

Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин

**ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ
С КОМПЛЕКСОМ «КАПЕЛЬКА-1»
И ГИДРОЮМОРОМ. ДИНАМИКА**

Учебное пособие

2025

Рецензенты:

В.В. Дзюбо, доктор техн. наук, профессор, главный специалист по водоснабжению и водоотведению АО «Северский водоканал»;

Н.А. Цветков, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и инженерные системы в строительстве» Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Слабожанин, Г.Д. Практикум по гидравлике с комплексом «Капелька-1» и гидроюмором: учебное пособие. Часть 2. ДИНАМИКА / Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин, 2025. – 92 с.

ISBN 978-5-98428-133-1

ISBN 978-5-98428-135-5 (*Часть 2. Динамика*)

В пособии приведены основные сведения о предмете и истории развития гидравлики, свойствах жидкости, гидростатике и гидродинамике, описание демонстрационных и лабораторных работ на комплексе устройств «Капелька-1». Комплекс разработан в Томском архитектурно-строительном университете (ТГАСУ), занимал 1 место на Всесоюзном конкурсе учебной техники на ВДНХ (Москва, 1990 г.), включен Госкомобразованием СССР в 1991 г. в перечень типового учебно-лабораторного оборудования по курсу «Гидравлика (механика жидкости и газа)» для вузов. В настоящее время его используют более 1000 учебных заведений России и за рубежом.

Практикум предназначен для использования на практических и лабораторных занятиях, при выполнении курсовых и контрольных работ студентами всех форм обучения. В пособие включены контрольные вопросы, примеры решения задач, контрольные задания для самостоятельной работы и гидроюмор.

Пособие предназначено для студентов вузов всех форм и профилей обучения по направлению «Строительство», изучающих дисциплины «Гидравлика», «Механика жидкости и газа». 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

ISBN 978-5-98428-135-5



9 785984 281355

СОДЕРЖАНИЕ

4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОДИНАМИКИ.....	4
Лабораторная работа № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ.....	9
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ВИДОВ И СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ.....	13
Контрольные вопросы.....	16
Примеры решения задач.....	16
<i>О режимах течения с юмором.....</i>	<i>18</i>
5. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ.....	18
Лабораторная работа № 6. ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ.....	23
Контрольные вопросы.....	25
Примеры решения задач.....	26
<i>Об уравнении Бернулли с юмором.....</i>	<i>28</i>
6. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ.....	29
Лабораторная работа № 7. ИЗУЧЕНИЕ РАСХОДОМЕРА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ.....	31
Контрольные вопросы.....	33
<i>О счетчиках воды с юмором.....</i>	<i>33</i>
7. ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ.....	35
Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ.....	38
Контрольные вопросы.....	39
Примеры решения задач.....	40
8. МЕСТНЫЕ ПОТЕРИ НАПОРА.....	43
Лабораторная работа № 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА.....	48
Контрольные вопросы.....	51
Примеры решения задач.....	51
<i>О местных сопротивлениях с юмором.....</i>	<i>51</i>
9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ.....	52
Контрольные вопросы.....	55
Примеры решения задач.....	56
<i>О трубах с юмором.....</i>	<i>64</i>
10. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ.....	65
Лабораторная работа № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ.....	72
Контрольные вопросы.....	75
Примеры решения задач.....	75
11. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ.....	78
Задание 1 для контрольной работы по гидростатике.....	78
Задание 2 для контрольной работы по гидродинамике.....	83
Заключение.....	87
Библиографический список.....	88

4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОДИНАМИКИ

Гидродинамика – раздел гидравлики, изучающий законы движения жидкости и твердых тел, погруженных в жидкость.

При изучении законов гидродинамики жидкость рассматривается как сплошная среда из частиц с точечным объемом. *Движение жидкости характеризуется местными давлением p и скоростью u* , которые в общем случае зависят от координат (x, y, z) рассматриваемой точки в жидкости и времени t .

Кинематические элементы потока. Для схематизации движения жидкости вводят следующие понятия. *Линия тока* – это линия, в каждой точке которой в данное мгновение вектор скорости жидкости u совпадает с касательной к этой линии (рис. 4.1). Линия тока образована частицами жидкости, движущимися в данный момент времени одна за другой, и в общем случае может не совпадать с траекторией движения каждой из этих частиц. *Элементарная струйка* – бесконечно малый объем движущейся жидкости, ограниченный замкнутой поверхностью из линий тока. *Поток* – сплошная совокупность элементарных струек.

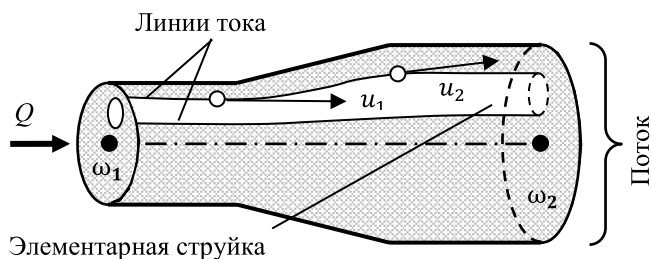


Рис. 4.1. Струйная модель движения жидкости

Гидравлические элементы потока. К гидравлическим элементам потока относятся живое сечение, расход, смоченный периметр, гидравлический радиус и средняя скорость.

Живое сечение потока – поверхность, проведенная нормально к линиям тока и ограниченная его внешним контуром. Площадь живого сечения обозначается буквой ω , м².

Расход потока Q (м³/с) – количество (объем) жидкости, проходящей через живое сечение за единицу времени.

Смоченный периметр χ (м) – длина контура живого сечения по твердым стенкам русла.

Гидравлический радиус R (м) – отношение площади живого сечения к смоченному периметру: $R = \omega / \chi$.

Средняя скорость потока V – это осредненная по живому сечению скорость, которая определяется как частное от деления расхода потока Q на площадь его живого сечения ω : $V = Q / \omega$.

Таким образом, действительное распределение скоростей (рис. 4.2, а) приводится к фиктивному равномерному распределению (рис. 4.2, б) и формула для определения расхода потока реальной жидкости приобретает простой вид: $Q = V\omega$.

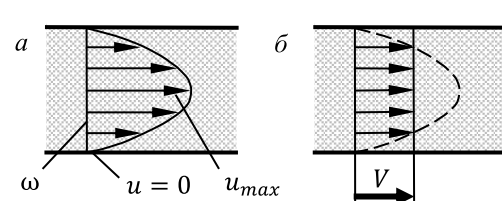


Рис. 4.2. Эпюры скоростей для потока в круглой трубе

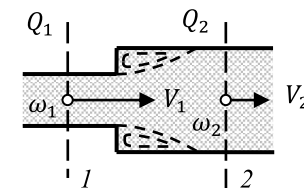


Рис. 4.3. Схема потока при расширении

Уравнение неразрывности (постоянства расхода по длине потока) применяется при установившемся движении несжимаемой жидкости (рис. 4.3) и может быть выражено в виде

$$Q_1 = V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 = Q_2 = const, \quad (4.1)$$

откуда следует, что средние скорости в потоке обратно пропорциональны площадям живых сечений: $V_1 / V_2 = \omega_2 / \omega_1$.

Структура отрывных течений. При резком изменении поперечного сечения (рис. 4.3) 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 (вальцово́й) зоной*.

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. 4.4, 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 уменьшаться. Это уже 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. 4.4, 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. 4.4, в, г).

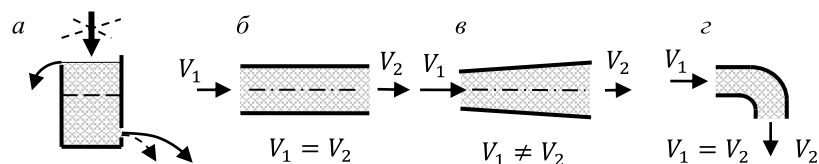


Рис. 4.4. Установившееся и неустановившееся (а), равномерное (б) и неравномерное (в, г) движение жидкости

Движение также может быть напорным и безнапорным. При *напорном* – поток ограничен со всех сторон твердой стенкой канала, например, в системах водопровода (рис. 4.5, 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 (г).

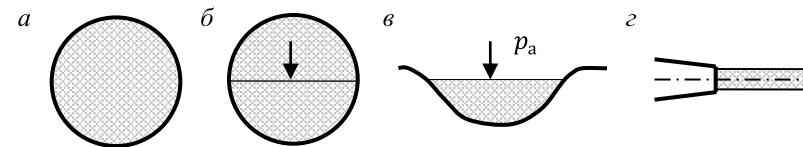


Рис. 4.5. Примеры напорного (а) и безнапорных (б, в, г) потоков

Режимы 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. Турбулентное движение характеризуется пульсацией давления и скоростей частиц, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости в потоке, т. е. вихревое движение (рис. 4.6).

При визуальном способе определения режима течения применяют меченые частицы (например, частицы алюминия) или окрашенные чернилами или тушью струйки, которые показывают *траектории* движения частиц жидкости и *линии тока*.

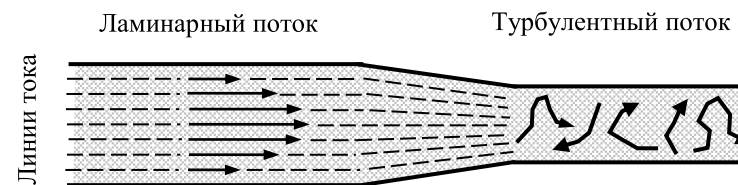
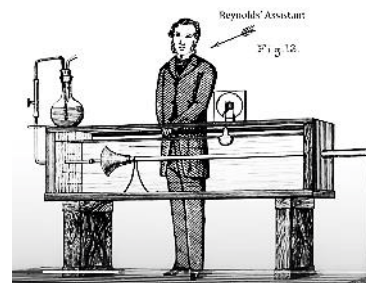


Рис. 4.6. Режимы течения жидкости



Английский ученый О. Рейнольдс при своих классических исследованиях режимов движения жидкости в исследуемый поток воды вводил струйку 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 размытию струйки и окрашиванию ею всего потока воды.

При расчетном способе определения режима вычисляется число Рейнольдса, которое является отношением сил инерции к силам вязкого трения внутри жидкости:

$$Re = Vd/\nu, \quad (4.2)$$

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 $Re_k = 2300$, соответствующим смене режимов движения жидкости в круглых трубах. 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 (4.2) 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.

Число Рейнольдса широко применяется и при моделировании гидроаэродинамических явлений.

Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

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

Описание устройства № 3

Устройство № 3 выполнено в прозрачном виде (рис. 4.7), 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 6, 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.

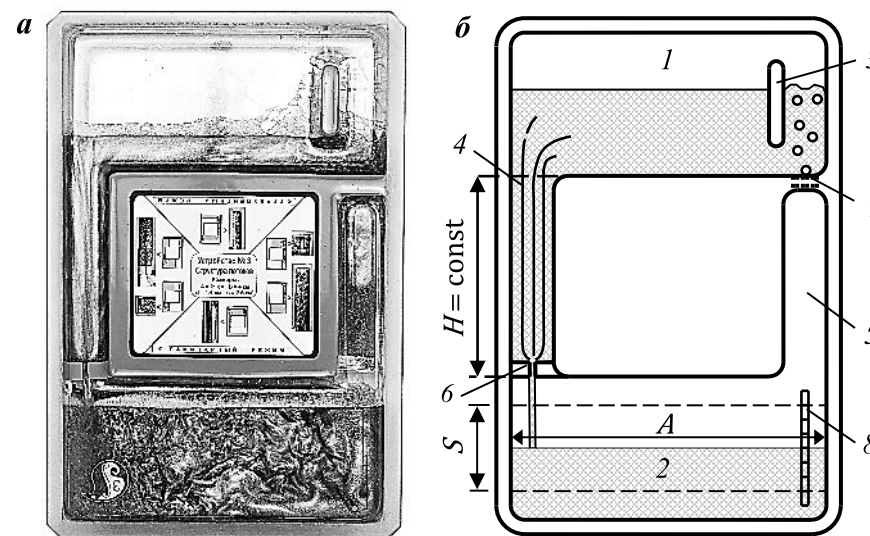


Рис. 4.7. Общий вид (а) и схема (б) устройства № 3:
1, 2 – баки; 3 – перегородка; 4, 5 – опытные каналы; 6 – щель;
7 – решетка; 8 – равномерная шкала

Устройство работает следующим образом. В положении устройства, указанном на рис. 4.7, 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* (рис. 4.7, 4.8, а) благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели б.

Если устройство перевернуть, то в канале 5 возникает установившееся *турбулентное течение* (рис. 4.8, б) ввиду больших скоростей из-за малого гидравлического сопротивления решетки 7. Устройство № 3 позволяет наблюдать переход ламинарного режима в турбулентный при сужении потока (рис. 4.8, з, д).

Порядок выполнения работы

1. Получить в канале 4 течение жидкости (рис. 4.7). Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол при произвольном наклоне устройства № 3 от себя. Определить режим течения в канале 4 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.

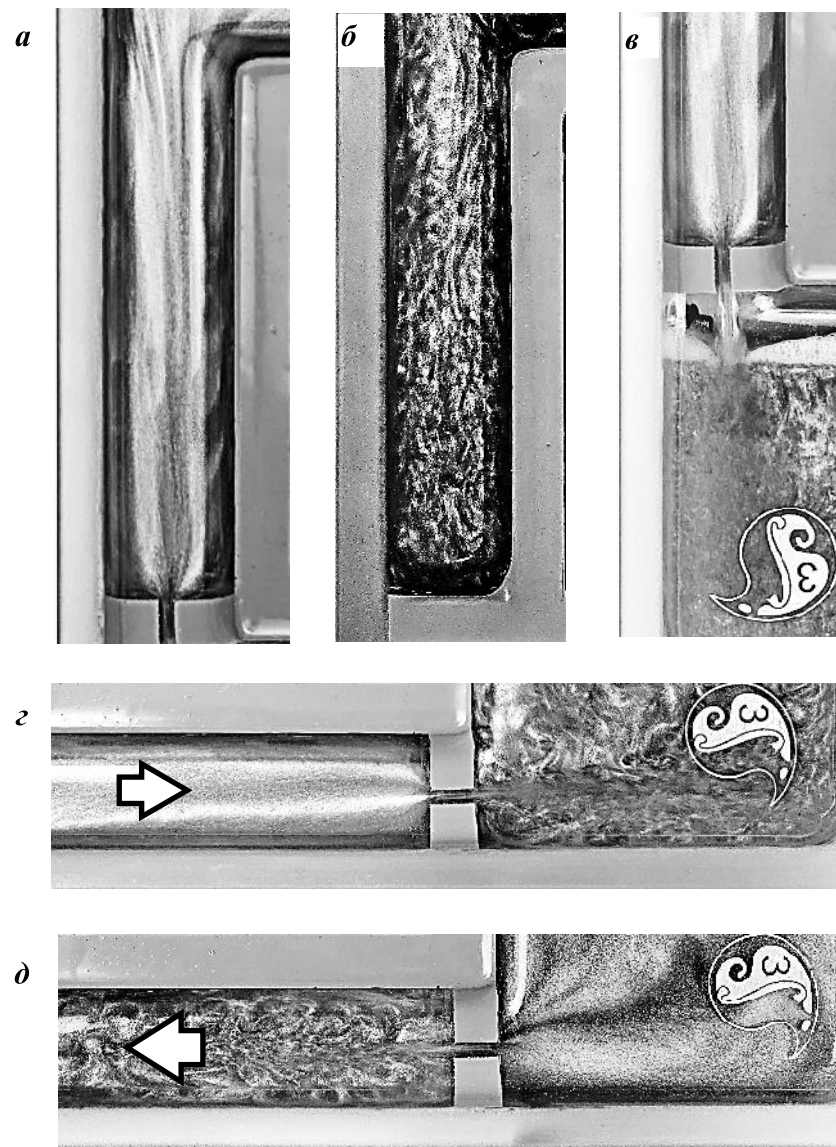


Рис. 4.8. Структура потоков жидкости при ламинарном (а) и турбулентном (б) течении, при истечении через отверстие (в) и переходе ламинарного режима в турбулентный при сужении потока (з, д)

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		

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

Лабораторная 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.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве № 3. В случаях, указанных на рис. 4.9, б, в, г в каналах возникает *неустановившееся* движение жидкости за счет непосредственного соединения воздушных полостей баков. Это позволяет проследить за изменением структуры потоков в процессе уменьшения их скорости.

1. Создать в канале 4 (см. рис. 4.7) ламинарный режим течения. Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол. Наблюдать структуру потока жидкости в канале 4. Обратит внимание на стабилизацию скорости.

2. Повернуть устройство в вертикальной плоскости по часовой стрелке на 180° (рис. 4.9, а). Наблюдать турбулентный режим течения в левом канале и в других каналах устройства № 3.

3. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал с решеткой занял нижнее горизонтальное положение (рис. 4.9, б). Наблюдать уменьшение скорости течения в канале со временем и процесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному.

4. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал со щелью занял нижнее горизонтальное положение (рис. 4.9, в). Наблюдать за структурой потока в баке 2 перед входом в щель. Обратит внимание на появление в нем линий тока. 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 зоны, транзитные струи и связь скоростей течения жидкости с площадями сечений каналов в соответствии с уравнением неразрывности.

5. При заполненном баке 1 поставить устройство так, чтобы канал с решеткой занял нижнее горизонтальное положение. Наблюдать структуру течения при обтекании перегородки 3 и процесс турбуликации потока за решеткой (рис. 4.9, з).

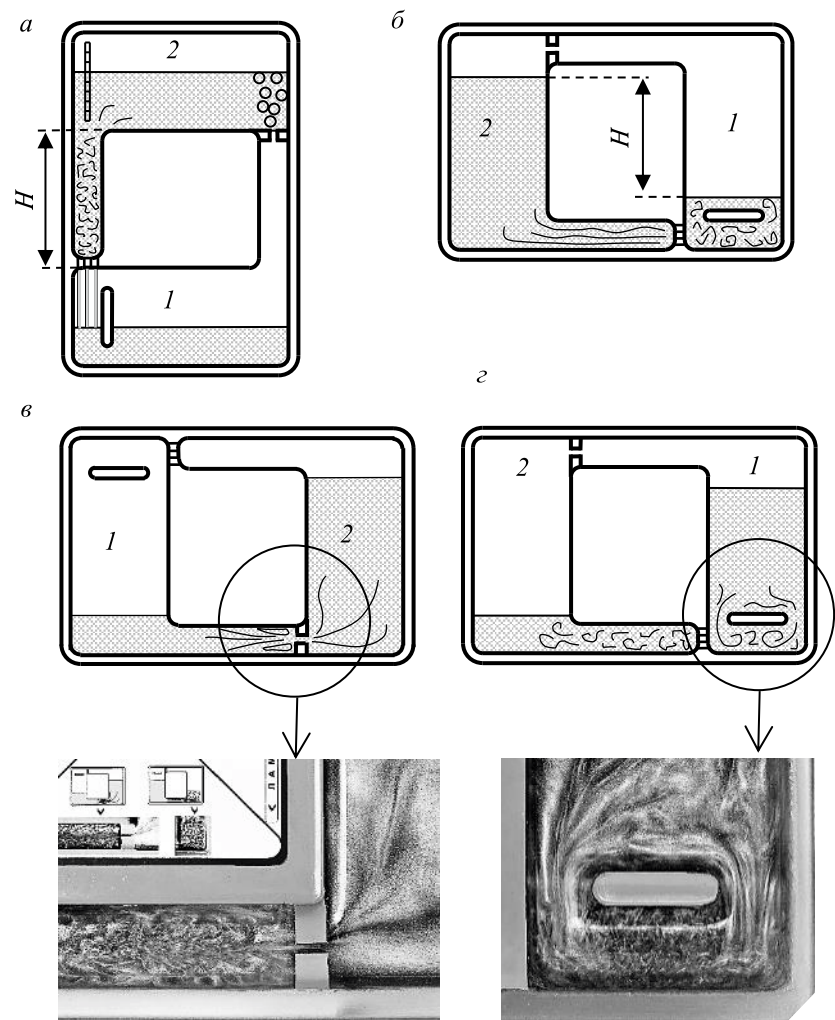


Рис. 4.9. Структура турбулентного потока (а), при плавном уменьшении скорости (б), сужении и расширении (в), обтекании стенки (з)

6. Сделать зарисовку структуры потоков жидкости для случаев, указанных в табл. 4.2, отметить вид и режим течения для этих случаев значком «+».

