за счет его размыва (эрозии), намывания наносов и переноса их вниз по течению. Изменение морфологического (от греч. – форма) строения русла водотока под действием текущей воды называют *русловым процессом*. Речные морфологические структурные образования подразделяют на три группы:

1) *микроформы* – мелкие песчаные гряды, размеры которых во много раз меньше глубины и ширины потока в русле; их возникновение обусловлено турбулентностью потока;

2) *мезоформы* – сравнительно крупные подвижные песчаные скопления в русле реки (ленточные гряды, побочни и осередки); они соизмеримы с глубиной и шириной потока;

3) *макроформы* – сложный комплекс морфологических образований, которые определяют внешний вид русла (пойменные массивы, речные излучины, пары плес – перекат).

Макроформы и мезоформы определяют тип руслового процесса. Главными факторами формирования речного русла являются руслоформирующий расход воды, уклон водотока, крупность наносов. За руслоформирующие расходы принимают расходы воды при заполнении русла до его бровки.

Русловый комплекс перека́т – плес. В плане речное русло имеет прямолинейные участки и изгибы, называемые *излучинами*

(*меандрами*). На крутых излучинах поверхностные струи воды ударяются в вогнутый берег, отражаются от него и направляются вниз, а затем около дна – к противоположному выпуклому берегу, вызывая поперечную циркуляцию *1* в водотоке (рис. 19.3). Винтовой характер течения вызывает следующие процессы: размыв вогнутого берега и дна русла и, как следствие, формирование крутых берегов и глубоких участков около них, называемых *песами* *2*; перенос продуктов размыва (наносов) к противоположному берегу и скопление их в виде гряд, называемых *побочнями* *3*. При спаде уровня скопление донных наносов на выпуклом берегу речной излучины обнажается, и в этом случае называется *пляжем*, или *косой*.

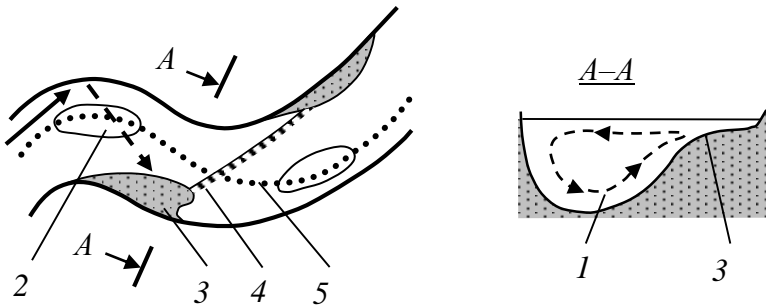


Рис. 19.3. Русловой комплекс перекат – плес:

1 – поперечная циркуляция; *2* – плес; *3* – побочень; *4* – перекат; *5* – фарватер

На участках перехода реки из излучины одного в излучину другого направления образуется перекат *4* – форма донного рельефа в виде гряды наносов, пересекающей русло. Линия наибольших глубин вдоль реки называется *фарватером* *5*.

Продольный профиль (разрез) по фарватеру (рис. 19.4) характеризует изменение отметок дна и свободной поверхности по длине реки. Разность высотных отметок поверхности воды ΔH в двух точках, расположенных на некотором расстоянии L вдоль

реки, называется *падением реки*. Падение, приходящееся на единицу длины потока, представляет собой *продольный уклон свободной поверхности*: $i = \Delta H/L$.

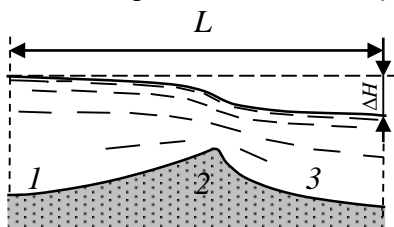


Рис. 19.4. Продольный профиль по фарватеру:
1 – плес; 2 – гребень переката;
3 – подвалье

Наблюдение параметров речного потока проводят в специально выбранных вертикальных плоскостях, называемых *створами*. След такой плоскости на плане называют *линией створа*. Створ чаще располагают перпендикулярно основному течению (*нормальный створ*, или *поперечник*), а иногда под углом к нему (*косой створ*) или вдоль реки (*продольник*).

