

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского»

Ф.А. Васильев, С.Н. Ильин, В.В. Пальвинский

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

Иркутск – 2018

УДК 532(076.5)

Г464

Рекомендовано к изданию научно-методическим Советом Иркутского государственного аграрного университета (протокол № 4 от «30» апреля 2018.).

Рецензенты: Лабаров Д.Б. доктор технических наук, профессор, декан инженерного факультета ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова»;
Бураев М.К. доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического сервиса и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».

Васильев, Ф.А. Гидравлика: лабораторный практикум. 2-ое изд. доп. и перераб. / Ф.А. Васильев, С.Н. Ильин, В.В. Пальвинский. – Иркутск: Изд-во ИрГАУ, 2018. – 151 с.

Практикум составлен в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования бакалавриата по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» и примерной программой по дисциплине «Гидравлика», утверждённой УМО вузов по агроинженерному образованию. Предназначено для бакалавров высших учебных заведений обучаемых по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

© Ф.А. Васильев,
С.Н. Ильин, В.В. Пальвинский, 2018.
© Издательство ИрГАУ, 2018.

ВВЕДЕНИЕ

В автоматизации и механизации всех производств агропромышленного комплекса значительное место занимают гидравлические процессы. В процессе изучения дисциплины студенты выполняют лабораторные работы, решают приближенные к практике инженера расчетно-графические задания.

Лабораторный практикум по дисциплине «Гидравлика» составлен в соответствии с имеющейся примерной программой дисциплины, одобренной учебно-методическим объединением вузов по агроинженерным специальностям.

Целью предлагаемого лабораторного практикума является оказание помощи при изучении дисциплины, в решении задач инженерной практики.

Лабораторный практикум составлен из двух разделов: лабораторно-практических работ, выполняемых на занятиях совместно с преподавателем и расчетно-графических работ, выполняемых самостоятельно. Для лучшего и полного усвоения материала при самостоятельной работе студента приведены методические указания для решения задач. В помощь студентам представлен словарь понятий и терминов входящих в курс по дисциплине «Гидравлика», в соответствии с примерной программой дисциплины.

По окончании изучения раздела «Гидродинамика» для закрепления пройденного материала проводится коллоквиум в виде тестирования, вопросы к которому изложены в приложении Б.

Лабораторная работа № 1

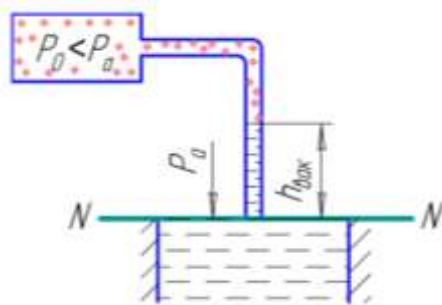
«Измерение вакуумметрического давления»

Время выполнения – 2 часа

Цель работы: приобретение навыков в измерении и определении вакуумметрического давления (разрежения) на поверхности жидкости и в точке, погруженной в жидкость.

Краткие теоретические сведения

Физическую сущность вакуумметрического давления (разряжения) и вакуумметрической высоты $h_{\text{вак}}$ можно уяснить при помощи схемы, представленной на рисунке 1.



P_0 – остаточное (абсолютное) давление в сосуде; $h_{\text{вак}}$ – вакуумметрическая высота; $N-N$ – плоскость равного давления; P_a – атмосферное давление.

Рисунок 1 – Схема к определению вакуумметрической высоты

На основании основного уравнения гидростатики для случая, когда действуют только силы тяжести и имеющего вид:

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad /1/$$

относительно плоскости равного давления $N-N$ напишем уравнение равновесия:

$$P_0 + \rho \cdot g \cdot h_{\text{вак}} = P_a, \quad /2/$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Введем обозначение в уравнение /2/, определяемую как