Таблица 4.2

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. 4.7)									
2. Свободное истечение из щели б на поверхность (рис. 4.7)									
3. Течение в канале постоянного сечения (рис. 4.9, а)									
4. Вход жидкости в трубу из бака (рис. 4.8, б)									
5. Внезапное сужение потока при входе в щель (рис. 4.9, в)									
6. Течение со свободной поверхностью потока (рис. 4.9, в)									
7. Внезапное расширение потока (рис. 4.9, в)									
8. Обтекание стенки (рис. 4.9, з)									

Контрольные вопросы

1. Назовите кинематические и гидравлические элементы потока.
2. Назовите виды и режимы движения жидкости и их отличия.
3. Как изменяются местные скорости по живому сечению потока?
4. Опишите структуру отрывных течений.
5. Изложите порядок определения режимов движения жидкости?
6. Приведите примеры систем с ламинарным и турбулентным течением.
7. Поясните ход расчета числа Рейнольдса при некруглых трубах.
8. Поясните принцип действия устройства № 3.
9. Как в нем достигается установившееся течение и смена режимов?
10. Как в опытах определяется расход жидкости и средняя скорость?
11. Как оценивается погрешность определения числа Рейнольдса?

Примеры решения задач

Задача 1. Определить число Рейнольдса и режим течения воды в водопроводной трубе диаметром $d = 200$ мм при расходе $Q = 0,05$ м³/с и температуре воды 20° С ($\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Решение. Определяем площадь живого сечения потока:

$$\omega = \pi d^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,2^2 / 4 = 0,0314 \text{ м}^2.$$

Средняя скорость течения воды в трубе

$$V = Q / \omega = 0,05 / 0,0314 = 1,59 \text{ м/с, тогда число Рейнольдса}$$

$$Re = Vd / \nu = 1,59 \cdot 0,2 / (1,01 \cdot 10^{-6}) = 314851.$$

Режим течения турбулентный, так как $Re = 314851 > Re_k = 2300$.

Задача 2. По трубопроводу диаметром $d = 100$ мм перекачивается нефть. Найти критическую скорость перехода ламинарного течения в турбулентное, если кинематическая вязкость нефти составляет $\nu = 7,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Решение. Критическое число Рейнольдса определяется так:

$$Re_k = V_k d / \nu = 2300, \text{ откуда}$$

$$V_k = Re_k \nu / d = 2300 \cdot 7,6 \cdot 10^{-6} / 0,1 = 0,175 \text{ м/с.}$$

Задача 3. Как изменится число Рейнольдса при переходе трубопровода от большего диаметра d к меньшему (рис. 4. б) при постоянстве расхода Q ?

Решение. Скорость течения из уравнения расхода:

$$V = Q / \omega = 4Q / (\pi d^2), \text{ тогда } Re = Vd / \nu = 4Q / (\pi d \nu).$$

Следовательно, число Рейнольдса увеличится во столько раз, во сколько уменьшится диаметр трубы.

Задача 4. Определить гидравлический радиус и эквивалентный диаметр живого сечения потока между двумя concentрическими трубами (рис. 4.9). Внутренний диаметр наружной трубы $D = 0,15$ м, а наружный диаметр внутренней трубы $d = 0,15$ м.

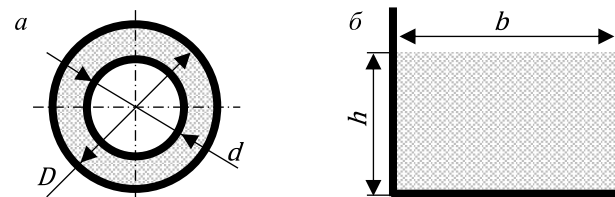


Рис. 4. 10. Живые сечения межтрубного потока жидкости (а) и потока жидкости в лотке (б)

Решение. Площадь живого сечения

$$\omega = \pi(D^2 - d^2) / 4 = 3,14(0,15^2 - 0,1^2) / 4 = 0,00981 \text{ м}^2.$$

Смоченный периметр живого сечения

$$\chi = \pi(D + d) = 3,14(0,15 + 0,1) = 0,785 \text{ м.}$$

Гидравлический радиус $R_r = \omega / \chi = 0,00981 / 0,785 = 0,0125$ м.

Эквивалентный диаметр $d_3 = 4R_r = 4 \cdot 0,0125 = 0,05$ м.

Задача 5. Жидкость течет в открытом лотке со скоростью $V = 0,1$ м/с. Глубина его наполнения $h = 30$ см, а ширина $b = 50$ см (рис. 4. 10). Определить режим течения и расход, если плотность жидкости $\rho = 1200$ кг/м³, а ее динамическая вязкость $\mu = 0,0015$ Па · с.

Решение. Смоченный периметр живого сечения

$$\chi = b + 2h = 0,5 + 2 \cdot 0,3 = 1,1 \text{ м.}$$

Площадь живого сечения $\omega = b \cdot h = 0,5 \cdot 0,3 = 0,15$ м².

Гидравлический радиус $R_r = \omega / \chi = 0,15 / 1,1 = 0,136$ м.

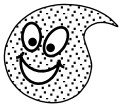
Эквивалентный диаметр $d_3 = 4R_r = 4 \cdot 0,136 = 0,544$ м.

Число Рейнольдса с учетом зависимости $\nu = \mu / \rho$:

$$Re = V d_3 \rho / \mu = 0,1 \cdot 0,544 \cdot 1200 / 0,0015 = 43520 > Re_k = 2300,$$

следовательно, режим течения турбулентный.

Расход жидкости $Q = V \omega = 0,1 \cdot 0,15 = 0,015$ м³/с.



О режимах течения с юмором

1. А Вы по жизни течете ламинарно или турбулентно?

Во всех стилях успеваю побывать...не успеваю сообразить – меня всё время затягивают воронки.

2. Ламинарный режим – это когда струйки движутся параллельно, турбулентный – перпендикулярно.

3. Турбулентность не позволяет скучать авиапассажирам.



4. Когда квантового физика Вернера Гейзенберга спросили, если бы он предстал перед Богом и получил возможность попросить о чем угодно, что бы это было, физик ответил: «Я бы задал ему два вопроса. Почему относительность? И почему турбулентность? Думаю, на первый вопрос у него точно будет ответ».

5. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Механическая энергия жидкости. Жидкость всегда обладает энергией, т. е. способностью совершить определенную работу. Обозначим в потоке кружком (рис. 5.1) 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* $E_{\text{кин}}$.

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 l после открытия его нижнего конца: $E_{\text{давл}} = G p/\gamma$.

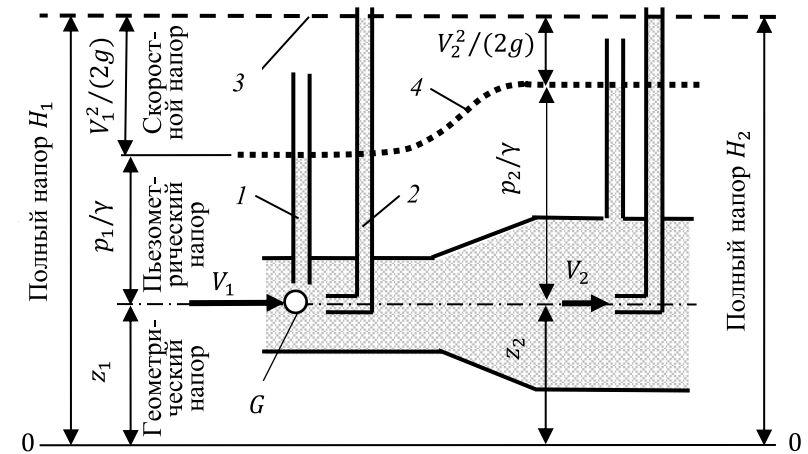


Рис. 5.1. Графическая интерпретация уравнения Бернулли для потока идеальной жидкости:

1 – пьезометр; 2 – трубка Пито; 3 – линия (напорная) полной энергии; 4 – линия (пьезометрическая) потенциальной энергии

Кинетическая энергия равна работе по подъему жидкости весом G с уровня в *пьезометре* 1 на уровень в *скоростной трубке* 2 (*трубке Пито*), 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. 5.1).

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

$$E = Gz + Gp/\gamma + GV^2/(2g). \quad (5.1)$$

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: $\text{Дж/Н} = \text{Н}\cdot\text{м/Н} = \text{м}$.

Поделив все члены уравнения (5.1) на G , получим выражение для *полного напора* (для полной удельной механической энергии) жидкости в виде суммы отдельных напоров:

$$H = z + p/\gamma + V^2/(2g), \quad (5.2)$$

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:

$$z_1 + p_1/\gamma + V_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + V_2^2/(2g), \quad (5.3)$$

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 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. 5.1), 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. 5.2). Поэтому *уравнение Бернулли для потока реальной жидкости* принимает такой вид:

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

где α – *коэффициент Кориолиса*; учитывает неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока: при ламинарном режиме течения $\alpha = 2$, при турбулентном часто не учитывается ($\alpha = 1$); $h_{тр}$ – *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_d и местных потерь h_m : $h_{тр} = h_d + h_m$.

Потери на трение по длине h_d (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* $I = h_{тр}/l$, а величина $I_p = (z + p/\gamma)/l$ – *пьезометрическим уклоном*.

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.

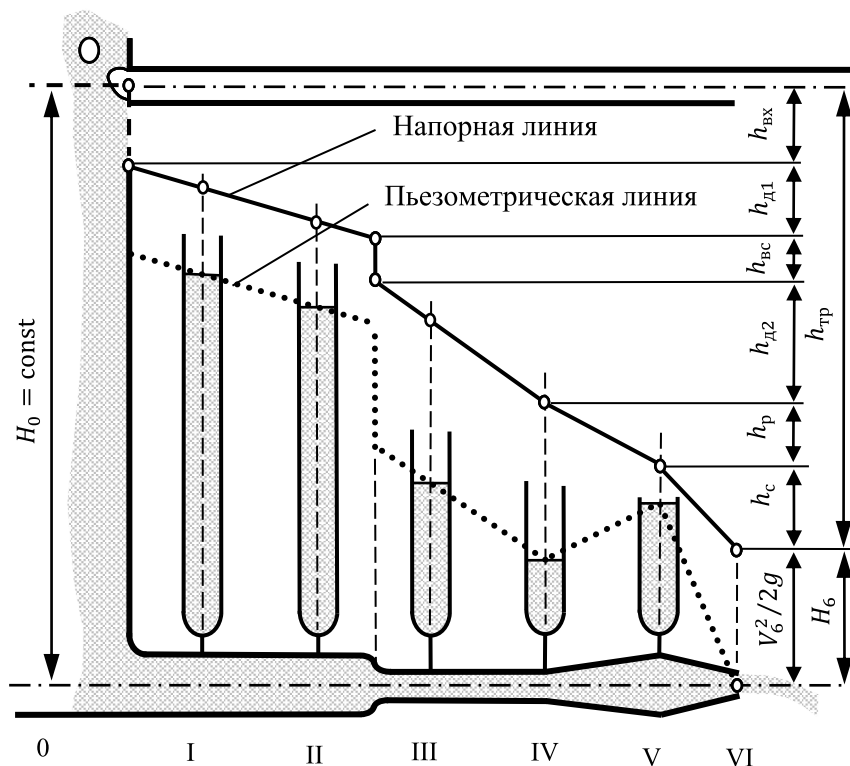


Рис. 5.2. Иллюстрация уравнения Бернулли:

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

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. 5.2).

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. 5.1, 5.2) 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. 5.2). Эти линии для потоков в конфузорах (конических сходящихся патрубках) расходятся, а в диффузорах (конических расширяющихся 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.

Лабораторная работа № 6

ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы. Опытное подтверждение уравнения Д. Бернулли, т. е. перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно (связи давления со скоростью).

Описание устройства № 4

Устройство № 4 содержит баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы постоянного 3 и переменного 4 сечений (рис. 5.3). 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.

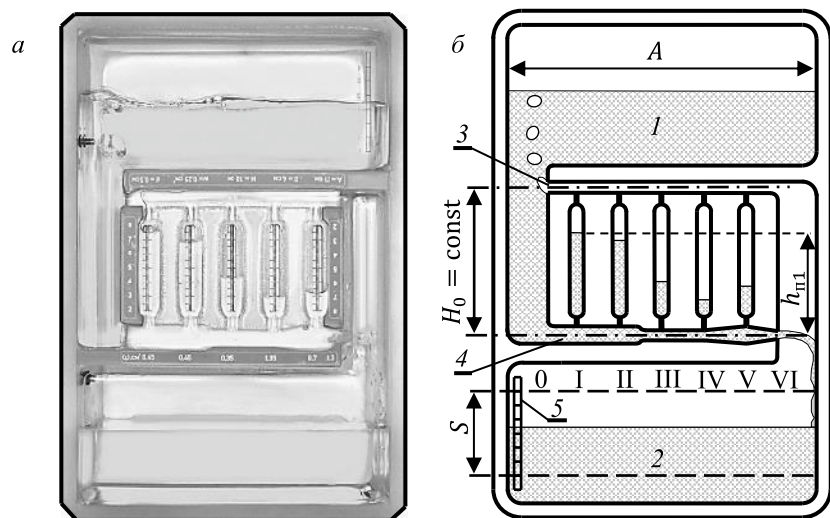


Рис. 5.3. Общий вид (а) и схема (б) устройства № 4:
1, 2 – баки; 3 – канал постоянного сечения; 4 – канал переменного сечения; 5 – уровневая шкала; I–V – пьезометры

Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 (рис. 5.3) 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 .
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. 5.1. Скорость в нулевом сечении (перед входом в канал) принять равной нулю. Так как опытный канал горизонтальный, то геометрический напор $z_1 = z_2 = 0$.

5. Вычертить в масштабе канал с осями пьезометров (рис. 5.2). Отложить от оси канала пьезометрические напоры $h_{п}$ 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 5.1

№ 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	$h_{п} = p/\gamma$								
4	Скоростной напор, см	$h_k = V^2/(2g)$								
5	Полный напор, см	$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}$								

$A = \dots$ 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 и пьезометрический 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?

Примеры решения задач

Задача 1. Определить расход идеальной (невязкой) жидкости при истечении из открытого бака в атмосферу через трубу переменного сечения (рис. 5.4) и построить пьезометрическую и напорную линии, если известны отметки $z_1 = 24$ м и $z_4 = 8$ м, диаметры резервуара и труб $d_1 = 2$ м, $d_2 = 125$ мм, $d_3 = 63$ мм, $d_4 = 75$ мм.

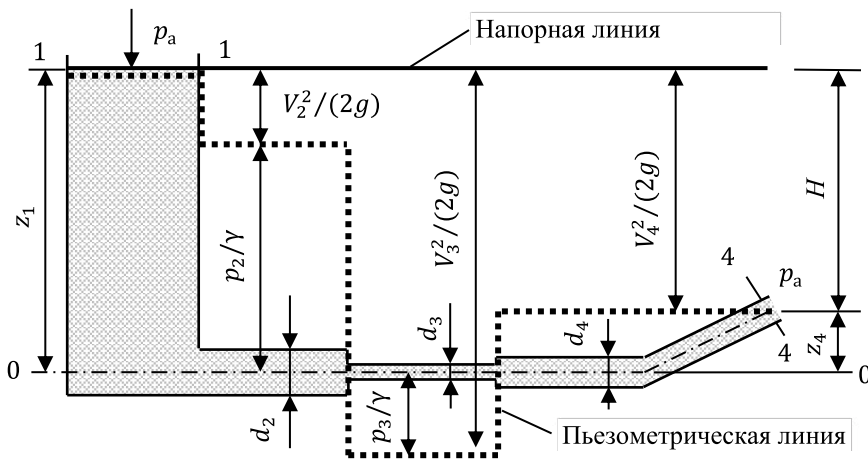


Рис. 5.4. Построение напорной и пьезометрической линий для потока идеальной жидкости в трубопроводе переменного сечения

Решение. 1. Определим расход, используя уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 4-4, приняв избыточную систему отсчета давления

$$z_1 + p_1/\gamma + \alpha_1 V_1^2/(2g) = z_4 + p_4/\gamma + \alpha_4 V_4^2/(2g) + h_{тр},$$

где $z_1 = 24$ м; $z_4 = 8$ м; $p_1 = p_4 = 0$; $\alpha_1 V_1^2/(2g) \approx 0$; $\alpha_1 = \alpha_4 = 1$; $h_{тр} = 0$.

Подставив эти данные в исходное уравнение, получим

$V_4^2/(2g) = z_1 - z_4 = H = 24 - 8 = 16$ м, откуда скорость на выходе:

$$V_4 = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 16} = 17,7 \text{ м/с.}$$

По скорости в сечении 4-4 определим расход:

$$Q = V_4 \omega_4 = V_4 \pi d_4^2/4 = 17,7 \cdot 3,14 \cdot 0,075^2/4 = 0,0781 \text{ м}^3/\text{с},$$

а по формуле $V = 4Q/(\pi d^2)$ – скорости $V_2 = 6,36$ м/с, $V_3 = 6,36$ м/с и скоростные напоры $V_2^2/(2g) = 2,07$ м, $V_3^2/(2g) = 32,1$ м.

2. Построим напорную линию (рис. 5.4), начиная с сечения 1-1, где отсутствует скоростной $V_1^2/(2g) = 0$ и пьезометрический напор $p_1/\gamma = 0$ (так как избыточное давление $p_1 = 0$). Полный напор для этого сечения равен геометрическому напору z_1 , который в масштабе откладываем от плоскости сравнения 0-0 и проводим напорную линию параллельно плоскости сравнения ввиду отсутствия потерь энергии ($h_{тр} = 0$) для идеальной жидкости. Линия показывает, что полный напор во всех сечениях одинаков и равен $z_1 = 24$ м.

3. Построим пьезометрическую линию, начиная от сечения 4-4. Для этого находим пьезометрический напор, откладывая от плоскости сравнения 0-0 геометрический напор $z_4 = 8$ м и пьезометрический напор $p_4_{изб}/\gamma = 0$ – пьезометрическая линия проходит через центр тяжести выходного сечения. Для определения пьезометрического напора в сечениях 2-2 и 3-3 нужно отложить вниз от линии полного напора скоростные напоры $V^2/(2g)$ (рис. 5.4).

Из полученного графика видно: 1 – изменение диаметра по длине потока приводит к противоположным изменениям удельных кинетической и потенциальной энергий при сохранении постоянства их суммы; 2 – на восходящем участке трубы с диаметром d_4 давление p по течению падает, но сохраняется потенциальный напор $z + p/\gamma = \text{const}$; 3 – на участке с диаметром d_3 пьезометрическая линия проходит ниже трубы, что свидетельствует о возникновении вакуума (давления ниже атмосферного: $p_3_{изб}/\gamma < 0$).

Задача 2. Определить без учета потерь напора высоту подъема воды в трубке, один конец которой присоединен к узкому сечению трубопровода, а другой – опущен в воду (рис. 5.5, а). Расход воды в трубе $Q = 0,025$ м³/с, ее диаметры $d_1 = 100$ мм и $d_2 = 50$ мм, избыточное давление $p_1 = 49000$ Па.

Решение. Запишем уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 относительно оси трубы без учета потерь напора и приняв $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$:

$$p_1/\gamma + V_1^2/(2g) = p_2/\gamma + V_2^2/(2g).$$

Учитывая выражение для скоростей $V = Q/\omega = 4Q/(\pi d^2)$ получим:

$$\begin{aligned} p_2/\gamma &= p_1/\gamma + 4^2 Q^2 (1/d_1^4 - 1/d_2^4)/(2g\pi^2) = \\ &= 49000/9810 + 4^2 \cdot 0,025^2 (1/0,1^4 - 1/0,05^4)/(2 \cdot 9,8 \cdot 3,14^2) = -2,7 \text{ м.} \end{aligned}$$

Получена отрицательная (вакуумметрическая) высота, на которую и поднимется вода в трубке (см. рис. 5.5, а).

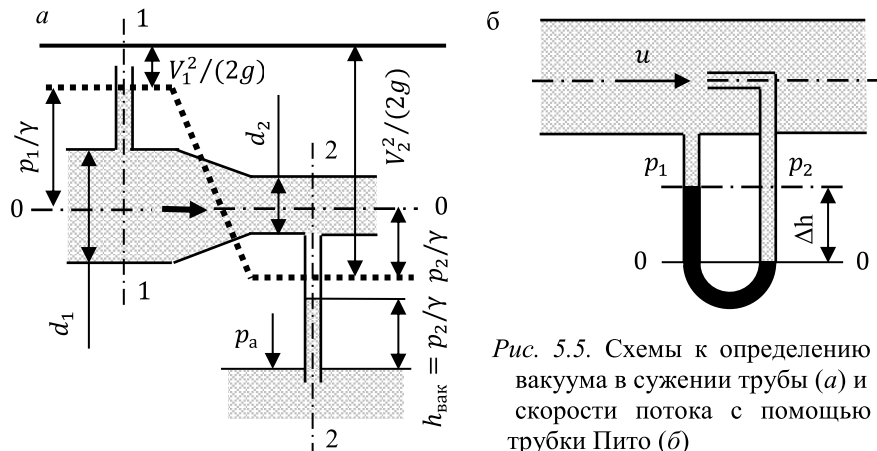


Рис. 5.5. Схемы к определению вакуума в сужении трубы (а) и скорости потока с помощью трубки Пито (б)

Задача 3. Рассчитать скорость движения воды на оси трубы u , измеряемую трубкой Пито. Перепад уровней ртути в дифференциальном манометре $\Delta h = 20$ мм, поправочный коэффициент на нарушение потока трубкой $\varphi = 1$.