Необходимость прогнозирования русловых процессов. Очень важно уметь прогнозировать природные русловые деформации рек, которые могут произойти в течение срока службы мостового перехода (составляет около 80 лет).

Деформации живых сечений русла прогнозируются для установления на стадии проектирования неблагоприятных условий работы опор моста, подходов к нему, регуляционных сооружений и для решения вопроса о расположении моста в плане.

Если при проектировании мостового перехода деформации русла не учитываются, то создаются весьма неблагоприятные условия работы перехода. Например, если при проектировании не учтено боковое перемещение русла в результате процесса мандрирования, то может возникнуть угроза подмыва опоры и нарушения устойчивости мостового перехода. Такой случай произошел с мостовым переходом через р. Суру у г. Пензы, когда русло за 75 лет переместилось к одной из опор (рис. 19.5). Для обеспечения устойчивости перехода потребовалась реконструкция этой опоры.

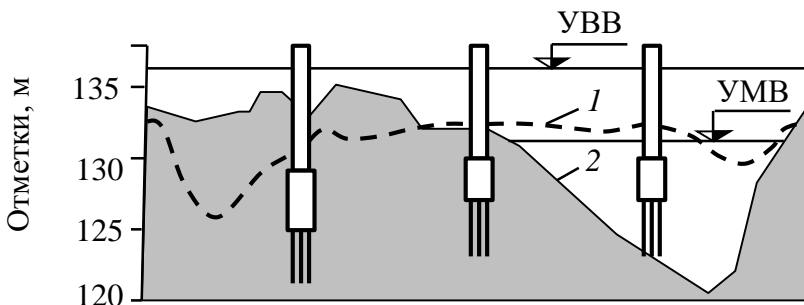


Рис. 19.5. Профили живых сечений в створе мостового перехода:
 1 – до постройки моста; 2 – после сооружения моста; УВВ – уровень
 высоких вод; УМВ – уровень меженных вод

При проектировании мостового перехода необходимо знать тип руслового процесса на данном участке реки. Сведения о деформациях русел проектировщики могут получить в организациях, связанных с использованием реки. Если мостовой переход проектируется через судоходную реку, то необходимые сведения можно получить в бассейновых управлениях и в технических участках водного пути Министерства речного флота.

Картографические и аэрофотосъемочные материалы позволяют установить тип руслового процесса и дать качественный прогноз возможных деформаций русла на будущий период. При производстве изысканий мостового перехода тип руслового процесса устанавливают путем осмотра участка реки в натуре. Сведения о характере русловых деформаций (о развитии излучин, перемещении побочней, образовании протоков и т. д.) можно получить от старожилов, проживающих в прибрежных районах (бакенщиков, паромщиков, рыбаков).

Трассирование мостового перехода является важной задачей проектно-изыскательских работ. При трассировании необходимо учитывать тип руслового процесса на данном участке реки и соблюдать следующие требования.

Ось (створ) мостового перехода рекомендуется назначать нормально к направлению руслового и пойменного потоков

в наиболее узком месте разлива реки. Его целесообразно трассировать на участках реки с наиболее высокими и узкими поймами (без озер, болот, староречий и протоков) и с высоким залеганием коренных и плотных пород (они могут служить основанием фундаментов мостовых опор). На судоходных и сплавных реках следует выбирать участки реки, удобные и безопасные для пропуска под мостом судов и плотов.

Не рекомендуется назначать створ мостового перехода:

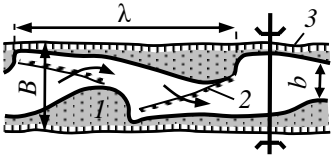
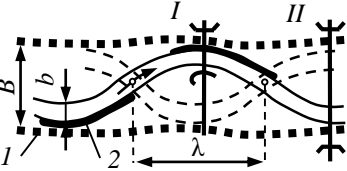
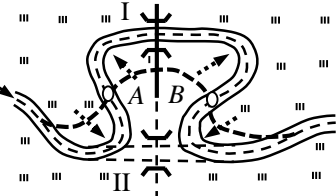
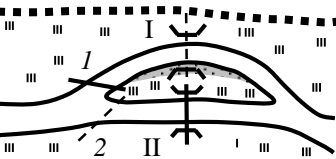
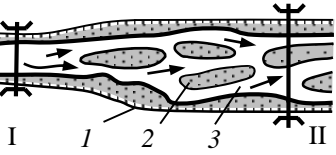
- в местах образования наледей, заторов и зажоров льда;
- на перекатных участках реки;
- на участках реки с оползневыми склонами;
- на участках реки с островами (они приводят к необходимости увеличивать отверстие моста);
- непосредственно ниже устья притока во избежание скопления наносов под мостом.