$$P_a - P_0 = P_{\text{раз}}, \quad /3/$$

тогда

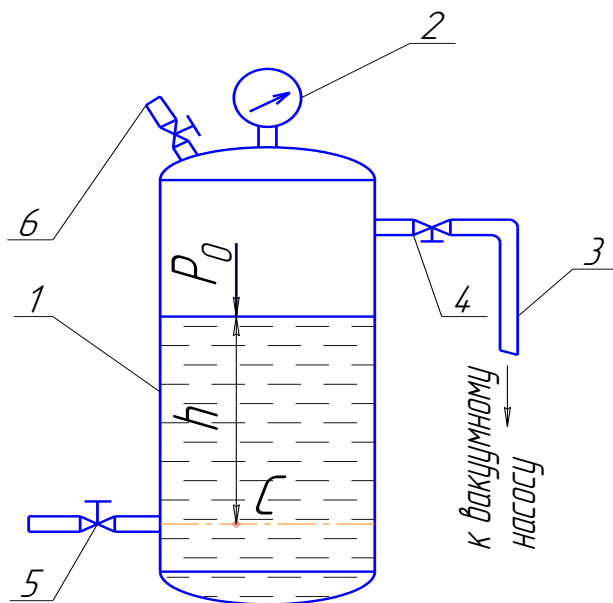
$$P_{\text{раз}} = \rho \cdot g \cdot h_{\text{вак}}, \quad /4/$$

где $P_{\text{раз}}$ – вакуумметрическое давление (разрежение), Па .

Следует помнить, что плотность воды в системе СИ $\rho_в = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$ (плотность ртути), атмосферное давление $P_a = 98\,100 \text{ Па}$. В технической системе $P = 1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ кг/м}^2$.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой (рис. 2);



1 – сосуд с водой, 2 – вакуумметр, 3 – шланг к вакуумному насосу, 4 - 5 – краны, 6 – кран атмосферного давления.

Рисунок 2 - Схема лабораторной установки

2. Соединить пространство над жидкостью в сосуде 1 шлангом 3 со штуцером вакуумного насоса «Разрежение», открыв кран 4. Краны 5 и 6 закрыть, включить вакуумметр 2 в работу. Вакуумметр 2 оттарирован в единицах *TORR* и фиксирует высоту вакуумметрического давления в *мм рт. ст.* на поверхности жидкости в резервуаре 1;

3. Включить в работу электродвигатель вакуумного насоса при помощи кнопки «пуск», создать некоторое разрежение в сосуде 1 (*300...400 мм. рт. ст.*) по показанию вакуумметра 2, занести в таблицу результатов измерений /графа 2/. При помощи крана 6 уменьшить разрежение в сосуде 1 и снять промежуточные показания вакуумметра 2 (2...3 положения).

По полученным показаниям прибора определить:

1. Вакуумметрическое давление $P_{раз}$ (*графы 4, 5*) по формуле /4/. При этом известно, что $1 \text{ кг/см}^2 = 10^4 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$.
2. Вакуумметрическую высоту $h_{вак}$ в *м.вод.ст.* в *графе 6* определить по

формуле:

$$h_{\text{вак}} = \frac{P_{\text{раз}}}{\rho_e \cdot g}, \quad /5/$$

где ρ_e - плотность воды, кг/м^3 .

3. Остаточное давление P_0 на поверхность жидкости (*графы 7, 8*) определить по формуле:

$$P_0 = P_a - P_{\text{раз}}$$

4. Остаточное давление в точке «С», находящейся на глубине 0,35 м (*графы 9*) по формуле:

$$P_{\text{ост}} = P_0 + \rho_e \cdot g \cdot h$$

5. Вакуумметрическое давление ($P_{\text{раз}}$) в точке «С» по формуле /3/ - *графы 10*.

6. Вакуумметрическую высоту $h_{\text{вак}}$ в точке «С» (*графы 11, 12*) по формуле /5/, при этом для определения высоты в *мм рт. ст.* подставлять в уравнение плотность ртути.

Отчетность

1. Вычертить схему лабораторной установки.
2. Начертить и заполнить таблицу результатов замеров и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Основное уравнение гидростатики. Написать формулу.
2. Что такое абсолютное давление? Пределы изменения?
3. Что такое вакуумметрическое давление? Написать формулу.
4. Чему равна максимальная величина вакуумметрического давления (разрежения)?
5. Чему равно абсолютное давление при воздействии максимального вакуумметрического давления?
6. Размерность давления разрежения в системе «СИ»?