Решение. Для определения скоростного напора h_k запишем уравнение равновесия в ртутном манометре относительно плоскости 0-0:

$$p_1 + \Delta h \gamma_p = p_2 + \Delta h \gamma_B,$$

где p_1 и p_2 – давление в трубках манометра на уровне верхней отметки ртути; γ_p и γ_B – удельный вес ртути (132900 Н/м^3) и воды (9790 Н/м^3). Тогда

$$h_k = (p_2 - p_1)/\gamma_B = \Delta h(\gamma_p/\gamma_B - 1) = 0,02(132900/9790 - 1) = 0,252 \text{ м.}$$

Скорость движения воды на оси трубы

$$u = \varphi \sqrt{2gh_k} = 1 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,252} = 2,22 \text{ м/с.}$$



Об уравнении Бернулли с юмором

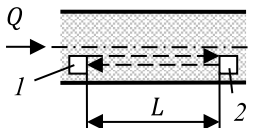
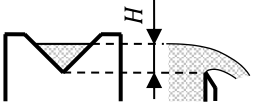
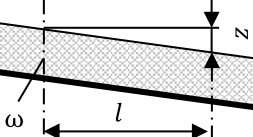
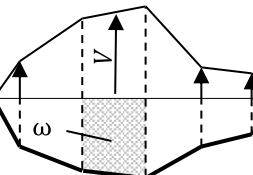
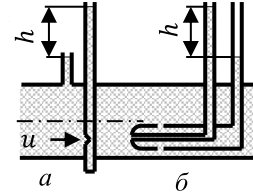
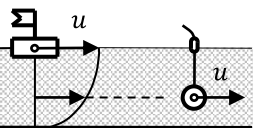
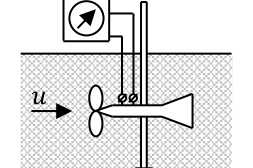
1. Согласно закону Бернулли, где меньше давление, там больше скорость. Поэтому для повышения скорости поиска новых идей, нужно понизить давление на психику. Уезжаем на море и сразу делаем несколько открытий!

6. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ

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. 6.1 приводятся основные методы измерения расхода.

Таблица 6.1

Название метода измерения расхода и приборов измерения скорости	Схема устройства
1. <i>Объемный метод</i> сводится к определению времени наполнения мерного сосуда. Расход определяется отношением объема W мерного сосуда к времени t его наполнения: $Q = W/t$	
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	
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 Q в нем	
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>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 H перед препятствием (водосливом) от расхода Q</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>. 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>	
<p>9. <i>Пьезометрическая и скоростная и трубки (а)</i> позволяют определить скорость u через скоростной напор $h = u^2/(2g)$. Их конструктивно объединяют в <i>гидродинамическую трубку (б)</i></p>	
<p>10. <i>Поплавки</i> используют для определения скоростей течения водотока из формулы $u = L/t$, где L – длина пути поплавка, пройденного им за время t</p>	
<p>11. <i>Гидрометрические вертушки</i> используются для измерения скорости течения воды в открытых руслах. Метод измерения основан на зависимости частоты вращения ω лопастного винта от скорости u набегающего на него потока</p>	

Лабораторная работа № 7 ИЗУЧЕНИЕ РАСХОДОМЕРА ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Цель работы. Приобретение навыков определения расхода по перепаду давления при сужении канала.

Описание расходомера переменного перепада давления

В настоящей работе расходомер переменного перепада давления изучается на устройстве № 4 (рис. 5.3). В качестве расходомера используется сужение канала 4 между сечениями II–II и III–III и два пьезометра в этих сечениях (рис. 6.1).

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 (5.4) в виде:

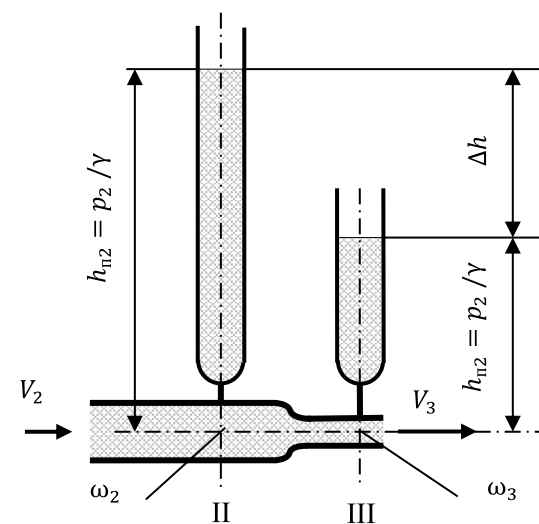


Рис. 6.1. Схема расходомера переменного перепада давления

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} \quad \text{или} \quad \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_3}{\gamma} = \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}. \quad (6.1)$$

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:

$$Q = \mu \sqrt{2g\omega_2^2\omega_3^2/(\omega_2^2 - \omega_3^2)} \sqrt{\Delta h} = \mu C \sqrt{\Delta h}, \quad (6.2)$$

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.

Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 (см. рис. 5.3, б) 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. 6.1).
3. Измерить время t перемещения уровня жидкости в баке с равномерной шкалой на произвольно заданную величину S , обычно на 5 см (см. рис. 5.3, б).
4. Определить расход Q^* методом переменного перепада давления по порядку, указанному в табл. 6.2 (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 его перемещения определить расход воды Q в канале 4 объемным методом.
6. Оценить относительное расхождение определения расхода двумя методами.

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?



О счетчиках воды с юмором

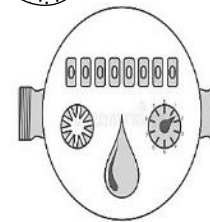


Таблица 6.2

№ 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, м ^{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, %	$\delta p = \frac{100(Q - Q^*)}{Q}$	

7. ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

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

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

$$h_{тр} = h_d + h_m. \quad (7.1)$$

Потери напора по длине h_d (линейные потери) вызваны тормозящим действием стенок, приводящим к вязкостному трению частиц 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. 7.1, а).

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

$$h_d = \lambda (l/d) V^2 / (2g), \quad (7.2)$$

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

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:

$$\lambda = 64/Re. \quad (7.3)$$

Подставим это выражение для λ в формулу (7.2) и распишем число Рейнольдса $Re = Vd/\nu$. Получим, что в ламинарном потоке

потери напора по длине пропорциональны средней скорости в первой степени ($h_d \sim V$) (рис. 7.1, б).

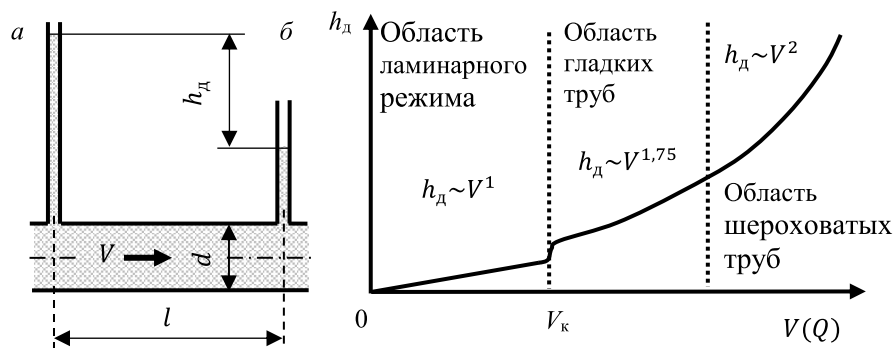


Рис. 7.1. Схема измерения потерь напора по длине h_d (а) и вид их зависимости от скорости V (или расхода Q) жидкости (б)

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. 7.2, а). Поэтому в области гидравлически гладких труб, как в ламинарном режиме, λ зависит только от числа Рейнольдса и вычисляется по эмпирической формуле Блазиуса:

$$\lambda = 0,316/Re^{0,25}. \quad (7.4)$$

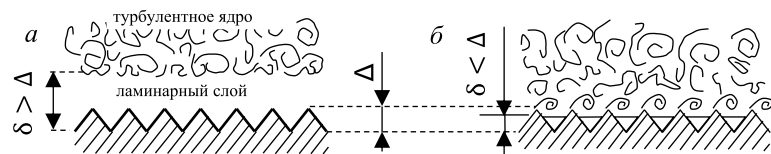


Рис. 7.2. Гидравлически гладкая (а) и шероховатая стенка (б)

Подставляя выражение (7.4) для λ в формулу (7.2), легко показать, что в этой области $h_d \sim V^{1,75}$ (рис. 7.1, б).

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. 7.2, б), что приводит к возрастанию потерь напора. В этом случае труба (стенка) называется *гидравлически шероховатой*, а коэффициент трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0.11(68/Re + \Delta/d)^{0,25}. \quad (7.5)$$

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:

$$\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25}, \quad (7.6)$$

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. 7.3).

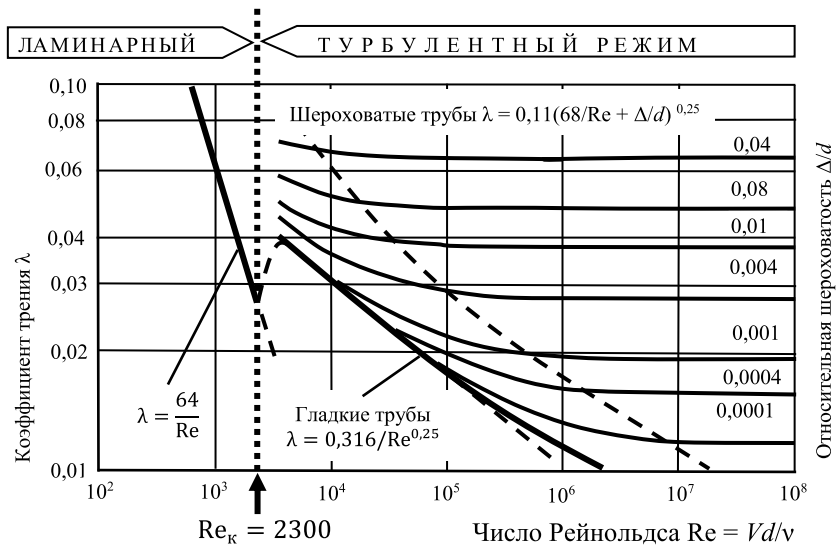


Рис. 7.3. График Колбрука – Уайта

Лабораторная работа № 8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

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

Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 2 поставить устройство № 4 на стол баком 1 (см. рис. 5.3, а) 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. 7.4), измерить время t изменения уровня в баке 2 на заданную величину S , длину l участка III–V и температуру T в помещении.

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

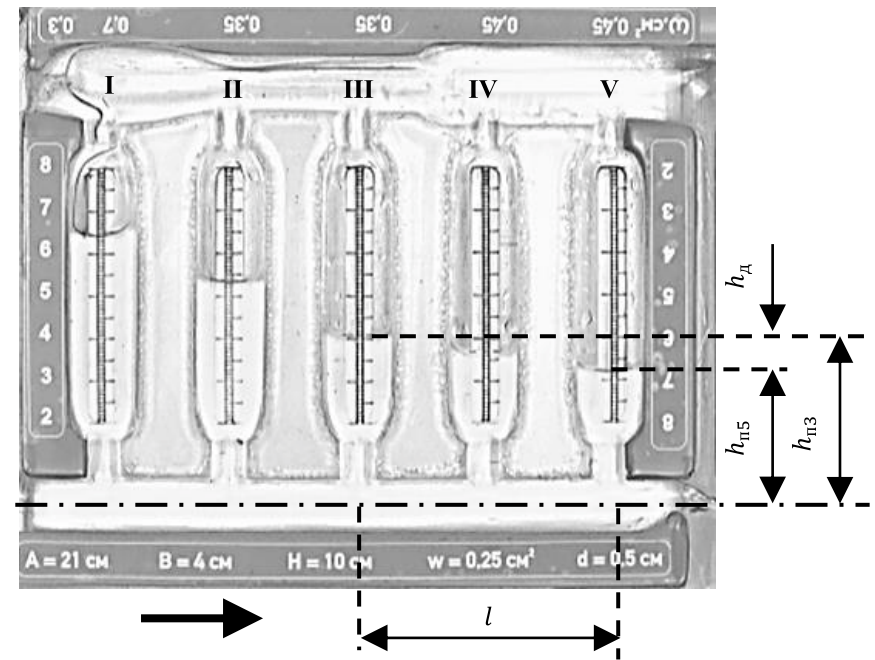


Рис. 7.4. Схема замеров при опытном определении потерь напора

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

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?

Таблица 7.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значение
1	Показания пьезометров, см	$h_{пз}$ и $h_{п5}$	
2	Длина участка с равномерным течением, см	l	
3	Опытное значение потерь напора по длине, см	$h_d = h_{пз} - h_{п5}$	
4	Кинематический коэффициент вязкости воды ν , см ² /с	$\frac{17,9}{1000 + 34T + 0,22T^2}$	
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 $\Delta = 0,001$ мм.
2. $d = \dots$ см; $\omega = \dots$ см²; $A = \dots$ см; $B = \dots$ см; $T = \dots$ °C; $S = \dots$ см;
3. $t = \dots$; $Q = \frac{ABS}{t} = \dots$ см³/с; $V = Q/\omega = \dots$ см/с.

Примеры решения задач

Задача 1. По трубопроводу диаметром $d = 0,5$ м течет жидкость в ламинарном режиме с расходом $Q = 0,1$ м³/с (рис. 7.1, а). Потери напора на участке длиной $l = 1000$ м составляют $h_d = 1$ м. Определить кинематическую ν и динамическую μ вязкость жидкости, если ее плотность $\rho = 1000$ кг/м³.

Решение. Определим скорость потока жидкости V в трубопроводе:

$$V = Q/\omega = 4Q/(\pi d^2) = 4 \cdot 0,1/(3,14 \cdot 0,5^2) = 0,509 \text{ м/с} .$$

Найдем коэффициент гидравлического трения λ , выразив его из формулы Дарси – Вейсбаха (7.2) $h_d = \lambda (l/d) V^2/(2g)$:

$$\lambda = 2gh_d d/(lV^2) = 2 \cdot 9,81 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot / (1000 \cdot 0,509^2) = 0,0379.$$

Учитывая, что при ламинарном течение $\lambda = 64/Re = 64\nu/(Vd)$, найдем кинематическую ν , а затем и динамическую μ вязкость жидкости

$$\nu = Vd\lambda/64 = 0,509 \cdot 0,5 \cdot 0,0379/64 = 0,000151 = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$\mu = \nu \rho = 15,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 15,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

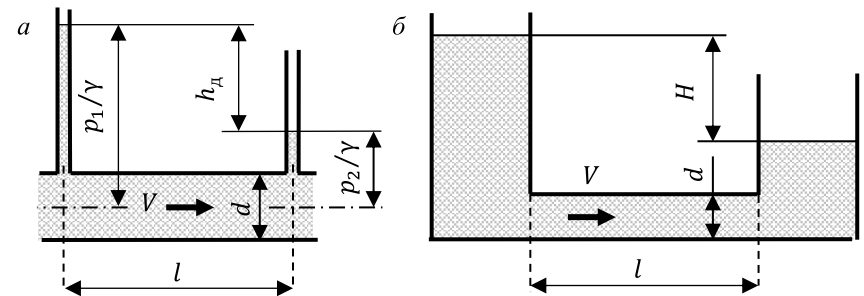


Рис. 7.5. Схемы измерения потерь h_d (а) и перетекания масла (б)

Задача 2. Из одного бака в другой по трубе диаметром $d = 0,05$ м и длиной $l = 10$ м перетекает масло АМГ-10 с вязкостью $\nu = 20 \cdot 10^{-6}$ м²/с (рис. 7.1, а). Определить напор H , при котором произойдет переход от турбулентного режима к ламинарному (местными потерями напора пренебречь).

Решение. Определим критическую скорость течения масла V_k и коэффициент гидравлического трения λ при смене режима

$$V_k = 2300 \cdot \nu/d = 2300 \cdot 20 \cdot 10^{-6}/0,05 = 0,92 \text{ м/с};$$

$$\lambda = 64/Re = 64/2300 = 0,028, \text{ тогда}$$

$$H = h_d = \lambda (l/d) V_k^2/(2g) = 0,028 (10/0,05) 0,92^2/(2 \cdot 9,8) = 0,24 \text{ м}.$$

Задача 3. Определить потери напора на трение по длине h_d в трубопроводе с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,1$ мм, диаметром $d = 0,2$ м и длиной $l = 1$ км при расходе воды $Q = 20$ л/с. Вязкость воды $\nu = 0,01$ см²/с.

Решение. Скорость течения воды в трубопроводе:

$$V = Q/\omega = 4Q/(\pi d^2) = 4 \cdot 0,02/(3,14 \cdot 0,2^2) = 0,64 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$Re = Vd/\nu = 0,64 \cdot 0,2/(0,01 \cdot 10^{-4}) = 128000 > 2300.$$

Находим коэффициент гидравлического трения по формуле (7.5):

$$\lambda = 0,11(68/128000 + 0,1/200)^{0,25} = 0,0197,$$

а потери напора – по формуле (7.2):

$$h_d = \lambda (l/d) V^2/(2g) = 0,0197(1000/0,2) 0,64^2/(2 \cdot 9,81) = 2,06 \text{ м.}$$

Задача 4. Вода с расходом $Q = 20$ л/с перекачивается по наклонному трубопроводу диаметром $d = 0,2$ м и длиной $l = 1$ км при манометрическом (избыточном) давлении в первом сечении $p_1 = 200$ кПа. Определить давление p_2 во втором сечении трубопровода, если это сечение выше первого на $\Delta z = 10$ м, а коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,022$.

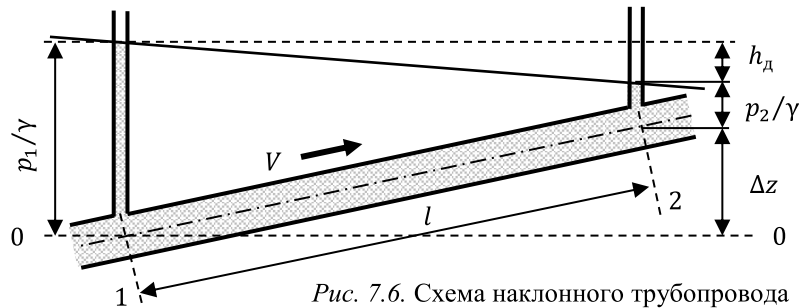


Рис. 7.6. Схема наклонного трубопровода

Решение. Согласно уравнению неразрывности $V_1 = V_2 = V$ уравнение Бернулли (5.4) для сечений 1 и 2 принимает вид:

$$p_1/\gamma = \Delta z + p_2/\gamma + h_d.$$

Скорость течения воды в трубопроводе:

$$V = Q/\omega = 4Q/(\pi d^2) = 4 \cdot 0,02/(3,14 \cdot 0,2^2) = 0,64 \text{ м/с.}$$

Потери напора – по формуле (7.2):

$$h_d = \lambda (l/d) V^2/(2g) = 0,022(1000/0,2) 0,64^2/(2 \cdot 9,81) = 2,3 \text{ м.}$$

Давление во втором сечении

$$p_2 = p_1 - \gamma(\Delta z + h_d) = 200 - 9,81(10 + 2,3) = 79,3 \text{ кПа.}$$

8. МЕСТНЫЕ ПОТЕРИ НАПОРА

Местные потери напора жидкости возникают на коротких участках трубопровода с препятствиями для потока, называемыми *местными сопротивлениями* (рис. 8.1). К ним относят фасонные части трубопроводов (внезапное расширение и сужение труб, диффузоры, конфузоры, колена) и различные устройства (вентили, краны, задвижки, клапаны, фильтры, расходомеры).

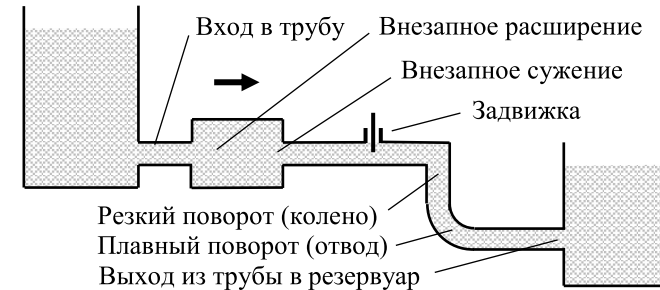


Рис. 8.1. Примеры местных гидравлических сопротивлений

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 h_m .