Типы русловых процессов. Деформации русла и поймы реки, возникающие в результате сочетания особенностей водного режима и стока наносов, обуславливают *тип руслового процесса*. В соответствии с классификацией, разработанной в Государственном гидрологическом институте Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым, различают следующие типы русловых процессов рек (табл. 19.1).

Таблица 19.1

Типы руслового процесса и варианты расположения створа мостов

Название типов руслового процесса и его структурных элементов	Схема руслового комплекса
<p>I. <i>Ленточногрядовый тип:</i> 1 – ленточная гряда; 2 – гребень гряды; 3 – бровка меженного берега; 4 – створ мостового перехода; b – ширина меженного русла; λ – шаг гряды</p>	

<p>Название типов руслового процесса и его структурных элементов</p>	<p>Схема руслового комплекса</p>
<p>II. <i>Побочный тип:</i> 1 – побочень; 2 – гребень переката; 3 – бровка коренного русла; B – ширина коренного русла; b – ширина меженного русла; λ – шаг побочня</p>	
<p>III. <i>Ограниченное меандрирование:</i> 1 – граница долины; 2 – укрепление берегов; B – ширина долины; b – ширина русла; λ – шаг излучины</p>	
<p>IV. <i>Свободное меандрирование:</i> I – устройство моста на излучине; II – устройство моста на искусственном русле (спрямляющем канале)</p>	
<p>V. <i>Незавершенное меандрирование:</i> I – устройство моста на излучине; II – устройство моста на спрямляющем протоке; 1 – запруда на излучине; 2 – запруда на спрямляющем протоке</p>	
<p>VI. <i>Русловая многорукавность:</i> 1 – бровка коренного русла; 2 – осередок (русловой остров); 3 – проток</p>	

Название типов руслового процесса и его структурных элементов	Схема руслового комплекса
VII. <i>Пойменная многорукавность:</i> <i>1 – граница поймы; 2 – проток; 3 – пойменный остров (часть поймы); 4 – створ мостового перехода</i>	

1. *Ленточногрядовый* – встречается в слабоизвилистых руслах и характеризуется движением по всей ширине русла поперечных гряд дугообразной формы высотой до 3 м со скоростью 200–300 м/год. При этом берега русла практически не деформируются. Поэтому регуляционные сооружения не требуются. Ось мостового перехода ориентируют нормально к руслу.

2. *Побочневый* – гребни гряд перекошены. Повышенные части гряд в меженный период обнажаются, образуя побочни (песчаные отмели), расположенные вдоль берегов в шахматном порядке и сползающие вниз по течению со скоростью 100–900 м в год. Положение коренных берегов русла почти не изменяется.

Створ моста располагают нормально к коренному руслу, а ширину его отверстия назначают не менее ширины B этого русла. В противном случае могут возникать размывы около устоев в период прохождения побочней через отверстие моста (рис. 19.5).

3. *Ограниченное меандрирование* – русло синусоидальной формы сползает по течению реки (скорость 5–15 м/год) с обменом наносами с поймой и ее деформацией. Наблюдается в узких долинах, сложенных из неразмываемых (крепких) пород, которые ограничивают развитие излучин.

Вариант I: мост перекрывает только русло под прямым углом, а вогнутые берега верховой и пересекаемой излучин укрепляются.

Вариант II: мост перекрывает всю пойму реки под любым углом, тогда опоры выполняются цилиндрическими. В этом случае мост значительно длиннее, по сравнению с вариантом I.