Таблица - Результаты измерений и расчетные данные

№ п/п	По показанию вакуумметра							Определение разрежения в точке «С»			
	Показания ваку- умметра		Вакуумметрическое давление, $P_{раз}$		Высота, $h_{вак}$	Абсолютное остаточное дав- ление, P_o		Абсолютное давление в точке «С», P_{oC}	$P_{разC}$	$h_{вак}$ в точке «С»	
	<i>мм рт. ст.</i>	<i>м рт. ст</i>	<i>Па</i>	<i>кг/см²</i>	<i>м вод. ст.</i>	<i>Па</i>	<i>кг/см²</i>	<i>Па</i>	<i>Па</i>	<i>м вод. ст</i>	<i>мм рт. ст.</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2											
3											

Лабораторная работа № 2

«Измерение избыточного давления с помощью различных приборов»

Время выполнения – 2 часа

Цель работы:

Приобретение навыков в измерении избыточного давления при помощи манометра и пьезометра.

Краткие теоретические сведения

Для установления физической сущности давления для жидкости, находящейся в сосуде, воспользуемся приведенным дифференциальным уравнением Эйлера.

$$dP = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad /1/$$

где dP - полный дифференциал гидростатического давления;

ρ - плотность жидкости; X, Y, Z – проекции ускорения на оси x, y, z ;

dx, dy, dz - координаты точки в жидкости.

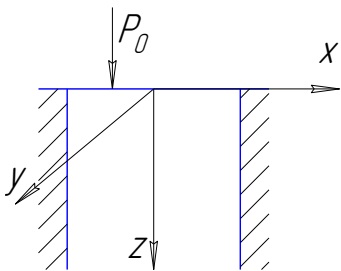


Рисунок 1

На рисунке 1 изображен объем жидкости, находящейся в состоянии покоя. На свободной поверхности действует давление P_0 . Для случая, когда действуют только силы тяжести, проекции ускорений X, Y равны нулю, а $Z=g$. Тогда уравнение /1/ можно представить как

$$dP = \rho \cdot g \cdot dz, \quad /2/$$

а давление в жидкости

$$P = \int \rho \cdot g \cdot dz = \rho \cdot g \cdot z + c, \quad /3/$$

где c – постоянная интегрирования.

Известно, что постоянная интегрирования находится из пограничных условий. При $z=0$ в уравнении /3/ $c = P_0$. Так как координата z характеризует

высоту погружения точки в жидкости принимаем $z = h$. Тогда уравнение /3/ примет вид:

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad /4/$$

где P – давление в рассматриваемой точке жидкости; P_0 – давление на свободную поверхность; $\rho \cdot g \cdot h$ – избыточное гидростатическое давление от столба жидкости.

Уравнение /4/ называется **ОСНОВНЫМ УРАВНЕНИЕМ ГИДРОСТАТИКИ**, когда действуют только силы тяжести.

Давление на свободную поверхность P_0 определяется:

$$P_0 = P_a + P_m, \quad /5/$$

где P_m – избыточное (манометрическое) давление; P_a – атмосферное давление.

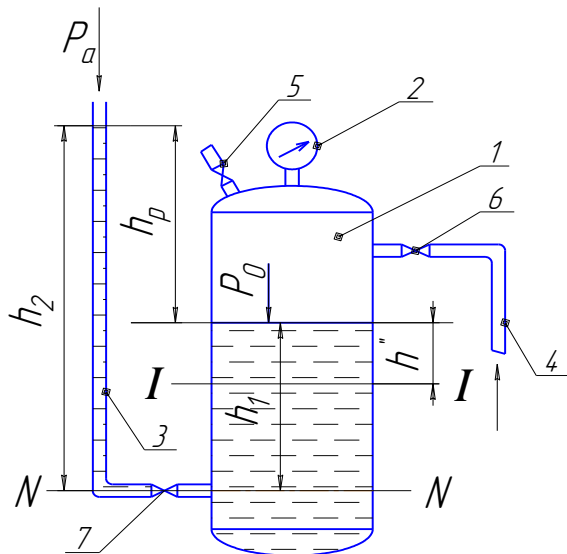
Избыточное давление в жидкости определяется как:

$$P - P_a = P_{изб},$$
$$P_{изб} = P_m + \rho \cdot g \cdot h. \quad /6/$$

Следует обратить внимание, что составляющие приведенных уравнений выражаются в системе «СИ», так: плотность воды $\rho_a = 1000 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$, высота h выражается в метрах, атмосферное давление $P_a = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$, в технической системе $P_a = 1 \text{ кг/см}^2 = 10^4 \text{ кг/м}^2$.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с расположением приборов лабораторной установки (рисунок 2);
2. Соединить пространство над жидкостью в сосуде 1 шлангом 4 и краном 6 со штуцером «Нагнетание» компрессора. Кран 5 закрыт, а 7 – открыт.