Экспериментальное определение местных потерь при упрощенном способе сводится к измерению разности полных напоров жидкости до и после местного сопротивления на участке с резко изменяющимся движением. Например, потери напора на внезапное расширение горизонтального потока (рис. 8.2, а):

$$h_{вр} = [p_1/\gamma + \alpha_1 V_1^2/(2g)] - [p_2/\gamma + \alpha_2 V_2^2/(2g)]. \quad (8.1)$$

Для более точного определения местных потерь нужно из вышеуказанной величины вычесть потери по длине h_d .

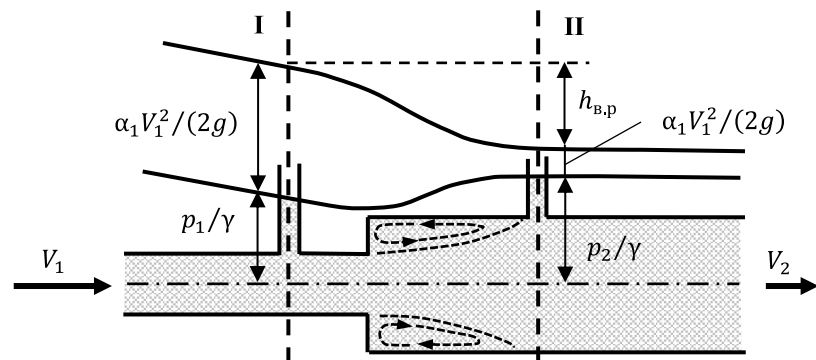


Рис. 8.2. Определение местных потерь в горизонтальной трубе

Если диаметры трубы до и после местного сопротивления одинаковы, то скоростные напоры в мерных сечениях равны: $\alpha_1 V_1^2 / (2g) = \alpha_2 V_2^2 / (2g)$. Поэтому местные потери напора в горизонтальной трубе постоянного сечения, например, в вентиле (рис. 8.3, а) измеряются только разностью показаний пьезометров

$$h_{\text{в}} = p_1 / \gamma - p_2 / \gamma. \quad (8.2)$$

Если местное сопротивление расположено на негоризонтальном участке трубы постоянного сечения (рис. 8.3, б), то следует учитывать геометрическую высоту мерных сечений z :

$$h_{\text{кол}} = (z_1 + p_1 / \gamma) - (z_2 + p_2 / \gamma). \quad (8.3)$$

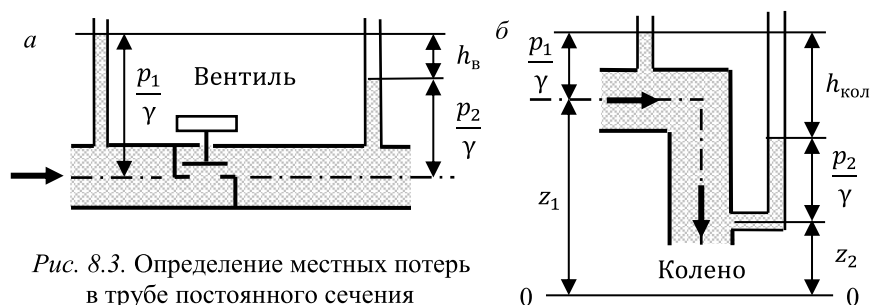


Рис. 8.3. Определение местных потерь в трубе постоянного сечения

В инженерных расчетах для определения местных потерь напора h_m используется формула Вейсбаха, выражающая потери в долях от скоростного напора $V^2 / (2g)$:

$$h_m = \xi V^2 / (2g), \quad (8.4)$$

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

При расчете местных потерь используются справочные эмпирические значения коэффициента местного сопротивления ξ , которые зависят от вида, геометрии местных сопротивлений и числа Рейнольдса Re (рис. 8.1).

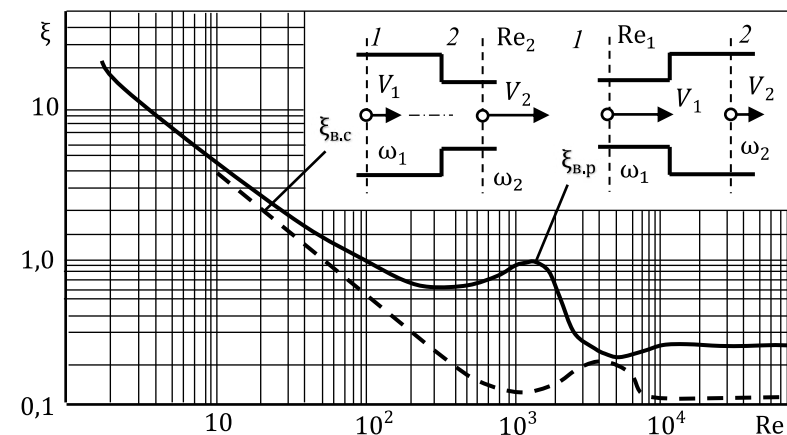


Рис. 8.4. Зависимость коэффициента ξ (отнесенного к меньшему сечению) от числа Рейнольдса Re для внезапного сужения при $\omega_2 / \omega_1 = 0,8$ и для внезапного расширения при $\omega_1 / \omega_2 = 0,5$

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, которые не зависят от числа Рейнольдса (рис. 8.4) и приводятся в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Значения коэффициентов ξ местных сопротивлений

Вид местного сопротивления	Схема	Значение коэффициента ξ				
Вход в трубу		$\xi_{вх} = 0,5$; с сеткой – 6 и обратным клапаном – 10				
Выход из трубы в бак		$\xi_{вых} = 1,0$				
Внезапное сужение		$\xi_{в.с} = 0,5[1 - (d/D)^2]$				
Внезапное расширение		$\xi_{в.р} = [(D/d)^2 - 1]^2$				
Плавный поворот трубы на угол $\alpha = 90^\circ$		$\xi_{п.пов} = 0,5$				
Резкий поворот трубы на угол $\alpha = 90^\circ$		$\xi_{р.пов} = 1,2$				
Диафрагма		d/D	0,9	0,7	0,5	0,3
		$\xi_{диаф}$	0,52	4,8	29	292
Вентиль полностью открытый		$D, \text{ мм}$	13	25	50	100
		ξ_v	10,8	6,1	4,6	4,1
Задвижка		h/D	1,0	0,75	0,50	0,25
		ξ_z	0,16	0,68	3,0	20
Кран пробковый		φ°	5	20	40	70
		$\xi_{кр}$	0,05	1,56	17,3	675

Табличные значения коэффициентов определяются только геометрией местного сопротивления. Так, например, для *внезапного расширения* потока получена теоретическая формула:

$$\xi_{вр1} = (1 - \omega_1/\omega_2)^2 \text{ или } \xi_{вр2} = (\omega_2/\omega_1 - 1), \quad (8.5)$$

$$\text{при этом } h_{вр} = \xi_{вр1} V_1^2 / (2g) = \xi_{вр2} V_2^2 / (2g), \quad (8.6)$$

где ω_1 и ω_2 – площади первого и второго живых сечений потока; V_1 и V_2 – средние скорости потока в этих сечениях (см. рис. 8.2).

Выход из трубы в бак является частным случаем внезапного расширения при $\omega_1 \ll \omega_2$ и $V_2 \approx 0$, поэтому принимают $\xi_{вр1} = 1$.

Для *внезапного сужения* применяют полуэмпирическую формулу $\xi_{в.с} = 0,5(1 - \omega_2/\omega_1)$. Здесь ω_1 и ω_2 – соответственно, площади сечений потока до и после сопротивления. Поэтому при входе жидкости из бака в трубу с острыми кромками коэффициент сопротивления $\xi_{в.с} = 0,5$.

При *постепенном расширении* потока (в диффузоре) потери $h_{диф}$ выражаются в долях потерь напора $h_{в.р.}$ по формуле

$$h_{диф} = \xi_{диф} h_{в.р.} = k_\theta \xi_{в.р.} V_1^2 / (2g), \quad (8.7)$$

где коэффициент сопротивления диффузора $\xi_{диф} = k_\theta \xi_{в.р.}$; при углах конусности ($\theta \leq 10^\circ$) течение происходит безотрывно и эмпирический коэффициент k_θ составляет 0,2. С ростом угла возникает отрыв потока от стенки и повышение k_θ до 0,75 при $\theta = 30^\circ$ и до максимального значения 1,4 ($\xi_{диф} = 1,4 \xi_{в.р.}$) при $\theta = 60^\circ$. Дальнейшее увеличение угла конусности диффузора до $\theta = 180^\circ$ (при

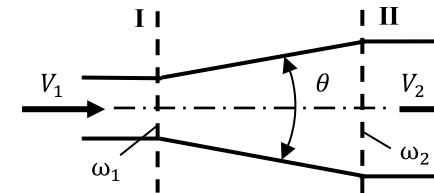


Рис. 8.5. Схема конического диффузора

внезапном расширении) снижает значение коэффициента сопротивления диффузора до $\xi_{в.р.}$. Поэтому для снижения потерь напора вместо диффузоров с углом более 40° применяют внезапное расширение.

6. Путем замеров перепадов на напорной линии определить опытные значения потерь напора на внезапное сужение $h_{в.с}$ и на плавное расширение потока (в диффузоре) h_p .

7. Вычислить значения коэффициентов местных потерь $\xi_{в.с}$ и $\xi_{в.р}$ для квадратичной области сопротивления, где они не зависят от числа Re. Сравнить их со значениями, найденными из справочных зависимостей на рис. 8.4 при $Re > 10\,000$.

4. Найти расчетные значения местных потерь h_m^* с учетом Re по указанному в табл. 8.3 порядку, сравнить их с опытными значениями h_m . На основе приведенных общих сведений объяснить возможные расхождения.

Таблица 8.3

№ 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 местных потерь, см	$h_m (h_{в.с} \text{ и } h_p)$				
4	Коэффициенты ξ внезапных сужения и расширения при $Re > 10\,000$	$\xi_{в.с} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$				
		$\xi_{в.р} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2$				
5	Расчетное значение числа Рейнольдса	$Re = \frac{Vd}{\nu}$				
6	Коэффициенты ξ с учетом Re из рис. 8.4 и $k_{30} = 0,75$	ξ	$\xi = \xi_{в.с}$		$\xi = k_{\theta} \xi_{в.р}$	
7	Расчетные значения местных потерь с учетом Re и k_{θ}	$h_m^* = \xi \frac{V^2}{2g}$				

Примечание. Принять диаметр канала в расчетном сечении $d = 0,7$ см, кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 0,01$ см²/с, угол расширения $\theta = 30^\circ$.

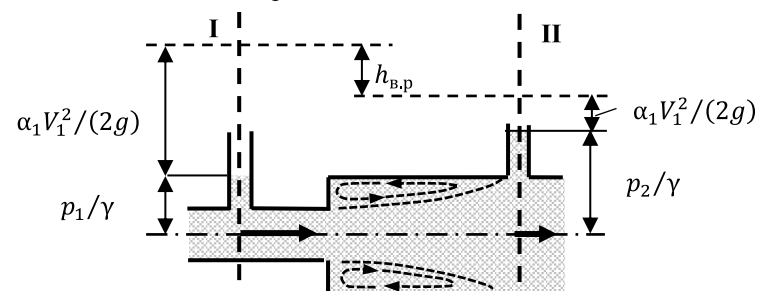
Контрольные вопросы

1. Что такое местные сопротивления? Перечислите их виды.
2. Объясните физическую сущность местных потерь напора.
3. Изобразите схемы течения жидкости в местных сопротивлениях.
4. Напишите и поясните формулу Вейсбаха для местных потерь.
5. От каких факторов зависят местные потери?
6. Как определяют коэффициенты ξ при расчетах и в опытах?

Примеры решения задач

Задача 1. Определить потери напора при внезапном расширении трубопровода $h_{в.р}$ (рис. 8.), если показания пьезометров $p_1/\gamma = 16$ см и $p_2/\gamma = 30$ см, диаметры труб $d_1 = 2$ см и $d_2 = 5$ см, расход $Q = 1$ л/с.

Решение. Найдем скорости потока воды в сечениях I-I и II-II:



$$V_1 = Q/\omega_1 = 4Q/(\pi d_1^2) = 4 \cdot 0,001/(3,14 \cdot 0,02^2) = 3,18 \text{ м/с;}$$

$$V_2 = Q/\omega_2 = 4Q/(\pi d_2^2) = 4 \cdot 0,001/(3,14 \cdot 0,05^2) = 0,51 \text{ м/с.}$$

Потери напора на внезапное расширение определим разностью полных напоров в сечениях I-I и II-II по формуле 8.1, приняв $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$:

$$h_{вр} = [p_1/\gamma + V_1^2/(2g)] - [p_2/\gamma + V_2^2/(2g)] =$$

$$= [0,16 + 3,18^2/(2 \cdot 9,81)] - [0,3 + 0,51^2/(2 \cdot 9,81)] = 0,36 \text{ м.}$$



О местных сопротивлениях с юмором

На пересдаче экзамена преподаватель опять задает студенту тот же решающий вопрос: сколько местных гидравлических сопротивлений в лаборатории? Студент, уже не задумываясь: – 21. – Неверно! 20. Я свой демонстрационный вентиль не взял. – Зато я взял! – достает кран из кармана студент.

9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

Общие сведения. Различают *простые* трубопроводы, имеющие постоянный по длине расход, и *сложные* – с ответвлениями. *Короткими* называют трубопроводы, в которых местные потери напора превышают 10 % от потерь напора по длине. В противном случае трубопроводы считаются *длинными*. При их расчете местные потери не рассчитываются, а полные потери напора получают завышением потерь по длине на 5–10 %.

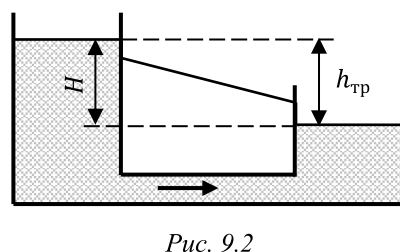
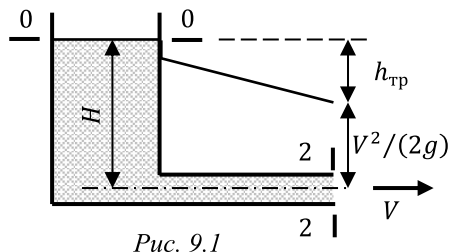
При истечении жидкости по простому короткому трубопроводу в атмосферу (рис. 9.1) уравнение Бернулли (5.4), записанное для сечения 0-0 по свободной поверхности в баке и для выходного сечения 2-2 с допущением ($\alpha = 1$) принимает вид

$$H = V^2/(2g) + h_{\text{тр}}, \quad (9.1)$$

Таким образом, при истечении в атмосферу действующий напор H равен сумме кинетической энергии $V^2/(2g)$ жидкости на выходе из трубопровода и полных потерь напора $h_{\text{тр}}$, то есть тратится на разгон жидкости от 0 до скорости V и преодоление линейных и местных гидравлических сопротивлений.

Расписывая $h_{\text{тр}}$ по формулам (7.1), (7.2), (8.4) с учетом выражения скорости $V = Q/\omega = 4Q/(\pi d^2)$, из уравнения (5.4) получаем основную расчетную формулу

$$H = [1/d_{\text{ВЫХ}}^4 + \Sigma(\lambda_i L_i/d_i^5) + \Sigma(\xi_i/d_i^4)] 8Q^2/(\pi^2 g). \quad (9.2)$$



Следует заметить, что при истечении *под уровень* (рис. 9.2) скорость жидкости на выходе (во втором баке) $V_{\text{ВЫХ}} = 0$, и весь действующий напор тратится только на преодоление гидравлических сопротивлений ($H = h_{\text{тр}}$), и в уравнение (9.2) в квадратной скобке исчезает первое слагаемое $1/d_{\text{ВЫХ}}^4$, учитывающее кинетическую энергию на выходе, но появляется слагаемое $\xi_{\text{ВЫХ}}/d_{\text{ВЫХ}}^4$, учитывающее потери напора на выход жидкости из трубы в бак.

Расчет трубопроводов по уравнению (9.2) сводится к *трем типовым задачам* по определению:

1 – напора H ; 2 – расхода Q ; 3 – диаметра d .

Задача первого типа решается прямым вычислением H после определения числа Рейнольдса Re и коэффициентов λ и ξ .

Задача второго типа решается методом последовательных приближений или путем построения графика $H = H(Q)$, так как λ и ξ могут зависеть от числа Рейнольдса Re и, следовательно, от расхода Q (рис. 9.3).

Задача третьего типа решается методом подбора или путем построения кривой $d = d(H)$, задавая ряд диаметров d и вычисляя соответствующие им напоры H (рис. 9.4).

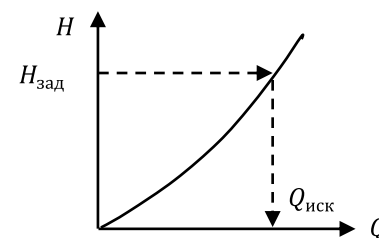


Рис. 9.3

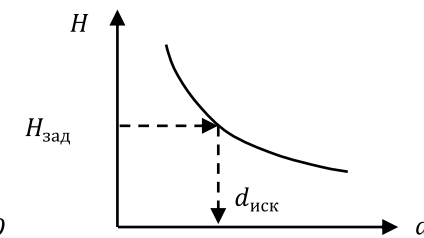


Рис. 9.4

Задачи второго и третьего типов могут решаться и прямым вычислением, как и первая, если справедливо допущение о квадратичности закона сопротивления, то есть когда λ и ξ не зависят от числа Рейнольдса Re и имеют постоянные значения.

При расчете длинных трубопроводов местными сопротивлениями и скоростным напором на выходе из трубопровода пренебрегают и уравнение 9.2 приобретает вид

$$H = h_{\text{тр}} = \lambda(l/d) V^2 / (2g), \quad (9.3)$$

т. е. полный напор равен только сумме потерь напора по длине.

Выразим из него скорость после введения гидравлического радиуса $d = 4R$, гидравлического уклона $I = h_{\text{тр}}/l$ и коэффициента Шези $C = \sqrt{8g/\lambda}$, получим для скорости формулу Шези:

$$V = \sqrt{(2gd/\lambda)(h_{\text{тр}}/l)} = \sqrt{(8g/\lambda)RI} = C\sqrt{RI}.$$

Тогда формула для расхода после введения расходной характеристики $K = \omega C\sqrt{RI}$ получит следующий вид:

$$Q = \omega V = \omega C\sqrt{RI} = K\sqrt{I} = K\sqrt{h_{\text{тр}}/l}. \quad (9.4)$$

Размерность K такая же, как и расхода. Численно она равна расходу при уклоне, равном единице. Величина $1/K^2 = A$ называется *удельным сопротивлением*. Значения удельного сопротивления $A_{\text{кв}}$ и расходных характеристик $K_{\text{кв}}$ для круглых стальных труб различных диаметров в квадратичной области сопротивления приведены в таблице 9.1. В табл. 9.2 для них указаны значения поправки на неквадратичность ψ в зависимости от скорости.

Таблица 9.1

Значения удельного сопротивления $A_{\text{кв}}$ и расходной характеристики $K_{\text{кв}}^2$ в области квадратичного сопротивления для неовых стальных водопроводных труб

Диаметр d , мм	$A_{\text{кв}}$, $\text{с}^2/\text{м}^6$	$K_{\text{кв}}^2$, $\text{м}^6/\text{с}^2$
50	3686,0	0,0002713
75	929,4	0,001076
100	172,9	0,005784
125	76,36	0,01310
150	30,65	0,03263
175	20,79	0,04810
200	6,959	0,1437
250	2,187	0,4572
300	0,8466	1,1812

Местные потери напора принимают равными 5–10% от потерь по длине, тогда из (9.4) получаем формулу для суммарных потерь напора в длинном трубопроводе

$$h_{\text{тр}} = (1,05-1,1)(Q^2/K^2)l = (1,05-1,1)AlQ^2. \quad (9.5)$$

При последовательном соединении длинных труб разного диаметра с постоянным по длине расходом $Q = Q_1 = Q_2 \dots = Q_n$ потери на отдельных участках суммируются: $H = \Sigma Q^2(l_i/K_i^2)$.

При параллельном соединении труб потери напора в каждой ветви одинаковы $h_{\text{тр}} = h_{\text{тр}1} = h_{\text{тр}2} = h_{\text{тр}3} = \dots = h_{\text{тр}n}$, а расходы суммируются $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i$. Для решения задачи составляется система из $n + 1$ уравнений.