4. *Свободное меандрирование* – русло меандрирует в пойме реки со староречьями. Каждая излучина, имеющая форму синусоиды, сначала сползает по течению, ее участки начинают разворачиваться в точках перегиба *A* и *B*, она останавливается и преобразуется в петлю русла, состоящую из двух излучин. Подмываемые вогнутые берега излучин сближаются, перешеек между ними прорывается (происходит спрямление русла), а петля превращается в старое русло (старицу). Скорость смещения берегов обычно не превышает 15 м/год.

Располагать мост целесообразно в середине хорошо развитой излучины, прижатой к коренному берегу долины и зафиксированной путем укрепления вогнутого берега. Не рекомендуется пересекать русло в точках перегиба смежных излучин *A* и *B*, так как здесь поток с течением времени изменяет свое направление и может приобрести значительную косину под мостом и создать плохие условия для работы сооружений моста. Если перешеек между излучин узкий, то их вогнутые берега укрепляют и назначают створ, как указано выше на излучине (вариант I), или устраивают мост на искусственно спрямленном русле (канале), соединяющем эти излучины (вариант II). Тогда на излучине (старице) вместо моста выполняется земляная насыпь.

5. *Незавершенное меандрирование* – свойственно рекам с широкой, часто затопляемой и легко размываемой поймой. Излучина начинает изменяться при свободном меандрировании, но на пойме возникает спрямляющий проток и река делится на два рукава. После перемещения главного русла в спрямляющий проток развитие излучины приостанавливается и она отмирает. Затем цикл развития излучины повторяется. Мост сооружается на излучине (I) или на спрямляющем рукаве (II), а на другом рукаве устраиваются запруда и земляная насыпь.

6. *Русловая многорукавность (осередковый тип)* – является следствием развития ленточногрядового типа, возникает в руслах при больших расходах донных наносов. Наносы перемещаются

в виде больших разобщенных гряд. В меженный период они превращаются в небольшие острова (осередки) каплевидной формы, между которыми образуются извилистые протоки (рукава).

Створ мостового перехода располагается нормально к границам коренного русла в месте с наименьшей шириной. Отверстие моста охватывает либо всю ширину коренного русла, либо смещается к одному из его берегов. Тогда устраиваются специальные регуляционные сооружения и подходные насыпи. Рассматриваются также варианты трассы в обход с пересечением реки в ближайшей теснине.

7. *Пойменная многорукавность* – является следствием развития незавершенного меандрирования, наблюдается в широких поймах и характеризуется наличием множества рукавов между большими устойчивыми островами (участками поймы). Рукава представляют собой самостоятельные русла. На них могут быть любые из вышеуказанных типов процессы. Рекомендуются меньше стеснять поток воды. Поэтому на больших протоках устраиваются дополнительные мосты.

На территории России чаще всего встречаются реки со свободным меандрированием. Меньше всего рек с ограниченным меандрированием. На каждой реке, как правило, наблюдаются различные типы русловых процессов.

Русловые процессы могут приносить большой вред. Так, многие приречные города и поселки Томской области за период своего существования меняли свои места 3–4 раза. Нарым был построен в 1598 г. в 150 м от Оби, но потом был все-таки смыт водой. Позднее он неоднократно переносился в сторону, дальше от реки. У г. Колпашево за 60 лет разрушена площадь более 6 км². Размыв продолжается, поскольку здесь Обь делает крупную излучину, которая продолжает развиваться. На этой площади сейчас находится значительная часть города. Рассматривается один из возможных вариантов защиты берегов Оби у г. Колпашево – путем спрямления русла. Предлагается уничтожить шейку (перемычку) излучины, ширина которой составляет

4 км. Однако здесь нужно предварительно оценить, что экономически более выгодно: защитить берег или перенести часть города на новое место.

19.2. Порядок выполнения работы

1. Расположить устройство № 10 в вертикальной плоскости так, чтобы модель русла побочного типа была вверху (как показано на рис. 19.6, а).