- 1 – резервуар;
- 2 – образцовый манометр;
- 3 – пьезометрическая трубка /пьезометр/;
- 4 – шланг;
- 5 – кран атмосферного давления.
- 6 - 7 – краны;
- h_p - пьезометрическая высота.

Рисунок 2 - Схема лабораторной установки

3. Включить в работу электродвигатель компрессора электрокнопкой «пуск», создать избыточное давление в резервуаре 1. Нагнетая воздух в резервуар 1 необходимо следить за уровнем жидкости в пьезометре 3, доведя ее до высоты 10 – 15 см ниже верхнего конца трубки 3. После этого электродвигатель выключить, кран 6 перекрыть, снять показания высоты h_2 по мерной шкале и занести в **графу 7**, а показания образцового манометра 2 – в графу 3. Снижая давление в резервуаре 1 краном 5 дополнительно снять несколько показания приборов.

Цена деления образцового манометра 3 равна $0,004 \text{ кг/см}^2$. Высоту h_1 измерить по водомерной трубке и считать постоянной для всех измерений.

По полученным показаниям приборов подсчитайте:

7. Пересчет манометрического давления P_m в его высоту /**графа 6**/ произвести по формуле:

$$h = \frac{P_m}{\rho_s \cdot g}, \quad /7/$$

где P_m – манометрическое давление в системе «СИ», Па.

8. Пьезометрическая высота определяется как $h_p = h_2 - h_1$ /**графы 7, 8**/, а

$$P_{изб} = \rho_e \cdot g \cdot h_p \text{ /графа 9/}$$

9. Избыточное давление с сечения $I-I - P_{изб\ I-I}$ /графа 11/ определяется по формуле /6/, при этом принять $h=h'' = 100$ мм.

10. Для определения абсолютного давления P_0 /графа 14/ на поверхности жидкости в резервуаре:

а) Найти и нанести на схему (рисунок 2) плоскость равного давления. Для этого рассмотрим смежную точку соединения пьезометра 3 с резервуаром 1. В этой точке давление со стороны пьезометра и резервуара одинаково. Такое же давление будет на высоте h_2 в пьезометре 3 и h_1 в резервуаре 1. Проведем через эти высоты плоскость, ограниченную линией $N-N$, которая называется плоскостью равного давления.

б) На основании основного уравнения гидростатики /4/ напишем уравнение равновесия:

$$P_0 + \rho \cdot g \cdot h_2 = P_0 + \rho \cdot g \cdot h_1;$$

так как абсолютное давление в открытой верхней части не может быть избыточным (из уравнения /5/) следует, что $P_0 = P_a$, тогда уравнение равновесия переписывается в следующем виде

$$P_a + \rho \cdot g \cdot h_2 = P_0 + \rho \cdot g \cdot h_1;$$

выразим искомое давление P_0 :

$$P_0 = P_a + \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1); \text{ или } P_0 = P_a + \rho \cdot g \cdot h_p. \quad /8/$$

Отчетность

1. Вычертить схему лабораторной установки.
2. Начертить и заполнить таблицу 1 результатов замеров и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Основное уравнение гидростатики (записать формулу).
2. Определение абсолютного и избыточного давлений.

3. Какое давление измеряется при помощи манометра?
4. Какое давление измеряется при помощи пьезометрической высоты?
5. Физическая сущность пьезометрической высоты?
6. Размерность давления в системе «СИ»?
7. Физическая сущность плоскости равного давления, написать уравнение равновесия для системы резервуар – пьезометр.
8. На какую величину отличается абсолютное давление от избыточного давления?