Таблица 9.2

Значения поправки на неквадратичность ψ для неовых стальных водопроводных труб

V , м/с	ψ	V , м/с	ψ	V , м/с	ψ	V , м/с	ψ
0,20	1,41	0,45	1,175	0,70	1,085	1,0	1,030
0,25	1,33	0,50	1,150	0,75	1,07	1,1	1,015
0,30	1,28	0,55	1,130	0,80	1,06	1,2	1,0
0,35	1,24	0,60	1,115	0,85	1,05		
0,40	1,20	0,65	1,10	0,90	1,04		

Контрольные вопросы

1. Какие трубопроводы называются простыми, сложными, длинными и короткими?
2. В чем заключается особенность гидравлического расчета коротких трубопроводов?
3. Чем отличается гидравлический расчет трубопровода при истечении в атмосферу и под уровень?
4. Как формулируются три основные задачи гидравлического расчета простого трубопровода?
5. Какие основные условия используются при гидравлическом расчете трубопроводов с последовательным соединением труб?
6. Какие условия используют для гидравлического расчета параллельного соединения трубопроводов?
7. Что называется расходной характеристикой трубопровода и удельным сопротивлением?

Примеры решения задач

Задача 1. Насос с подачей $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ забирает воду из колодца, в который она поступает из водоема через трубу диаметром $d = 0,25 \text{ м}$, с абсолютной шероховатостью $\Delta = 1 \text{ мм}$ и длиной $l = 100 \text{ м}$ (рис. 9.5). На входе в трубу установлена сетка. Температура воды в водоеме $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти перепад уровней воды Δh в водоеме и колодце.

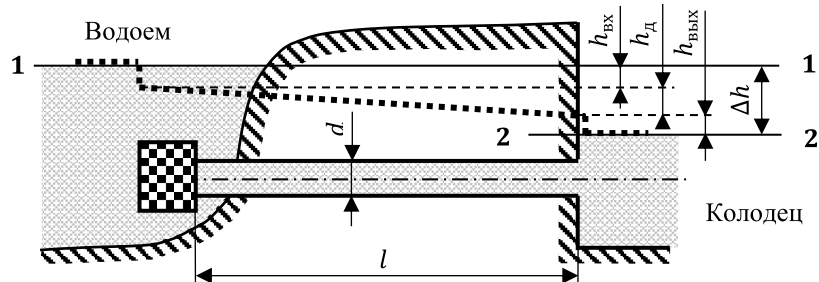


Рис.9.5. Схема руслового водозабора с самотечной трубой

Решение. Уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 относительно уровня в колодце 2-2 имеет вид:

$$\Delta h + p_1/\gamma + V_1^2/(2g) = p_2/\gamma + V_2^2/(2g) + h_{тр.}$$

С учетом $p_1 = p_2$ и $V_1 \approx V_2 \approx 0$, получим $\Delta h = h_{тр.}$, то есть перепад уровней воды Δh в водоеме и в колодце равен потерям напора $h_{тр.}$ в трубе.

Скорость течения воды в трубе

$$V = 4Q/(\pi d^2) = 4 \cdot 0,05/(3,14 \cdot 0,25^2) = 1,02 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса (при $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; см. табл. 2.1)

$$Re = Vd/\nu = 1,02 \cdot 0,25/(1,01 \cdot 10^{-6}) = 2,52 \cdot 10^5.$$

Относительная шероховатость трубы $\Delta/d = 10^{-3}/0,25 = 0,004$.

По рисунку 7.3 находим, что труба работает в квадратичной зоне сопротивления, поэтому коэффициент гидравлического трения находим по формуле Шифринсона (7.6): $\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25} = 0,0277$.

Коэффициенты местных потерь напора на вход в трубу с сеткой принимаем $\xi_{вх} = 6$ и на выход из нее $\xi_{вых} = 1$ (см. табл. 8.1). Тогда перепад уровней воды в водоеме и колодце

$$\begin{aligned} \Delta h = h_{тр.} &= (\lambda l/d + \Sigma \xi) V^2/(2g) = \\ &= (0,0277 \cdot 100/0,25 + 7) 1,02^2/(2 \cdot 9,81) = 0,96 \text{ м.} \end{aligned}$$

Задача 2. Определить давление, создаваемое насосом в замкнутом трубопроводе с последовательно соединенным силовым гидроцилиндром (рис. 9.6). Гидроцилиндр создает на штоке усилие $P = 10 \text{ кН}$ при скорости перемещения поршня $V_{п} = 0,07 \text{ м/с}$.

Диаметры поршня гидроцилиндра $D = 50 \text{ мм}$, штока $d_{ш} = 20 \text{ мм}$ и всех труб $d = 0,01 \text{ м}$; длина труб $l_1 = 2 \text{ м}$, $l_2 = 4 \text{ м}$, $l_3 = 3 \text{ м}$. Плотность рабочей жидкости $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, ее вязкость $\nu = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Местными сопротивлениями и силами трения в гидроцилиндре пренебречь.

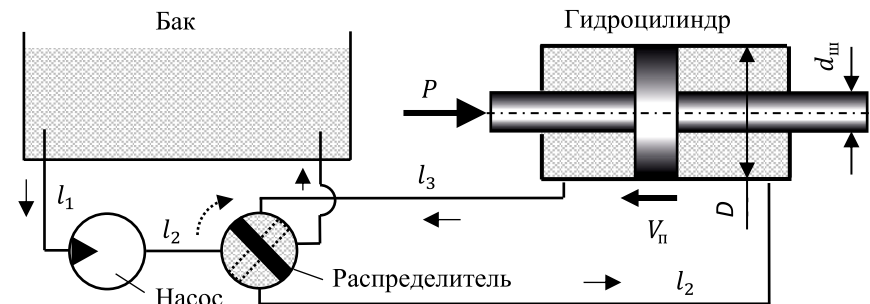


Рис.9.6. Замкнутый трубопровод гидропривода

Решение. Подача насоса (расход жидкости в трубах):

$$Q = \pi(D^2 - d_{ш}^2)V_{п}/4 = 3,14(0,05^2 - 0,02^2)0,07/4 = 115 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Число Рейнольдса $Re = Vd/\nu = 4Q/(\pi d \nu) =$

$$= 4 \cdot 115 \cdot 10^{-6}/(3,14 \cdot 0,01 \cdot 4 \cdot 10^{-4}) = 36,6 < Re_{к.}$$

Режим течения ламинарный, поэтому гидравлические потери напора по длине труб определяем по формуле Пуазейля: $h_{д} = 128 \nu l Q/(\pi g d^4)$

$$h_{д} = 128 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 115 \cdot 10^{-6}/(3,14 \cdot 9,81 \cdot 0,01^4) = 172 \text{ м.}$$

Перепад давлений в гидроцилиндре:

$$\Delta p_{ц} = (4P/\pi)/(D^2 - d_{ш}^2) = (4 \cdot 10^4/3,14)/(0,05^2 - 0,02^2) = 6,05 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Искомое давление:

$$p_{н} = \rho g h_{д} + \Delta p_{ц} = 900 \cdot 9,81 \cdot 172 + 6,05 \cdot 10^6 = 7,57 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Задача 3. Найти необходимый перепад уровней жидкости H в резервуарах для перекачки воды с расходом $Q = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ по сифону из стальных труб общей длиной $L = 20 \text{ м}$ и диаметром $d = 100 \text{ мм}$ (рис. 9.7). В расчетах принять закон квадратичного сопротивления (коэффициент Дарси $\lambda = 0,0421$), длина трубы до сечения 3-3 $l = 15 \text{ м}$ и его превышение над уровнем воды в верхнем резервуаре $z = 3 \text{ м}$.

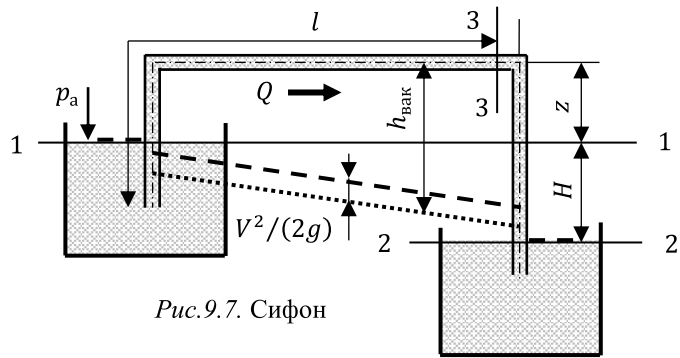


Рис.9.7. Сифон

Решение. Составим уравнение Бернулли для сечений по уровням свободной поверхности 1-1 и 2-2, приняв за плоскость сравнения сечение 2-2, с учетом $z_1 = H, z_2 = 0, p_1 = p_2 = 0$ (в избыточной системе), $V_1 \approx V_2 \approx 0$:

$$H + p_{ат}/\gamma = p_{ат}/\gamma + h_{тр}, \text{ откуда}$$

$$H = h_{тр} = \Sigma h_d + \Sigma h_m = (\lambda l/d + \xi_{вх} + 2\xi_{пов} + \xi_{вых}) V^2/(2g),$$

где коэффициент сопротивления на вход в сифон $\xi_{вх} = 0,5$, на поворот на 90° $\xi_{пов} = 0,5$, на выход $\xi_{вых} = 1$ (см. табл. 8.1), скорость течения жидкости в сифоне $V = 4Q/(\pi d^2) = 1,27$ м/с. Тогда

$$H = (0,0421 \cdot 20/0,1 + 0,5 + 2 \cdot 0,5 + 1,0) 1,27^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,90 \text{ м.}$$

2. Сифон дополнительно проверяют на возможность срыва подачи воды из-за кавитации при значительном вакууме $h_{вак} > h_{вак доп} = 6 \dots 7$ м вод. ст.

Как видно из рис. . максимальный вакуум $h_{вак}$ возникает в наиболее высоком и отдаленном от входа сечении 3-3. Определим его величину из уравнения Бернулли для сечений 1-1 и 3-3, приняв за плоскость сравнения сечение 1-1 при $z_1 = 0, p_1/\gamma = p_a/\gamma, V_1 \approx 0, z_3 = z = 3 \text{ м}, V_3 = 1,27 \text{ м/с}$:

$$h_{вак3} = p_a/\gamma - p_3/\gamma = z_3 + (\alpha_3 + \lambda l/d + \xi_{вх} + \xi_{пов}) V^2/(2g) =$$

$$= 3 + (1 + 0,0421 \cdot 15/0,1 + 0,5 + 0,5) 1,27^2 / (2 \cdot 9,81) = 3,68 \text{ м,}$$

$h_{вак3} < h_{вак доп} = 6 \dots 7$ м вод. ст., поэтому кавитация жидкости исключена и сифон после зарядки будет работать нормально.

Задача 4. Насос с подачей $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ откачивает воду с удельным весом $\gamma = 9810 \text{ Н/м}^2$ через трубу с диаметром $d = 0,25 \text{ м}$, абсолютной шероховатостью $\Delta = 1 \text{ мм}$ и длиной $l_B = 50 \text{ м}$ (рис. 9.8). Труба имеет заборную сетку с обратным клапаном на входе, регулируемую задвижку, открытую на 50% и колено. Определить максимальную высоту расположения горизонтального вала насоса над свободной поверхностью воды $H_{вс}$, если давление перед насосом $p_2 = 0,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Найти потребный напор насоса $H_{пот}$, если высота подъема воды в напорный резервуар $h = 10 \text{ м}$, диаметр напорной трубы такой же, как и всасывающей, ее длина $l_H = 1000 \text{ м}$, а сумма коэффициентов местных сопротивлений в ней $\Sigma \xi_H = 21$.

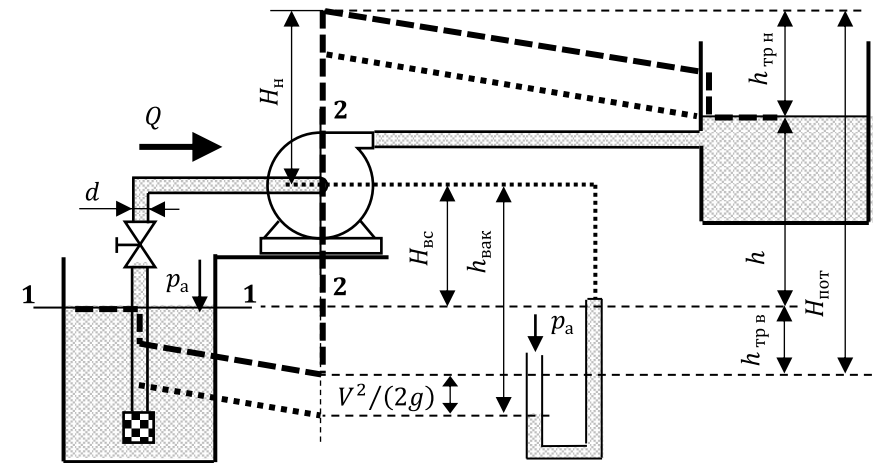


Рис. 9.8. Схема насосной установки

Решение. Уравнение Бернулли для сечений 1-1 (по уровню свободной поверхности) и 2-2 (перед насосом) с учетом $z_1 = 0, V_1 \approx 0$ имеет вид:

$$p_1/\gamma = H_{вс} + p_2/\gamma + V_2^2/(2g) + h_{тр},$$

откуда высота расположения насоса над уровнем воды в водоеме

$$H_{вс} = (p_1 - p_2)/\gamma - V_2^2/(2g) - h_{тр}. \quad (a)$$

Скорость течения воды во всасывающей и напорной трубах

$$V = 4Q/(\pi d^2) = 4 \cdot 0,05 / (3,14 \cdot 0,25^2) = 1,02 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса (при $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; см. табл. 2.1)

$$Re = Vd/\nu = 1,02 \cdot 0,25 / (1,01 \cdot 10^{-6}) = 2,52 \cdot 10^5.$$

Относительная шероховатость трубы $\Delta/d = 10^{-3}/0,25 = 0,004$.

По рисунку 7.3 находим, что трубы работают в квадратичной зоне сопротивления, поэтому коэффициент гидравлического трения находим по формуле Шифринсона (7.6): $\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25} = 0,0277$.

Коэффициенты местных потерь на вход в трубу с сеткой и обратным клапаном $\xi_{вх} = 10$, резкий поворот $\xi_{р.пов} = 1,2$ и для задвижки $\xi_3 = 3$ (см. табл. 8.1). Тогда суммарные потери на трение во всасывающей трубе

$$h_{тр в} = (\lambda l_v/d + \Sigma \xi_v) V^2/(2g) =$$

$$= (0,0277 \cdot 50/0,25 + 14,2) 1,02^2/(2 \cdot 9,81) = 1,05 \text{ м.}$$

Из формулы (а) максимальная высота расположения насоса

$$H_{вс max} = 10^5 (1 - 0,3)/9810 - 1,02^2/(2 \cdot 9,81) - 1,05 = 6,03 \text{ м.}$$

В этом случае насос необходимо установить ниже относительно уровня воды в водоеме, т. е. $H_{вс} \leq 5,5 \text{ м}$.

Потери напора на трение в напорной трубе

$$h_{тр н} = (\lambda l_n/d + \Sigma \xi_n) V^2/(2g) =$$

$$= (0,0277 \cdot 1000/0,25 + 21) 1,02^2/(2 \cdot 9,81) = 6,85 \text{ м.}$$

Потребный напор насоса

$$H_{пот} = h + h_{тр в} + h_{тр н} = 10 + 1,05 + 6,85 = 17,9 \text{ м.}$$

По расходу $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ и потребному напору $H_{пот} = 17,9 \text{ м}$ в каталоге насосов выбирается марка насоса.

Задача 5. По короткому трубопроводу из двух труб длиной $l_1 = 30 \text{ м}$, $l_2 = 30 \text{ м}$ с диаметрами $d_1 = 150 \text{ мм}$, $d_2 = 100 \text{ мм}$ и гидравлическими коэффициентами трения $\lambda_1 = 0,03$, $\lambda_2 = 0,04$ движется вода при постоянном напоре $H = 7,5 \text{ м}$ (рис. 9.). Определить расход воды Q в трубопроводе и построить напорную и пьезометрическую линии.

Решение. Плоскость сравнения 1-1 проведем через ось трубы и запишем уравнение Бернулли для нулевого сечения 0-0, проведенного по свободной поверхности в баке, и для выходного сечения 2-2:

$$z_0 + p_0/\gamma + \alpha_0 V_0^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + \alpha_2 V_2^2/(2g) + h_{тр}.$$

С учетом $z_0 = H$, $p_0 = p_2 = p_a$, $V_0 \approx 0$, $\alpha_2 \approx 1$ уравнение получит вид:

$$H = V_2^2/(2g) + h_{тр} = V_2^2/(2g) + h_{вх} + h_{д1} + h_{в.с} + h_{д2} =$$

$$= (\xi_{вх} + \lambda_1 l_1/d_1) V_1^2/(2g) + (1 + \xi_{в.с} + \lambda_2 l_2/d_2) V_2^2/(2g).$$

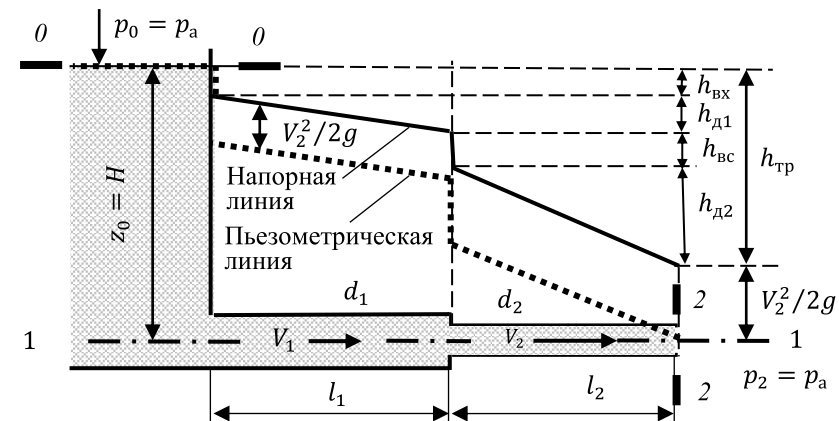


Рис. 9.9. Истечение жидкости из открытого бака по простому короткому трубопроводу в атмосферу

Весь напор H в баке расходуется на создание кинетической энергии $V_2^2/2g$ вытекающей жидкости и на компенсацию потерь напора по длине на первом $h_{д1}$ и втором $h_{д2}$ участках трубопровода и местных потерь на вход жидкости из бака в трубу $h_{вх}$ и внезапное сужение потока $h_{в.с}$ (см. рис. 9.).

Из уравнения неразрывности $V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2$ выразим скорость на первом участке через скорость на втором: $V_1 = V_2 (\omega_2/\omega_1) = V_2 (d_2/d_1)^2$. Тогда

$$H = \frac{V_2^2}{2g} \left[\left(\xi_{вх} + \frac{\lambda_1 l_1}{d_1} \right) \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 + \xi_{в.с} + \frac{\lambda_2 l_2}{d_2} + \alpha \right] = \frac{V_1^2}{2g} (\xi_{сист} + \alpha),$$

где $\xi_{вх} = 0,5$; $\xi_{в.с} = 0,5[1 - (d_2/d_1)^2] = 0,5[1 - (0,10/0,15)^2] = 0,28$,

а коэффициент сопротивления системы:

$$\xi_{сист} = \left(0,5 + \frac{0,03 \cdot 30}{0,15} \right) \left(\frac{0,10}{0,15} \right)^4 + 0,28 + \frac{0,04 \cdot 30}{0,10} = 13,6.$$

Тогда $V_2 = \sqrt{2gH/(\xi_{сист} + \alpha)} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 7,5/(13,6 + 1)} = 3,18 \text{ м/с}$;

$$V_1 = V_2 (d_2/d_1)^2 = 3,17 (0,10/0,15)^2 = 1,41 \text{ м/с}.$$

Расход воды в трубопроводе

$$Q = V_1 \omega_1 = V_1 \pi d_1^2/4 = 1,41 \cdot 3,14 \cdot 0,15^2/4 = 0,0249 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для построения напорной линии вычисляем отдельные виды потерь напора при скоростных напорах на участках:

$$\begin{aligned}
 V_1^2/(2g) &= 1,41^2/(2 \cdot 9,81) = 0,10 \text{ м}; \\
 V_2^2/(2g) &= 3,18^2/(2 \cdot 9,81) = 0,515 \text{ м}; \\
 h_{\text{вх}} &= \xi_{\text{вх}} V_1^2/(2g) = 0,5 \cdot 0,10 = 0,05 \text{ м}; \\
 h_{\text{д1}} &= \lambda_1 (l_1/d_1) V_1^2/(2g) = 0,03 (30/0,15) \cdot 0,10 = 0,60 \text{ м}; \\
 h_{\text{вс}} &= \xi_{\text{вс}} V_2^2/(2g) = 0,28 \cdot 0,515 = 0,144 \text{ м}; \\
 h_{\text{д2}} &= \lambda_2 (l_2/d_2) V_2^2/(2g) = 0,04 (30/0,10) \cdot 0,515 = 6,18 \text{ м}.
 \end{aligned}$$

$$h_{\text{тр}} + V_2^2/(2g) = 0,05 + 0,60 + 0,144 + 6,18 + 0,515 = 7,489 \approx 7,5 \text{ м} = H.$$

Пьезометрическая линия располагается ниже напорной на расстоянии $V_1^2/(2g) = 0,1$ м на первом участке и на $V_2^2/(2g) = 0,515$ м на втором. Она проходит через центр тяжести выходного сечения трубопровода (см. рис. 9.9).