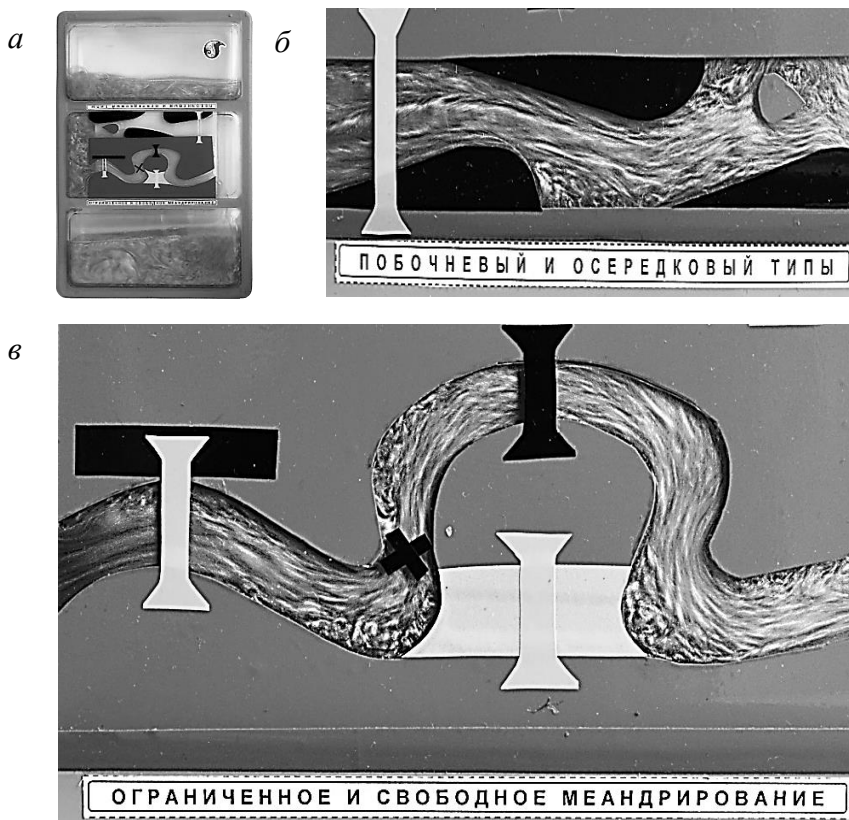


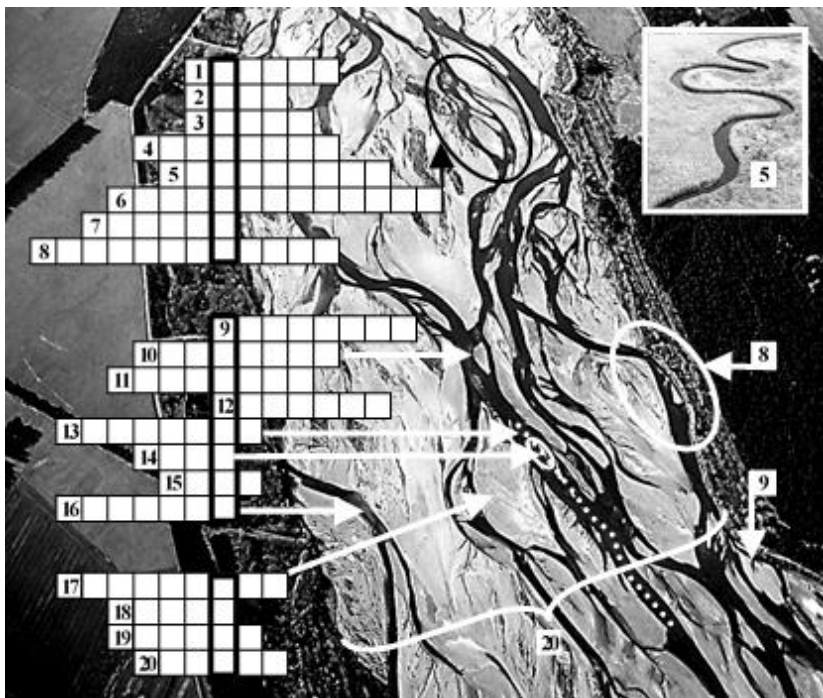
Рис. 19.6. Общий вид устройства № 10 (а) и картина течения в моделях русел при различных типах русловых процессах (б и в)

2. После опорожнения верхнего бака перевернуть устройство № 10 и наблюдать структуру течения при побочном и осередковом типах руслового процесса (рис. 19.6, б).