Задача 6. Определить суммарные потери напора при пропуске расхода воды $Q = 15$ л/с на участке водопровода, состоящем из трех последовательно соединенных трубопроводов с разными диаметрами (рис. 9.) $d_1 = 100$ мм, $d_2 = 200$ мм, $d_3 = 150$ мм, $l_1 = 400$ м, $l_2 = 800$ м, $l_3 = 600$ м. Трубы используются новые стальные водопроводные.

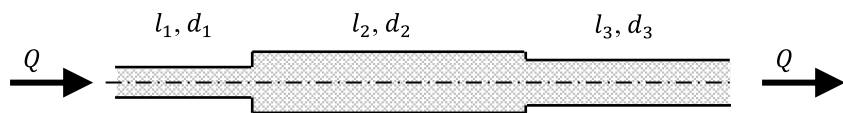


Рис. 9.10. Последовательное соединение трубопроводов

Решение. Определим скорость течения воды на участках:

$$V_1 = 4Q/(\pi d_1^2) = 4 \cdot 0,015/(3,14 \cdot 0,1^2) = 1,91 \text{ м/с};$$

$$V_2 = 4Q/(\pi d_2^2) = 4 \cdot 0,015/(3,14 \cdot 0,2^2) = 0,48 \text{ м/с};$$

$$V_3 = 4Q/(\pi d_3^2) = 4 \cdot 0,015/(3,14 \cdot 0,15^2) = 0,85 \text{ м/с}.$$

По диаметрам найдем расходную характеристику трубопровода в квадратичной области сопротивления на участках $K_{\text{кв1}}^2 = 0,005784 \text{ м}^6/\text{с}^2$, $K_{\text{кв2}}^2 = 0,1437 \text{ м}^6/\text{с}^2$ и на третьем участке $K_{\text{кв3}}^2 = 0,03263 \text{ м}^6/\text{с}^2$ (см. табл. 9.1). Поправка на неквадратичность ψ в зависимости от скорости течения воды на участках $\psi_1 = 1,00$, $\psi_2 = 1,16$, $\psi_3 = 1,05$ (см. табл. 9.2).

Суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения по формуле (9.5) с учетом поправок ψ_i :

$$h_{\text{тр}} = 1,1 \Sigma \psi_i (Q^2/K_i^2) l_i =$$

$$= 1,1 \cdot 0,015^2 \left(\frac{1,00 \cdot 400}{0,005931} + \frac{1,16 \cdot 800}{0,2375} + \frac{1,05 \cdot 600}{0,05222} \right) = 20,64 \text{ м}.$$

Задача 7. В трубопроводе с тремя параллельными линиями (рис. 9.) общая подача воды составляет $Q = 100$ л/с. Определить расходы в параллельных ветвях и напор, требуемый для пропуска расхода, если $d_1 = 250$ мм, $d_2 = 200$ мм, $d_3 = 150$ мм, $l_1 = 800$ м, $l_2 = 600$ м, $l_3 = 700$ м, эквивалентная шероховатость труб $\Delta_{\text{экр}} = 0,1$ мм. Трубы используются новые стальные водопроводные.

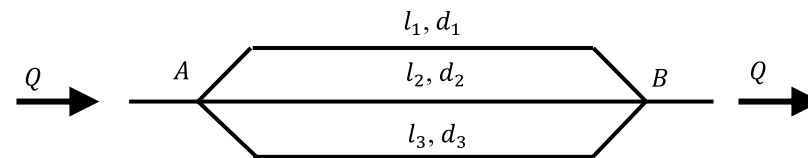


Рис. 9.11. Параллельное соединение трубопроводов

Решение. В первом приближении принимаем, что движение воды происходит в квадратичной области сопротивлений. Значения удельного сопротивления $A_{\text{кв}}$ по участкам составляют $A_{\text{кв1}} = 2,187 \text{ с}^2/\text{м}^2$, $A_{\text{кв2}} = 6,959 \text{ с}^2/\text{м}^2$, $A_{\text{кв3}} = 30,65 \text{ с}^2/\text{м}^2$ (см. табл. 9.1) Тогда можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases}
 Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{A_{\text{кв1}} l_1}{A_{\text{кв2}} l_2}} = Q_1 \sqrt{\frac{2,19 \cdot 800}{6,96 \cdot 600}} = 0,648 Q_1; \\
 Q_3 = Q_1 \sqrt{\frac{A_{\text{кв1}} l_1}{A_{\text{кв3}} l_3}} = Q_1 \sqrt{\frac{2,19 \cdot 800}{30,6 \cdot 700}} = 0,286 Q_1; \\
 Q_1 + Q_2 + Q_3 = 100.
 \end{cases}$$

Решаем систему уравнений:

$$Q_1 + 0,648 Q_1 + 0,286 Q_1 = 100, 1,934 Q_1 = 100, \text{ откуда}$$

$$Q_1 = 100/1,934 = 51,7 \text{ л/с};$$

$$Q_2 = 0,648 \cdot 51,7 = 33,5 \text{ л/с};$$

$$Q_3 = 0,286 \cdot 51,7 = 14,8 \text{ л/с};$$

$$\text{Проверка: } Q_1 + Q_2 + Q_3 = 51,7 + 33,5 + 14,8 = 100 \text{ л/с} = Q.$$

Во втором приближении определяем скорости движения воды на участках и поправки на неквадратичность ψ_i (табл. 9.2):

$$V_1 = 4Q_1/(\pi d_1^2) = 4 \cdot 0,0517/(3,14 \cdot 0,25^2) = 1,05 \text{ м/с}; \psi_1 = 1,02;$$

$$V_2 = 4Q_2/(\pi d_2^2) = 4 \cdot 0,0335/(3,14 \cdot 0,2^2) = 1,07 \text{ м/с}; \psi_2 = 1,02;$$

$$V_3 = 4Q_3/(\pi d_3^2) = 4 \cdot 0,0148/(3,14 \cdot 0,15^2) = 0,85 \text{ м/с}; \psi_3 = 1,05.$$

Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\psi_1 A_{\text{KB1}} l_1}{\psi_2 A_{\text{KB2}} l_2}} = Q_1 \sqrt{\frac{1,02 \cdot 2,19 \cdot 800}{1,02 \cdot 6,96 \cdot 600}} = 0,648 Q_1; \\ Q_3 = Q_1 \sqrt{\frac{\psi_1 A_{\text{KB1}} l_1}{\psi_3 A_{\text{KB3}} l_3}} = Q_1 \sqrt{\frac{1,02 \cdot 2,19 \cdot 800}{1,05 \cdot 30,6 \cdot 700}} = 0,282 Q_1; \\ Q_1 + Q_2 + Q_3 = 100. \end{cases}$$

Решаем систему уравнений:

$$Q_1 + 0,648 Q_1 + 0,282 Q_3 = 100, 1,93 Q_1 = 100, \text{ откуда}$$

$$Q_1 = 100/1,93 = 51,8 \text{ л/с};$$

$$Q_2 = 0,648 \cdot 51,8 = 33,6 \text{ л/с};$$

$$Q_3 = 0,282 \cdot 51,8 = 14,6 \text{ л/с};$$

Проверка: $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 51,8 + 33,6 + 14,6 = 100 \text{ л/с} = Q.$

Расходы в параллельных ветвях во втором приближении не изменились по сравнению с первым приближением, поэтому значения скоростей движения воды V_i и поправок на неквадратичность ψ_i останутся прежними.

Вычисляем потери напора по длине в каждой ветви:

$$h_{l1} = \psi_1 A_{\text{KB1}} l_1 Q_1^2 = 1,02 \cdot 2,19 \cdot 800 \cdot 0,0518^2 = 4,79 \text{ м};$$

$$h_{l2} = \psi_2 A_{\text{KB2}} l_2 Q_2^2 = 1,02 \cdot 6,96 \cdot 600 \cdot 0,0336^2 = 4,81 \text{ м};$$

$$h_{l3} = \psi_3 A_{\text{KB3}} l_3 Q_3^2 = 1,05 \cdot 30,6 \cdot 700 \cdot 0,0146^2 = 4,79 \text{ м}.$$

Потери напора на всех участках, как и следовало ожидать, практически одинаковы: $h_{l1} \approx h_{l2} \approx h_{l3}$. Принимаем $h_l = h_{l2} = 4,81 \text{ м}$. Тогда требуемый напор для пропуска воды $H = h_{\text{тр}} = 1,1 \cdot 4,81 = 5,29 \text{ м}$.



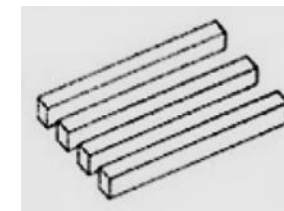
О трубах с юмором

1. Если у вас в квартире протекает труба, не спешите вызывать сантехника. – Может быть, его вызовет сосед снизу.
2. У нас есть трубы диаметром 5-7 и толщиной стенки 1,5? – Как мне надоели твои гидравлические шуточки. – Тогда просто подай пачку макарон.

3. Мастер рассказывает своему бывшему преподавателю по вышке о пользе полученных от него знаний. – Как-то повстречались мне три грабителя. Ну я трубу железную погнул в виде интеграла, они и разбежались.

4. В консерватории сантехник уронил на ногу тяжелую трубу и взял самое чистое "ля" за всю историю заведения.

5. Сколько здесь труб квадратного сечения на самом деле?



10. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Общие сведения. Малым называют отверстие, вертикальный размер которого (d) существенно (более чем в 10 раз) меньше напора истечения H . В этом случае скорость вытекающей

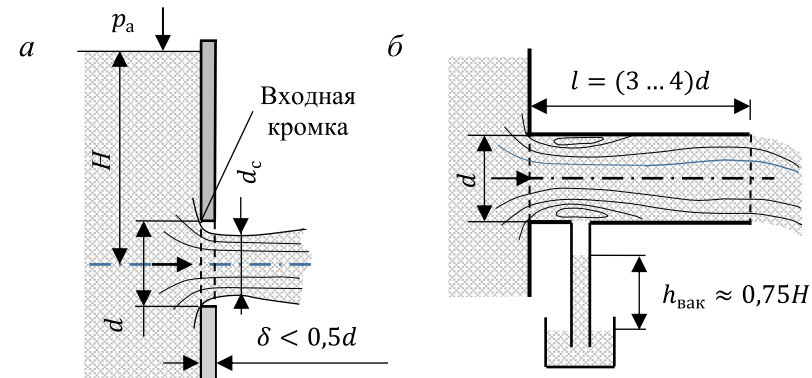


Рис. 10.1. Схема истечения через отверстие в тонкой стенке (а) и через насадок или отверстие в толстой стенке при $\delta > 3d$ (б)

струи по высоте отверстия можно считать одинаковой. Если струя касается только входной кромки отверстия, то стенку, в которой выполнено отверстие, в гидравлическом смысле называют *тонкой*. Такое истечение наблюдается при острой кромке либо при толщине стенки менее половины диаметра отверстия $\delta < 0,5d$ (рис. 10.1, а).

Струя на выходе из отверстия в тонкой стенке сжимается, достигая на некотором расстоянии (около 0,5 диаметра отверстия) наименьшего сечения, называемого *сжатым*. Явление сжатия объясняется свойством частиц жидкости, подходящих к отверстию с разных сторон, сохранять свое направление движения после прохождения отверстия. Степень сжатия струи оценивается *коэффициентом сжатия*

$$\varepsilon = \omega_c / \omega = (d_c / d)^2, \quad (10.1)$$

где ω_c, ω – площади сжатого сечения струи и отверстия.

Насадками называют короткие трубки, присоединяемые к отверстию для увеличения расхода или придания струе особых свойств, например, дальнобойности.

При входе в *цилиндрический* насадок (рис. 10.1, б) струя сужается, образуя циркуляционную зону с пониженным давлением вокруг сжатого сечения. В результате происходит дополнительное подсосывание жидкости из резервуара. Поэтому при одинаковом напоре расход жидкости в насадке больше, чем через отверстие. Коэффициент сжатия для насадка $\varepsilon = 1$, так как струя заполняет все сечение насадка и на выходе не имеет сжатия.

Оптимальная длина насадка $l = (3 \dots 4)d$. При малой длине $l < 2d$ струя не заполняет насадок и истечение происходит, как через отверстие. При его большой длине также снижается расход, но уже из-за увеличения потерь напора в насадке.

При истечении в атмосферу в насадке возникает вакуум $h_{\text{вак}} = 0,75 H$ (см. рис. 10.1, б), который может снизить давление в насадке до 0,24 м вод. ст. (давление парообразования для воды при $t = 20^\circ\text{C}$) при предельном напоре истечения

$$H_{\text{пр}} = (10,33 - 0,24) / 0,75 = 13,5 \text{ м.} \quad (10.2)$$

При напоре $H > 13,5$ м произойдет срыв вакуума – отрыв струи воды от стенок и насадок будет работать как отверстие.

В инженерной практике скорость жидкости V на выходе из отверстия и насадка определяют по формуле

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (10.3)$$

где φ – коэффициент скорости, учитывающий снижение скорости за счет гидравлического сопротивления отверстия или насадка; H – напор истечения.

Расход Q через отверстия и насадки рассчитывают по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (10.4)$$

где $\mu = \varepsilon \varphi$ – коэффициент расхода; учитывает снижение расхода, вызываемое сжатием струи и гидравлическими сопротивлениями; ω – площадь отверстия или выходного сечения насадка.

Согласно исследованиям А.Д. Альтшуля коэффициенты истечения $\mu, \varphi, \varepsilon$ зависят от числа Рейнольдса (рис. 10.2), но при развитии турбулентном режиме истечения (при $Re_H > 10^5$) численные значения коэффициентов становятся постоянными (справочными) и пригодными для практических расчетов (табл. 10.1).

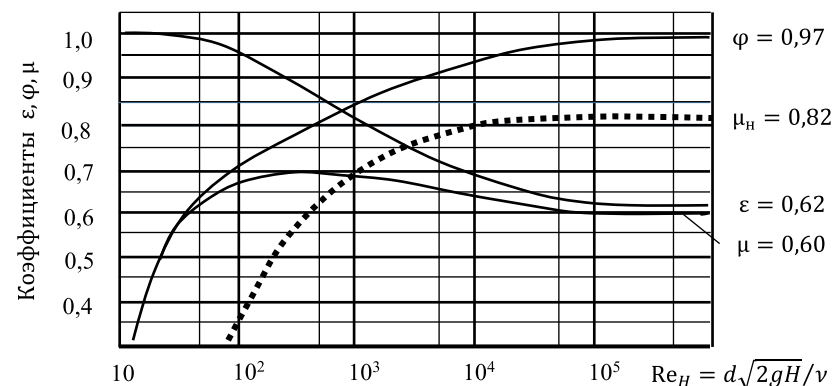


Рис. 10.2. Зависимость коэффициентов ε, φ и μ для отверстия в тонкой стенке и коэффициента μ_n для внешнего цилиндрического насадка от Re_H

Эти коэффициенты получены для *совершенного сжатия струи*, когда отверстие расположено дальше $3d$ от дна и боковых стенок резервуара. Сравнение коэффициентов показывает, что

присоединение к отверстию внешнего цилиндрического насадка обеспечивает при развитом турбулентном режиме истечения повышение расхода ($\mu_n > \mu$) примерно на 30 %.

В технике применяют различные насадки:

цилиндрические наружные и внутренние для пропуска ливневой и талой воды, водосброса, измерения расхода;

конические сходящиеся и коноидальные для создания больших скоростей, дальности полета и силы удара струи (в пожарных брандспойтах, гидромониторах, струйных аппаратах);

конические расходящиеся при необходимости пропустить значительный расход при малых скоростях на выходе или в устройствах, когда нужно достичь значительного вакуума (отсасывающие трубы гидротурбин, водоструйные насосы, эрлифты).

Таблица 10.1

Справочные и рассчитанные через Φ коэффициенты истечения

№ п/п	Название насадка	Схема насадка	Коэффициенты		
			ϵ	ϕ	μ
1	Конoidalный насадок (с входом по форме сжатой струи)		1,0 (1,0)	0,97	0,97 (0,970)
2	Нормальный внешний цилиндрический насадок ($l > 3d$)		1,0 (0,85)	0,82	0,82 (0,826)
3	Нормальный внутренний цилиндрический насадок ($l > 3d$)		1,0 (0,73)	0,71	0,71 (0,704)
4	Круглое отверстие в тонкой стенке		0,62 (0,62)	0,97	0,60 (0,599)
5	Короткий внутренний цилиндрический насадок ($l < 3d$)		0,53 (0,53)	0,97	0,51 (0,511)
6	Конический сходящийся*, $\theta = 13^\circ$		0,98	0,96	0,94
7	Конически расходящийся, $\theta = 5-7^\circ$		1,0	0,45	0,45

Примечание: значения ϵ и μ , указанные в скобках, определены через Φ .

При истечении жидкости под уровень (рис. 10.3) напор истечения H определяется разностью полных напоров до и после насадка (отверстия):

$$H = H_1 - H_2 = (p_1/\gamma + h_1) - (p_2/\gamma + h_2), \quad (10.5)$$

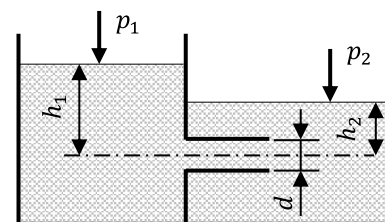


Рис. 10.3

где p_1 и p_2 – поверхностные абсолютные давления до и после насадка (отверстия). Если напор истечения окажется $H < 0$, значит истечение происходит справа налево и насадок работает как внутренний, поэтому $\mu_n = 0,71$.

Значения коэффициентов истечения ϵ , ϕ и μ принимаются

такими же, как и при истечении в атмосферу.

Проявление золотого сечения в геометрии струй. В инженерных расчетах истечения жидкостей используется много эмпирических коэффициентов, которые на первый

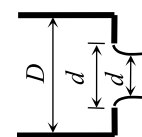


Рис. 10.4

взгляд не имеют очевидной связи между собой. Но можно заметить, что они довольно часто приобретают значения золотых чисел (0,38; 0,62; 0,79). А эмпирическая формула для коэффициента *несовершенного сжатия струи* (когда боковые стенки резервуара расположены ближе $3d$ от отверстия – рис. 10.4) имеет вид, соответствующий золотому делению отрезка:

Эта формула имеет вид, соответствующий золотому делению отрезка:

$$\epsilon = 0,62 + 0,38(d/D)^4 \rightarrow 0,62 \text{ при } d/D \rightarrow 0 \quad (10.6)$$

Это побудило изучить вопрос о наличии золотого сечения в геометрии свободных потоков жидкости.

Золотое сечение (ЗС) – это сечение, которое делит отрезок на две неравные части (рис. 10.5), когда отношение меньшей части (b) к большей (a) равно отношению большей части (a) к длине всего отрезка ($a + b$). Значение этого отношения

$$\Phi = b/a = a/(a + b) = 0,6180339875 \dots \approx 0,62 \quad (10.7)$$

называют золотой константой. При таком рассечении отрезка доли частей составляют $0,62 \approx \Phi$ и $0,38 \approx \Phi^2$.

Именно эти «золотые» числа чаще всего проявляются в различных отраслях науки (математике, ботанике, биологии, астрономии), а также намеренно используются в архитектуре и живописи в виде отношений однородных параметров (рис. 10.6 – 10.8).