3. Изобразить контур исследуемого русла и картину течения в нем, наметить створы мостовых переходов, описать варианты и особенности их выполнения. Обозначить шаг побочня, ширину коренного и меженного русла.

4. Перевернуть устройство № 10, наблюдать структуру течения при ограниченном и свободном меандрировании русел (рис. 19.6, в). Затем выполнить действия по п. 3 с обозначением ширины долины и русла.

Кроссворд-карта. Разгадайте кроссворд, совмещенный с картой долины реки, и определите ключевое выражение, означающее предмет изучения науки «Русловедение».



1. Процесс размыва горных пород и почвы водным потоком. 2. Гидрология ... («японской еды») – изучает процессы, протекающие на земной поверхности. 3. Общее название части реки: для Оби – это слияние рек Катунь и Бии, для Ангары – озеро Байкал. 4. Процесс заполнения русел рек наносами. 5. ...меандрирование – оставляет подковообразные старицы (отделившиеся от русла рукава в виде озер). 6. ...меандрирование – наиболее распространено в широких и легко размываемых поймах, где излучина не может развиться полностью до состояния петли. 7. Они перекатываются и галопируют, а другой их вид парит в потоке над дном русла. 8. ...меандрирование – наблюдается в узких долинах, стесняющих развитие излучин, поэтому русла имеют синусоидальную форму. 9. Название гряды наносов около берега, при примыкании ее к берегу одним концом называется еще косой. 10. Скопление наносов в середине русла. 11. Одна из самых длинных рек в мире. 12. Термический режим рек в России оценивают по шкале... 13. Линия наибольших глубин. 14. Глубокие места в реке, название которых образуется добавлением буквы к слову «пёс». 15. Разводной, но не ключ. 16. Их также называют излучины или изгибы русла реки. 17. Крупные подвижные песчаные скопления в русле реки. 18. Общее название части реки: у Оби она именуется также губой, а у Волги – греческой буквой. 19. На этом континенте расположена единственная в мире река, пересекающая экватор дважды. 20. Место, где река прогуливается влево и вправо в течение многих тысяч лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс «Капелька», состоящий из трех лабораторий, позволяет наглядно демонстрировать принцип действия жидкостных приборов и процессы течения жидкости в опытных каналах и в моделях русел, водосливов, мостов и труб, а также легко понять физическую сущность гидравлических явлений в современных гидросистемах и сооружениях.

Практические работы с использованием пособия и комплекса способствуют быстрому приобретению навыков по проведению гидравлического эксперимента и обработке опытных данных. Для повышения эффективности обучения можно дополнительно использовать и традиционные лабораторные стенды, которые имеют совершенное аппаратное оформление и большой диапазон варьирования параметров течения.

Представленный в пособии материал окажет помощь в усвоении теоретической части курса и выработке навыков при решении конкретных инженерных задач. При изучении курса «Гидравлика» следует обратить внимание на то, что при кажущейся простоте изложенного материала этот курс является довольно сложным и требует значительных усилий для его освоения.

Практическое значение гидравлики с годами постоянно возрастает. Этот курс представляет собой основу для многих инженерных расчетов в области строительного дела, поэтому полученные знания и навыки пригодятся студентам и при изучении многих других дисциплин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Альтшуль, А.Д.* Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1987. – 414 с.
2. *Гиргидов, А.Д.* Механика жидкости и газа (гидравлика): учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. – 545 с.
3. *Гидравлика и гидропривод* / Н.С. Гудилин, Е.М. Кривенко, Б.С. Маховиков [и др.] ; под общ. ред. И.Л. Пастоева. – М. : Горная книга, 2007. – 519 с.
4. *Константинов, Н.М.* Гидравлика, гидрология, гидрометрия: в 2 ч. / Н.М. Константинов, Н.Н. Петров, Л.И. Высоцкий. – М. : Высшая школа, 1987. – Ч. 1. – 304 с.; Ч. 2. – 431 с.
5. *Курганов, А.М.* Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л. : Стройиздат, 1982. – 424 с.
6. *Лабораторный практикум* по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу / Я.М. Вильнер, И.П. Вопнярский, В.И. Кузменков [и др.] ; под ред. Я.М. Вильнера. – Минск : Выш. школа, 1980. – 224 с.
7. *Лапшев, Н.Н.* Гидравлика / Н.Н. Лапшев. – М. : Академия, 2008. – 272 с.
8. *Ухин, Б.В.* Инженерная гидравлика / Б.В. Ухин, Ю.Ф. Мельников ; под ред. Б.В. Ухина. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – 344 с.
9. *Шейпак, А.А.* Гидравлика и гидропневмопривод. Основы механики жидкости и газа / А.А. Шейпак. – М. : ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2017. – 272 с.
10. *Штеренлихт, Д.В.* Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – М. : КолосС, 2008. – 656 с.
11. *Пат.* 1742655, Российская Федерация, МКИ G01L 7/18. Демонстрационный прибор для измерения гидростатического давления / Г.Д. Слабожанин, В.Д. Слабожанин. – Опубл. 23.06.1992.

12. Пат. 1721326, Российская Федерация, МКИ F15B 19/00. Учебно-лабораторная установка для исследования установившегося напорного течения жидкости / Г.Д. Слабожанин, В.Д. Слабожанин. – Оpubл. 23.03.1992.

13. А. с. 27172, Российская Федерация, МКИ F15B 19/00. Учебно-лабораторное устройство для изучения свойств жидкости. / Г.Д. Слабожанин, К.Н. Ребенков, Д.Г. Слабожанин. – Оpubл. 10.01.2003.

Ответы на кроссворд: 1. Эрозия. 2. Суша. 3. Исток. 4. Заиление. 5. Свободное. 6. Незавершенное. 7. Наносы. 8. Ограниченное. 9. Побочень. 10. Осередок. 11. Амазонка. 12. Цельсий. 13. Фарватер. 14. Плес. 15. Мост. 16. Меандры. 17. Мезоформы. 18. Устье. 19. Африка. 20. Долина.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
I. РАБОТЫ ПО ОБЩЕЙ ГИДРАВЛИКЕ НА ЛАБОРАТОРИИ	
«КАПЕЛЬКА-1»	7
Описание лаборатории «Капелька-1».....	7
Практическая работа № 1. Изучение физических свойств жидкости.....	9
Практическая работа № 2. Изучение приборов для измерения давления	17
Практическая работа № 3. Измерение гидростатического давления ...	25
Практическая работа № 4. Определение режима течения жидкости ...	29
Практическая работа № 5. Изучение видов и структуры потоков жидкости	35
Практическая работа № 6. Иллюстрация уравнения Бернулли	42
Практическая работа № 7. Измерение расходов жидкости	50
Практическая работа № 8. Определение потерь напора по длине.....	57
Практическая работа № 9. Определение местных потерь напора	63
II. РАБОТЫ ПО ГИДРАВЛИКЕ ОТКРЫТЫХ РУСЕЛ	
НА ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-2»	68
Описание лаборатории «Капелька-2».....	68
Практическая работа № 10. Изучение водослива с тонкой стенкой.....	70
Практическая работа № 11. Изучение водослива с широким порогом	75
Практическая работа № 12. Изучение водослива практического профиля	80
Практическая работа № 13. Исследование гидравлического прыжка ..	84
Практическая работа № 14. Изучение истечения воды из-под щита....	89
Практическая работа № 15. Изучение работы водопропускной трубы	93
Практическая работа № 16. Определение коэффициента шероховатости в канале.....	99
III. РАБОТЫ ПО МОСТОВОЙ ГИДРАВЛИКЕ	
НА ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-3»	102
Описание лаборатории «Капелька-3».....	102
Практическая работа № 17. Изучение гидравлики малых мостов.....	104
Практическая работа № 18. Изучение гидравлики мостовых переходов	113
Практическая работа № 19. Изучение русловых процессов	126
Заключение	140
Библиографический список	141

Учебное издание

Слабожанин Геннадий Дмитриевич

**ГИДРАВЛИКА:
ПРАКТИКУМ (НА КОМПЛЕКСЕ «КАПЕЛЬКА»)**

Редактор М.В. Пересторонина
Технический редактор Н.В. Удлер

Подписано в печать 20.08.2019.
Формат 60×84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 7,58. Тираж 150 экз. Зак. № 259.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.