Свойства и параметры систем часто имеют дискретный (прерывистый) характер и могут быть выражены через золотую константу в виде рядов геометрических прогрессий. Так, установлено, что при истечении жидкости через водосливы, отверстия и насадки предельные коэффициенты сжатия струи по линейному размеру $\epsilon_d = d_c/d$ (или $\epsilon_h = h_c/h$) являются членами одной геометрической прогрессии со знаменателем $\Phi^{1/6}$ (рис. 10.9):

$$\epsilon_d = d_c/d = \Phi^{k/6} \text{ (где } k = 0, 1, 2, 3, \dots \text{)} \quad (10.8)$$

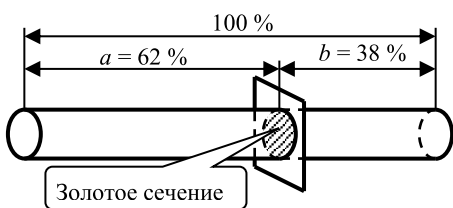


Рис. 10.5. Золотое сечение отрезка

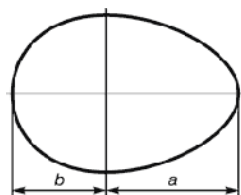


Рис. 10.6. Золотые пропорции яйца

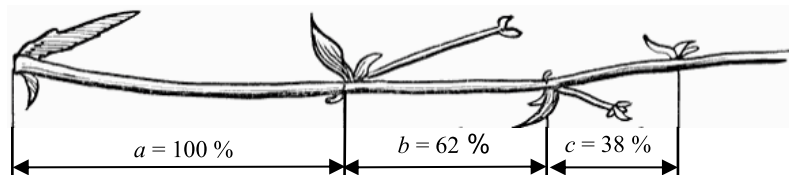


Рис. 10.7. Длина каждого участка ветки цикория относится к предыдущему как $38:62 = \Phi$

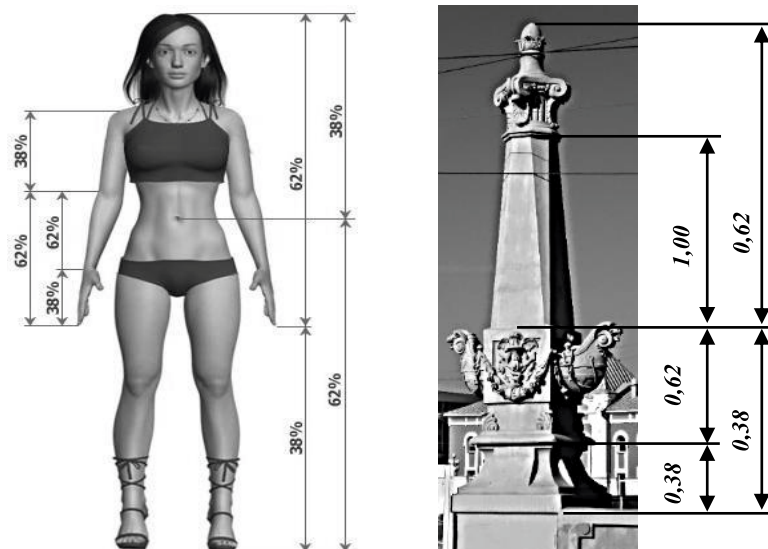


Рис. 10.8. Пропорции тела человека и ростральной колонны Каменного моста (г. Томск; памятник Федерального значения, построен в 1916 г. по проекту архитектора К.К. Лыгина)

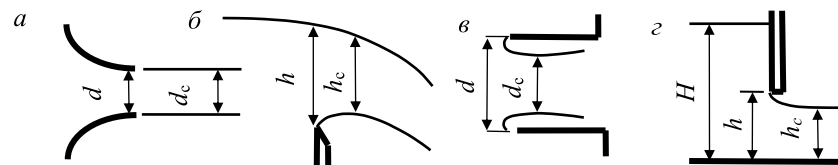


Рис. 10.9. Отношения размеров сжатой струи при истечении: а – из коноидального насадка ($d_c/d = 1 = \Phi^{0/6}$); б – через водослив ($h_c/h = 0,785 \approx 0,786 = \Phi^{3/6}$); в – через внутренний цилиндрический короткий насадок ($d_c/d = 0,728 \approx 0,726 = \Phi^{4/6}$); г – из подщита ($h_c/h = 0,615 \approx 0,618 = \Phi^{6/6}$)

Тогда, предельные коэффициенты сжатия струи по площади ε после отверстия и при входе в насадки круглого сечения должны совпадать с рядом инвариантов золотых чисел:

$$\varepsilon = \omega_c / \omega = (d_c / d)^2 = \varepsilon_a^2 = (\Phi^{k/6})^2 = \Phi^{k/3} \approx \quad (10.9) \\ \approx 1,00 - 0,85 - 0,73 - 0,62 - 0,53,$$

что подтверждается опытными данными в табл. 10.1, где 5 первых устройств представлены в порядке уменьшения пропускной способности. Отношение коэффициентов расхода μ соседних устройств оказалось постоянной величиной $\Phi^{k/3} = 0,85$.

Примем коэффициент скорости, приведенный к сжатому сечению, равным $\varphi = 0,97$. Это значение соответствует первому и последним устройствам ряда: конoidalному насадку, отверстию в тонкой стенке и короткому внутреннему цилиндрическому насадку. Тогда с учетом выражения (10.9) получим простую обобщающую формулу для определения ряда значений коэффициентов расхода насадков различных типов с круглым сечением:

$$\mu = \varphi \varepsilon = 0,97 \Phi^{k/3} = 0,97 \Phi^{(n-1)/3}, \quad (9.10)$$

где n – порядковый номер насадка в табл. 10.1. Расхождение значений μ , определенных по этой формуле (указаны в таблице в скобках), со справочными значениями составляет менее 1%.

Таким образом, установлено, что параметры истечения жидкостей подчиняются золотой пропорции, которая позволяет свести эмпирические коэффициенты истечения к единой системе.

Лабораторная работа № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ

Цель работы. Приобретение навыков по определению коэффициентов расхода при истечении жидкостей через отверстия.

Описание устройства

Объектом исследования является отверстие b в устройстве № 3 (рис. 10.10). Отверстие имеет квадратное сечение со стороной квадрата $b = 4$ мм и выполнено в перегородке толщиной 12

мм. Оно представляет собой канал длиной $l = 3b$, поэтому работает в режиме внешнего насадка (рис. 10,1, б).

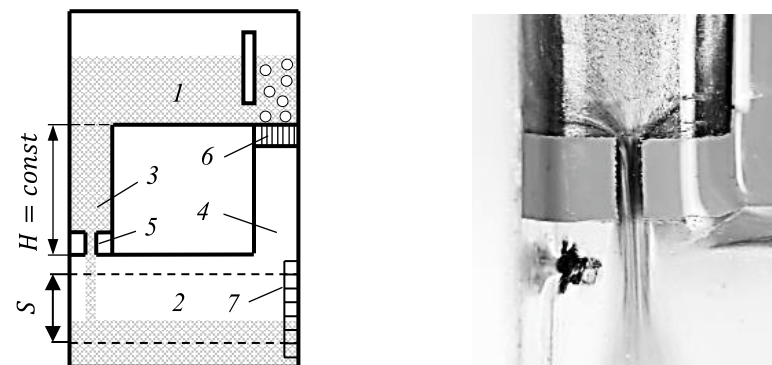


Рис. 10.10. Схема устройства № 3: 1, 2 – баки; 3, 4 – опытные каналы; 5 – опытное отверстие; 6 – решетка; 7 – уронемерная шкала

В положении устройства, указанном на рис. 10.10 вода из верхнего бака 1 поступает самотеком через канал 3 и отверстие 5 в нижний бак 2 и вытесняет из него воздух через решетку 6 в виде пузырей в жидкость в верхнем баке 1 на уровне его дна. Поэтому давление на дне верхнего бака и над жидкостью в нижнем баке (на выходе из отверстия 5) уравниваются и течение происходит только под действием постоянного напора $H = \text{const}$, создаваемого столбом жидкости в канале 3.

Так обеспечивается установившееся (с постоянным во времени расходом) движение жидкости через отверстие 5, несмотря на снижение уровня в верхнем баке. Потерями напора в подводящем канале 3 ввиду их малости можно пренебречь и считать, что весь напор H расходуется на создание течения через отверстие 5.

Порядок выполнения работы

1. Для создания течения в отверстии 5 при заполненном водой баке 1 поставить устройство № 3 баком 2 на стол.

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. Результаты замеров внести в табл. 10.2.

Таблица 10.2

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формула	Значения
1	Изменение уровня воды в баке, см ³	S	
2	Время наблюдения за уровнем, с	t	
3	Объем воды, поступившей в бак за время t , см ³	$W = ABS$	
4	Расход воды, см ³ /с	$Q = W/t$	
5	Площадь сечения отверстия, см ²	$\omega = b^2$	
6	Гидравлический диаметр отверстия, см	$d = 4 \omega / (4b)$	
7	Температура воды, °С	T	
8	Кинематический коэффициент вязкости воды, см ² /с	$\nu = \frac{17,9}{1000 + 34T + 0,22T^2}$	
9	Число Рейнольдса в отверстии	$Re_n = d\sqrt{2gH}/\nu$	
10	Коэффициент расхода (опытный)	$\mu_n = Q / (\omega\sqrt{2gH})$	
11	Коэффициент расхода (справочный)	μ_n^*	

Примечания:

- размеры поперечного сечения бака A, B указаны на корпусе устройства № 3;
- отверстие имеет квадратное сечение со стороной квадрата $b = 4$ мм.

3. По порядку, указанному в таблице, вычислить число Рейнольдса Re_n в отверстии по идеальной скорости $V = \sqrt{2gH}$. Принять $H = 10$ см.

4. Определить опытный коэффициент расхода отверстия μ_n .

5. Из справочного графика (рис. 10.2) найти значение коэффициента расхода отверстия μ_n^* (с учетом его работы в режиме внешнего насадка) по рассчитанному числу Рейнольдса Re_n .

6. Сравнить опытное и справочное значения коэффициентов расхода, объяснить их расхождение.

Контрольные вопросы

1. Что называют тонкой стенкой, малым отверстием и насадком?
2. Как степень сжатия струи влияет на расход?
3. Как связаны коэффициенты истечения между собой?
4. Поясните зависимость коэффициентов истечения от числа Re .
5. Запишите формулы скорости и расхода для отверстий и насадков.
6. Почему при установке насадка происходит увеличение расхода?
7. Когда внешний цилиндрический насадок работает как отверстие?
8. Назовите типы насадков и области их применения.
9. Какое общее число определяет положение пупка у человека и степень сжатия струи жидкости при истечении из отверстия?

Головоломка. В какие баки начнет попадать вода при ее подаче в верхнюю емкость и в какой последовательности, где будет максимальный расход?

Ответ в конце раздела.

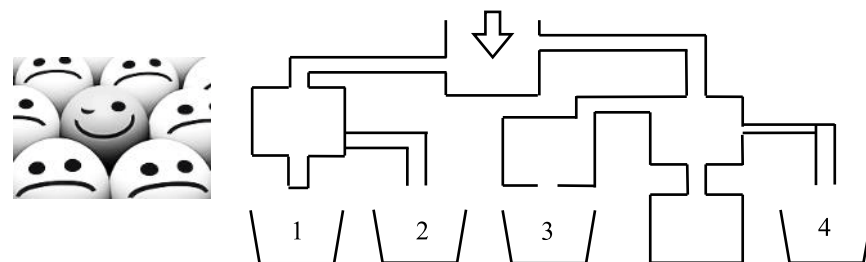


Рис. 9.13.

Примеры решения задач

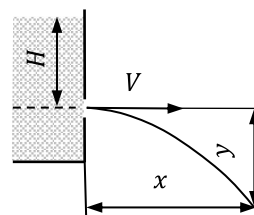


Рис. 9.14

Задача 1. Из малого отверстия диаметром 20 мм, расположенного в боковой тонкой стенке открытого резервуара на высоте $y = 3$ м от поверхности земли, при постоянном напоре $H = h = 2$ м вытекает вода при 20 °С ($\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Определить скорость, расход истечения воды и расстояние x , на котором струя коснется поверхности земли (рис. 9.14).

Решение. Число Рейнольдса, вычисленное по теоретической скорости:

$$Re_H = d\sqrt{2gH}/\nu = 0,02\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2}/(1 \cdot 10^{-6}) = 125000.$$

Из рис. 9.2 значение коэффициентов истечения: $\varphi = 0,97$, $\mu = 0,6$.

Скорость истечения воды из отверстия по формуле (9.3):

$$V = \varphi\sqrt{2gH} = 0,97\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 6,08 \text{ м/с.}$$

Расход вытекающей воды по формуле (9.4):

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH} = 0,60 \cdot (3,14 \cdot 0,02^2/4)\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 0,0012 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Формулу для дальности вылета струи x можно получить, допустив, что каждая частица струи движется как свободная материальная точка, на которую действует только сила тяжести (см. рис. 9.14), и исключив время:

$$y = gt^2/2; \quad x = Vt = V\sqrt{2y/g} = 6,08\sqrt{2 \cdot 3/9,81} = 4,75 \text{ м.}$$

Задача 2. Подобрать размеры внешнего цилиндрического насадка для пропуска воды из резервуара, если напор над центром насадка $H = 3$ м, а необходимый расход $Q = 2$ л/с, температура воды равна 20°C .

Решение. Задаются коэффициентом расхода насадка для безотрывного режима истечения и развитого турбулентного режима ($Re_H > 10^5$) $\mu = 0,82$. Площадь поперечного сечения насадка из формулы (10.4):

$$\omega = Q/(\mu\sqrt{2gH}) = 2 \cdot 10^{-3}/(0,82\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3}) = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Диаметр насадка:

$$d = \sqrt{4\omega/\pi} = \sqrt{4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}/3,14} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 20 \text{ мм.}$$

Число Рейнольдса с учетом $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$:

$$Re_H = d\sqrt{2gH}/\nu = 0,02\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3}/(1 \cdot 10^{-6}) = 1,53 \cdot 10^5.$$

Следовательно, коэффициент расхода выбран правильно. Для безотрывного режима истечения принимаем длину насадка $l = 4d = 80$ мм.

Задача 3. Определить расход воды через цилиндрический насадок (рис. 10.1) длиной $l = 400$ мм и диаметром $d = 100$ мм на глубине $h = 4$ м при избыточном давлении на свободной поверхности в резервуаре $p_{изб} = 1,2 \text{ ат} = 0,118 \text{ МПа}$.

Решение. При истечении в атмосферу нормальный режим работы цилиндрического насадка с $\mu = 0,82$ может переходить в режим работы отверстия с $\mu = 0,60$. Это происходит при срыве вакуума и прорыве воздуха в насадок, если его длина $l < 3d$ или напор истечения $H > H_{пр} = 13,5$ м.

В этом примере первое условие нарушения режима не выполняется ($l/d = 400/100 = 4$), но выполняется второе: напор истечения

$$H = h + p_{изб}/\gamma = 4 + 118000/9810 = 4 + 12 = 16 \text{ м} > H_{пр} = 13,5 \text{ м.}$$

Поэтому насадок будет работать не как насадок полным сечением, а как малое отверстие в тонкой стенке с коэффициентом расхода $\mu = 0,60$:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH} = 0,60(3,14 \cdot 0,1^2/4)\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 16} = 0,083 \text{ м}^3/\text{с} = 83 \text{ л/с.}$$

Задача 4. Определить продолжительность опорожнения цилиндрического бака, полностью заполненного водой, в атмосферу через отверстие в дне диаметром $d = 0,1$ м, если диаметр бака $D = 2$ м, его высота $H = 2,5$ м, а коэффициент расхода $\mu = 0,60$.

Решение. Площадь поперечного сечения цилиндрического бака

$$\Omega = \pi D^2/4 = 3,14 \cdot 2^2/4 = 3,14 \text{ м}^2.$$

Площадь отверстия

$$\omega = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 0,1^2/4 = 0,00785 \text{ м}^2.$$

Из рекомендуемой литературы известно, что полное опорожнение резервуара постоянного поперечного сечения при переменном напоре происходит за время, в 2 раза большее, чем истечение того же объема при постоянном начальном напоре. Поэтому продолжительность опорожнения бака:

$$t = 2\Omega H/(\mu\omega\sqrt{2gH}) = 2 \cdot 3,14 \cdot 2,5/(0,6 \cdot 0,00785\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,5}) = 475 \text{ с.}$$

Ответ на головоломку. Конечно же вы подумали о максимальном расходе через цилиндрический насадок. Но вода попадет только в один бак № 3. Ведь если приглядеться, то станет очевидно, что пути к другим бакам перекрыты.

11. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Задание 1 для контрольной работы по гидростатике

Задача № 1. Определить скорость V равномерного скольжения прямоугольной пластины по наклонной плоскости под углом $\alpha = 15^\circ$, если между пластиной и плоскостью находится слой масла толщиной δ (рис. 8.1) при температуре 20°C . Плотность материала пластины $\rho_{\text{пл}}$ и ее размеры ($a \times b \times c$) выбираются в соответствии со своим вариантом из табл. 8.1, а недостающие параметры масла из табл. 11.1.

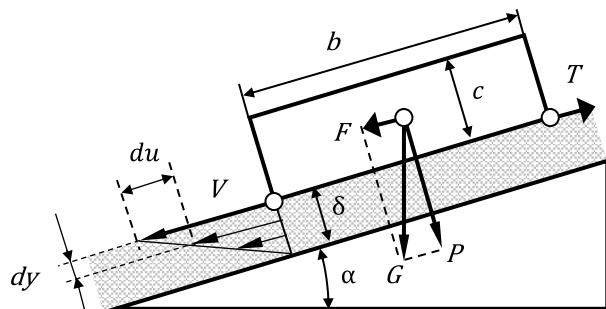


Рис. 11.1. Схема равномерного скольжения пластины

Таблица 11.1

Вариант	Масло	a , мм	b , мм	c , мм	δ , мм	$\rho_{\text{пл}}$, кг/м ³
0	АМГ-10	580	450	12	0,4	800
1	М-10	400	250	43	0,7	240
2	И-20	590	300	10	1,1	680
3	Тр	530	260	13	0,5	450
4	АМГ-10	470	290	20	0,4	260
5	М-10	630	440	11	0,9	640
6	И-20	310	140	15	1,2	1100
7	Тр	850	740	7	0,6	2500
8	АМГ-10	720	570	6	0,5	2100
9	М-10	450	280	35	0,9	270

Примечание. Масла: АМГ-10 – авиационное масло гидравлическое 10, М – моторное 10, И – промышленное 20, Тр – трансформаторное.

Указания. Для решения задачи используют формулу Ньютона (2.5) для силы вязкого трения $T = \mu\omega(du/dy)$, в которой делаются следующие замены.

1. При равномерном движении пластины сила вязкого трения T равна силе F (см. рис. 11.1), обусловленной силой тяжести пластины $G = mg$ и направленной параллельно плоскости пластины: $T = F = G \sin \alpha = mg \sin \alpha$.

2. Динамическая вязкость жидкости $\mu = \rho\nu$ выражается через плотность ρ и кинематическую вязкость ν масла, определяемые из табл. 1.2.

3. Площадь соприкосновения пластины с жидкостью ω определяется через размеры пластины.

4. Так как толщина слоя масла δ мала, можно считать, что скорости частиц жидкости u в нем изменяются по прямолинейному закону. Тогда, градиент скорости du/dy можно выразить как $du/dy = V/\delta$.

После указанных замен в формуле для силы вязкого трения следует выразить из нее скорость движения пластины и вычислить ее значение.

Задача № 2. Определить абсолютное $p_{A \text{ абс}}$ и избыточное $p_{A \text{ изб}}$ (или вакуумметрическое $p_{A \text{ вак}}$) давление в точке A (рис. 11.2) и одну из пропущенных величин в табл. 11.2, если остальные величины заданы. Налитые в резервуары жидкости с плотностями ρ_1 и ρ_2 не смешиваются и находятся в состоянии покоя. Значение атмосферного давления принять $p_a = 1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па}$.

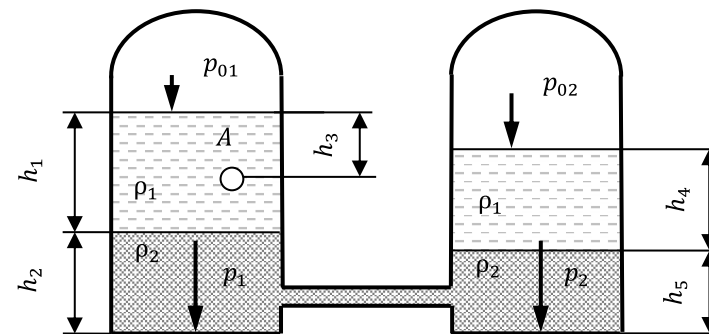


Рис. 11.2

Указания. Предварительно поверхностные давления p_{01} и p_{02} приводятся к абсолютным значениям (если они заданы в виде избыточных или вакуумметрических). С использованием основного уравнения гидростатики через эти давления, толщину слоев жидкости h и соответствующие им плотности ρ записываются выражения для давлений на дно резервуаров p_1 и p_2 . Дно резервуаров находится в одной горизонтальной плоскости равного давления, поэтому $p_1 = p_2$. Из полученного равенства выражений определяется искомая

величина. После этого определяется давление в точке А также по основному уравнению гидростатики.

Таблица 11.2

Вариант	p_{01} , МПа	p_{02} , МПа	h_1 , м	h_2 , м	h_3 , м	h_4 , м	h_5 , м	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³
0	p_a	$p_{abc} = 0,13$	3	?	2	4	1	800	1000
1	$p_{изб} = 0,02$	p_a	?	4	7	2	8	1000	1200
2	$p_{abc} = 0,15$	p_a	4	?	2	6	5	900	1000
3	$p_{abc} = 0,05$	p_a	8	3	3	?	2	750	1000
4	?	p_a	4	3	1	2	3	700	1000
5	$p_{abc} = 0,03$?	6	2	3	4	2	900	1000
6	?	p_a	4	1	2	2	3	800	1100
7	$p_{изб} = 0,02$?	2	3	1	1	4	950	1200
8	$p_{изб} = 0,02$	$p_{вак} = 0,01$	4	3	6	?	4	750	900
9	$p_{abc} = 0,12$	$p_{изб} = 0,03$?	3	1	2	2	1000	1200

Задача № 3. Определить по данным табл. 11.3 равнодействующую силу избыточного давления воды на плоский затвор (рис. 11.3), перекрывающий отверстие трубы. Определить координату z_D точки приложения силы давления воды F на указанную в таблице сторону затвора.

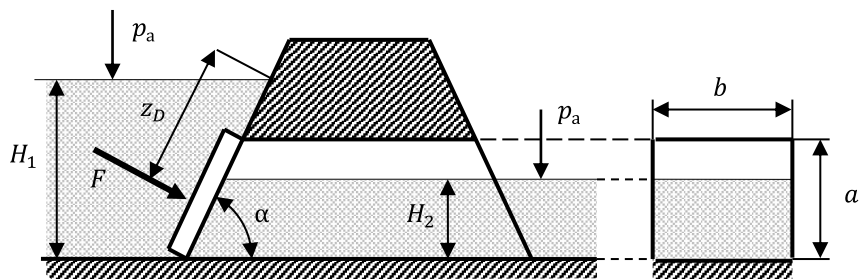


Рис. 11.3

Таблица 11.3

вариант	H_1 , м	H_2 , м	α , град	Форма сечения трубы	Размеры сечения трубы, м	Сторона затвора
0	5	1	90	Прямоугольник	$a = 1,5; b = 1$	Правая
1	5	2	45	то же	$a = 1,5; b = 1$	Левая
2	5	0	45	то же	$a = 1,5; b = 1$	Левая
3	4	0	60	— " —	$a = 2; b = 1$	Левая
4	5	0	90	Круг диаметра d	$d = 1,5$	Левая
5	4	1	90	то же	$d = 2$	Правая
6	4	3	90	то же	$d = 2$	Правая
7	4	2	90	— " —	$d = 2$	Правая
8	4	1	45	Треугольник	$a = 2; b = 1$	Правая
9	5	1	60	то же	$a = 2; b = 2$	Левая

Задача № 4. По данным табл. 11.4 и рис. 11.4 определить равнодействующую сил избыточного давления на 1 погонный метр (нормально к плоскости чертежа) указанной в таблице поверхности ($b = 1$ м). Найти угол наклона линии действия сил избыточного давления воды на поверхность. В расчетах принять $r = 1$ м.

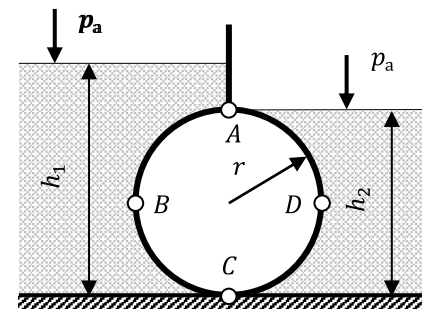


Рис. 11.4

Таблица 11.4

Вариант	Поверхность	h_1 , м	h_2 , м	Вариант	Поверхность	h_1 , м	h_2 , м
0	ABC	3	0	5	BC	3	1
1	AB	2	0	6	BC	1	0
2	BC	2	0	7	BCD	1	1
3	ABC	3	1	8	CDA	1	2
4	AB	3	1	9	DA	0	2

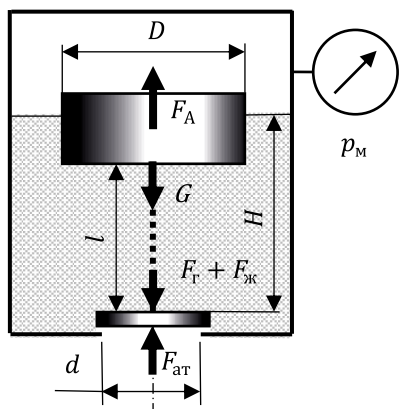


Рис. 11.5

Задача № 5. На дне резервуара с жидкостью плотностью ρ имеется круглое сливное отверстие, закрытое круглым клапаном (рис. 11.5). По данным табл. 11.5 определить, при каком диаметре D цилиндрического поплавка клапан автоматически откроется при достижении высоты уровня жидкости в резервуаре H ? Длина цепочки, связывающей поплавок с клапаном, равна l , вес подвижных частей устройства G , избыточное давление на свободной поверхности жидкости измеряется манометром, его показание равно p_m .

Таблица 11.5

Вариант	l , м	d , м	G , Н	p_m , кПа	H , м	ρ , кг/м ³
0	0,9	0,1	30	20	2,1	1000
1	0,8	0,05	20	30	1,6	1200
2	0,9	0,06	40	30	1,9	790
3	0,7	0,08	25	15	1,9	950
4	1,2	0,05	40	35	1,9	930
5	1,1	0,1	35	20	2,2	890
6	1,0	0,15	45	10	2,4	1100
7	1,2	0,2	30	20	2,1	1250
8	0,6	0,12	35	20	1,7	900
9	0,8	0,04	25	15	2,0	850

Указания. Диаметр поплавка D входит в выражение для архимедовой силы F_A и определяется из условия равновесия клапана: алгебраическая сумма всех пяти вертикальных сил, действующих на клапан, равна нулю.

Здесь выталкивающая сила Архимеда F_A , равная весу жидкости в объеме погруженной части поплавка $F_A = \rho g(H - l)\pi D^2/4$;

сила абсолютного давления газа $F_r = p_r \pi d^2/4$, где абсолютное давление газа $p_r = p_{ат} + p_m$;

сила атмосферного давления $F_{ат} = p_{ат} \pi d^2/4$;

сила весового давления жидкости $F_ж = \rho g H \pi d^2/4$;

вес подвижных частей устройства G .

Задание 2 для контрольной работы по гидродинамике

Задача № 6. На напорном водоводе постоянного диаметра в водопроводных колодцах A и B , расположенных на расстоянии l друг от друга, установлены манометры M_A и M_B (рис. 11.6), показывающие давление p_A и p_B на отметках z_A и z_B соответственно. Гидравлический уклон равен I , пьезометрический $I_{п.}$. Пользуясь данными табл. 11.6, определить величины, отмеченные в ней знаком вопроса.

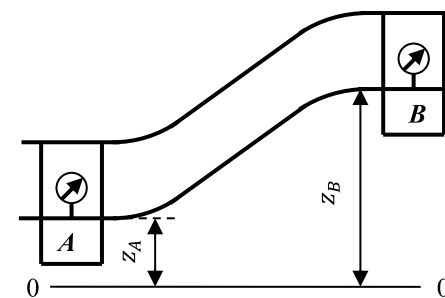


Рис. 11.6

Таблица 11.6.

Вариант	z_A , м	z_B , м	p_A , кПа	p_B , кПа	l , км	I	$I_{п.}$	Направление течения
0	43	50	510	500	1,1	?	—	?
1	62	80	380	250	2,1	—	?	?
2	110	120	470	400	1,8	?	—	?
3	115	120	416	?	1,5	—	0,002	От A к B
4	80	?	420	386	2	—	0,001	От A к B
5	23	10	?	400	0,5	—	0,002	От B к A
6	30	?	400	300	1,0	—	0,003	От B к A
7	87	50	200	350	2,2	?	—	?
8	95	110	500	?	1,5	—	0,001	От A к B
9	93	95	?	320	1,6	—	0,003	От A к B

Задача № 7. Определить направление течения и расход воды в трубе переменного сечения (рис. 11.7), используя данные табл. 11.7. Построить пьезометрическую и напорную линии. В расчетах принять коэффициент трения $\lambda = 0,025$, скоростным напором в баках пренебречь.

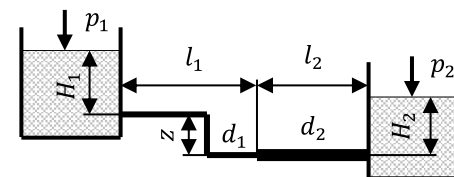


Рис. 11.7

Таблица 11.7.

Вариант	p_1 атм	p_2 атм	H_1 м	H_2 м	d_1 мм	d_2 мм	l_1 м	z м	l_2 м
0	$p_{абс} = 0,2$	$p_{изб} = 1,1$	10	3	75	100	200	1	200
1	$p_{изб} = 1,2$	p_a	0	16	75	65	300	1	50
2	$p_{вак} = 0,3$	$p_{абс} = 1,4$	20	0	75	50	100	2	50
3	$p_{абс} = 1,8$	p_a	4	–	100	75	200	8	50
4	$p_{вак} = 0,1$	p_a	10	–	65	75	100	5	100
5	$p_{изб} = 2,0$	$p_{вак} = 0,4$	5	6	75	65	100	2	50
6	$p_{абс} = 1,2$	p_a	0	20	100	75	200	3	50
7	p_a	p_a	0	15	60	100	150	1	100
8	$p_{вак} = 0,1$	p_a	10	10	50	80	200	3	50
9	p_a	$p_{абс} = 1,6$	22	0	75	50	100	2	50

Задача № 8. Подобрать диаметр стального трубопровода, если напор истечения H , длина трубы l и расход воды Q (рис. 11.8). Коэффициент местного сопротивления на вход в трубу $\xi_{вх} = 0,5$, вентиля $\xi_{в} = 4,5$, гидравлический коэффициент трения $\lambda = 0,025$. Остальные данные – в табл. 11.8.

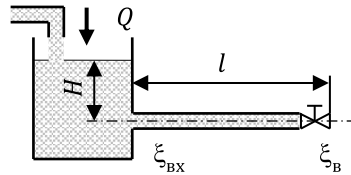


Рис. 11.8

Таблица 11.8

Вариант	H , м	l , м	Q , м ³ /с	Вариант	H , м	L , м	Q , м ³ /с
0	3	150	0,04	5	4	150	0,07
1	4	100	0,06	6	5	100	0,04
2	5	200	0,05	7	3	200	0,06
3	2,5	100	0,03	8	3,5	250	0,03
4	3	120	0,06	9	6	130	0,06

Указания. Задача решается путем построения кривой $d = d(H)$, задавая ряд диаметров d из табл. 9.1 и вычисляя соответствующие им напоры H (рис. 9.4).

Задача 9. В трубопроводе с параллельным или последовательным соединением труб общая подача воды составляет Q . Определить расходы воды в каждой ветви трубопровода (при параллельном соединении) и напор, требуемый для пропуска расхода Q . Трубы новые стальные. Исходные данные приведены на рис. 11.9, 11.10 и в табл. 11.9. Для нечетных вариантов выбирается последовательное соединение труб (рис. 11.9), а для четных – параллельное (рис. 11.10).

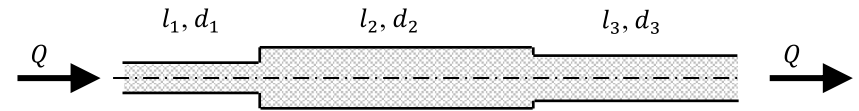


Рис. 11.9. Последовательное соединение трубопроводов

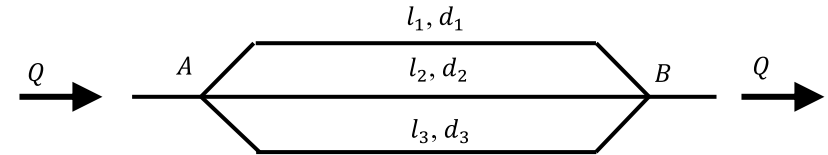


Рис. 11.10. Параллельное соединение трубопроводов

Таблица 11.9

Вариант	Расход Q , л/с	Диаметры труб, мм			Длины труб, м		
		d_1	d_2	d_3	l_1	l_2	l_3
0	10	100	125	150	700	800	900
1	15	100	125	150	400	500	600
2	10	125	150	175	700	800	900
3	20	125	150	175	400	500	600
4	15	150	175	200	700	800	900
5	30	150	175	200	400	500	600
6	20	175	200	250	700	800	900
7	40	175	200	250	400	500	600
8	30	200	250	300	700	800	900
9	60	200	250	300	400	500	600

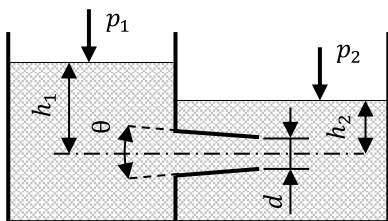


Рис. 11.11

Задача № 10. Определить расход воды, вытекающей через насадок (рис. 11.11) по данным табл. 11.10. Во всех вариантах задан диаметр выходного сечения $d = 30$ мм. Значение давления дано в атмосферах, $p_a = 1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па}$.

Таблица 11.10

Вариант	Тип насадка	h_1 , м	h_2 , м	θ , °	p_1 , атм	p_2 , атм
0	Коноидальный	2	6	0	p_a	$p_{\text{изб}} = 0,2$
1	Цилиндрический	6	–	0	p_a	$p_{\text{абс}} = 1,2$
2	Цилиндрический	7	–	0	$p_{\text{вак}} = 0,3$	p_a
3	Цилиндрический	2	8	0	$p_{\text{изб}} = 0,2$	p_a
4	Цилиндрический	9	2	0	$p_{\text{изб}} = 0,2$	p_a
5	Сходящийся конус	10	2	13°	p_a	p_a
6	Сходящийся конус	16	–	13°	p_a	$p_{\text{изб}} = 0,7$
7	Отверстие	2	–	–	$p_{\text{абс}} = 1,2$	p_a
8	Расходящийся конус	9	5	7°	p_a	p_a
9	Расходящийся конус	12	–	7°	p_a	$p_{\text{вак}} = 0,2$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс «Капелька-1» позволяет наглядно демонстрировать принцип действия жидкостных приборов и процессы течения жидкости в опытных каналах, легко понять физическую сущность гидравлических явлений в гидросистемах и сооружениях.

Лабораторные работы на комплексе позволяют быстро приобрести навыки по проведению гидравлического эксперимента и обработке опытных данных. Дополнительно для этого можно использовать традиционные гидравлические стенды.

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. Поэтому для активации познавательного интереса студентов приведены интересные сведения о влиянии солнечной активности на развитие гидравлики, о биоритмах ученых-гидравликов, о проявлении «золотого сечения» в гидравлике, дидактические кроссворды, которые разгадываются на сайте комплекса «КАПЕЛЬКА» <https://labkap.ru>. На сайте можно выполнить в дистанционном режиме и лабораторные работы, замерив давление, глубины, напоры и время опорожнения баков в ходе просмотра видеофильмов.

Для повышения мотивации и интереса к учебе в пособие используется умеренное количество гидравлического юмора по изучаемым темам. Юмор вызывает положительные эмоции, улучшает восприятие, внимание, память, помогает в запоминании и усвоении материала, делает учебу более привлекательной.

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. *Гидравлика и гидропривод* / Н.С. Гудилин, Е.М. Кривенко, Б.С. Маховиков [и др.]; под ред. И.Л. Пастоева. – М.: Горная книга, 2007. – 519 с.
3. *Гиргидов А.Д.* Механика жидкости и газа (гидравлика): учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 545 с.
4. *Голованов Я.К.* Этюды об ученых. – М.: Молодая гвардия, 1970. – 288 с.
5. *Зверева В.А.* Гидравлика: учебно-методический комплекс / В.А. Зверева, Н.В. Земляная, В.В. Земляной, С.В. Бочаров, О.И. Якушкина, Л.В. Кучерова, А.А. Надежкина. – М.: Проспект, 2021. – 376 с.
6. *Калищун В.И., Кедров В.С., Ласков Ю.М.* Гидравлика, водоснабжение и канализация. – М.: Стройиздат, 1990. – 359 с.
7. *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.
8. *Крестин Е.А., Крестин И.Е.* Задачник по гидравлике с примерами расчетов. Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 320 с.
9. *Курганов А.М.* Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. – Л.: Стройиздат, 1982. – 424 с.
10. *Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередат* / под ред. С.С. Руднева и Л.Г. Подвидза. – М.: Машиностроение, 1974. – 416 с.
11. *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.
12. *Практикум по гидравлике: Учеб. пособие* / Н.Г. Кожевникова, Н.П. Тогунова, А.В. Ещин, Н.А. Шевкун, В.Ф. Кривчанский. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 428 с.
13. *Сайриддинов С.Ш.* Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: Учеб пособие. – М.: АСВ, 2004. – 344 с.
14. *Слабожанин Г.Д.* Гидравлика: практикум (на комплексе «Капелька») – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. – 144 с.
15. *Слабожанин Г.Д.* Новое в преподавании инженерно-строительной гидравлики. // *Архитектура. Строительство. Инженерные системы: монография* / Е.Ю. Агеева, Л.Л. Бабенко, Т.В. Бондаренко и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 410 – 445 с.

16. *Слабожанин Г.Д.* Особенности разработки комплекса портативных лабораторий «Капелька» для изучения гидравлики. // *Машиностроение и инженерное образование* / Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин, А.И. Соболев, Н.А. Калинин. – 2008. – № 2. – С. 66-73.

17. *Слабожанин Г.Д., Слабожанин Д.Г.* Практикум по механике жидкости на портативной лаборатории «Капелька»: метод. указ. – Томск: Изд-во томского архитектурно-строительного университета, 2002. – 30 с.

18. *Слабожанин Г.Д.* Сводные таблицы предельных параметров истечения жидкости через отверстия, насадки и водосливы. // *Гидротехнические сооружения*. – 2009. – № 6. – С. 97-103

19. *Ухин Б.В.* Инженерная гидравлика / Б.В. Ухин, Ю.Ф. Мельников; под ред. Б.В. Ухина. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 344 с.

20. *Шейпак А.А.* Гидравлика и гидропневмопривод. Основы механики жидкости и газа / А.А. Шейпак. – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2017. – 272 с.

21. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика: / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с.

22. *Чугаев Р.Р.* Развитие и формирование технической механики жидкости (гидравлики). – Л.: Изд. ЛПИ имени М.И. Калинина, 1975. – 39 с.

23. *Штеренлихт Д.В.* Гидравлика: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колосс, 2008. – 656 с.

ПАТЕНТЫ КОМПЛЕКСА УСТРОЙСТВ «КАПЕЛЬКА-1

1. Пат.1721326 Россия, МКИ F 15 В 19/00. Учебно-лабораторная установка для исследования установившегося напорного течения жидкости / Г.Д. Слабожанин, В.Д. Слабожанин. – Оpubл. 23.03.1992.

2. Пат.1742655 Россия, МКИ G 01 L 7/18. Демонстрационный прибор для измерения гидростатического давления / Г.Д. Слабожанин, В.Д. Слабожанин. – Оpubл. 23.06.1992.

3. Свидетельство на полезную модель 27172 Россия, МКИ F 15 В 19/00. Учебно-лабораторное устройство для изучения свойств жидкости / Г.Д. Слабожанин, К.Н. Ребенков, Д.Г. Слабожанин. – Оpubл. 10.01.2003.

4. Пат. 216693 Россия, МПК G09B 23/08 (2006.01). Демонстрационный прибор для измерения гидростатического давления / Д.Г. Слабожанин, Г.Д. Слабожанин. – Оpubл. 21.02.2023.

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС

1. Сайт комплекса «КАПЕЛЬКА»: <https://labkap.ru>. Используется для дистанционного выполнения лабораторных работ на комплексе «Капелька-1» и для разгадывания дидактических кроссвордов по гидравлике.

Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин

ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ
С КОМПЛЕКСОМ «КАПЕЛЬКА-1» И ГИДРОЮМОРОМ:

учебное пособие

Часть 2. ДИНАМИКА

Отпечатано в типографии издательства «Ветер».

634003, г. Томск, пл. Соляная, 6.

Тел. (3822) 706-319, veter-tomsk@yandex.ru.

Подписано в печать: __.__.2025. Заказ № 16471.

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 5,625. Тираж 100 экз.