Таблица - Результаты замеров и расчетов

№№ пп	Давление на поверхность жидкости	Показания приборов								Избыточное давле- ние в сечении I-I, $P_{изб\ I-I}$			Давление по показа- нию пьезометра P_o		
		Давление по образцовому манометру, P_m				Давление по пьезометру				$h^II = 100\text{ мм} = 0,1\text{ м}$			Па	кг/см ²	кг/м ²
		По шкале мано- метра	Пересчет			h_2	h_p	$P_{изб}$		Па	кг/см ²	кг/м ²			
			кг/см ²	Па	м. вод. ст.	м. вод. ст.	м. вод. ст.	Па	кг/см ²						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	$P_o = P_a$														
2	$P_o > P_a$														
3	$P_o > P_a$														
4	$P_o > P_a$														

Лабораторная работа № 3

«Истечение жидкости через отверстия и насадки»

Время выполнения – 2 часа

Цель работы:

Определение опытным путем коэффициентов расхода, скорости и сжатия для отверстия в тонкой стенке цилиндрического, конически сходящегося и расходящегося насадков. Определение величины вакуумметрического давления в цилиндрическом насадке.

Краткие теоретические сведения

Различают малые и большие отверстия. Если диаметр отверстия $d < 0,1H$ (H – напор, под которым происходит истечение жидкости) – отверстие малое.

Истечение жидкости из отверстия или насадка в атмосферу или газовую среду называется незатопленным. Истечение под уровень жидкости – затопленным.

При истечении жидкости через отверстия различают полное и неполное сжатие струи. Полное сжатие может быть совершенным и несовершенным.

Отверстие в тонкой стенке имеет острые кромки. При истечении жидкости здесь возникают только местные потери напора. Частицы жидкости, движущиеся в потоке перед отверстием, вынужденно меняют направление движения на криволинейное и сжимают струю. По выходе из отверстия струя претерпевает сжатие до сечения С-С (см. рисунок 1).

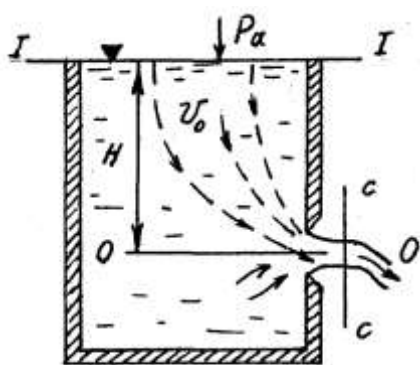


Рис. 1

Сечение С-С называется сжатым сечением и его площадь живого сечения обозначается как ω_c . Сжатое сечение определяется как

$$\omega_c = \frac{\pi d_c^2}{4}, \text{ где } d_c \text{ – диаметр сжатого сечения.}$$

Отношение ω_c и ω называется коэффициентом сжатия струи:

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad /1/$$

где ω – площадь живого сечения отверстия или насадка. Для круглого отверстия $\varepsilon = 0,64$.

При истечении жидкости через отверстие форма её поперечного сечения меняется и отличается от формы самого отверстия. Это явление именуется *инверсией струи*.

Скорость и расход жидкости при движении через отверстие определяются с использованием уравнения Бернулли:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{\alpha_1 v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + h_w, \quad /2/$$

Примем сечение **1-1**, совпадающей с уровнем жидкости в сосуде (рисунок 1), сечение **2-2** с сечением **C-C**, а плоскость сравнения **0-0** с осью, проходящей через центр тяжести отверстия. С учетом схемы (рисунок 1) в уравнении /2/ примем следующие обозначения: $v_1 = v_0$; $P_1 = P_a$; $Z_1 = H$; $v_2 = v_c$;

$P_2 = P_a$; $Z_2 = 0$; $h_w = h_M = \zeta_{BX} \frac{v_c^2}{2g}$. Подставим их в уравнение /2/:

$$\frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} + \frac{P_a}{\rho g} + H = \frac{\alpha_1 v_c^2}{2g} + \frac{P_a}{\rho g} + \zeta_{BX} \frac{v_c^2}{2g},$$

$$\frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} + H = \frac{v_c^2 (\alpha_2 + \zeta_{BX})}{2g}, \quad /3/$$

где v_0 - скорость подвода жидкости к отверстию; P_a - атмосферное давление; H – напор, под действием которого происходит истечение жидкости через отверстие; v_c - скорость в сечении **C-C**; ζ_{BX} - коэффициент местного сопротивления на входе потока в отверстие.

Так как $\frac{\alpha_1 v_0^2}{2g}$ пренебрежимо малая величина по сравнению с H , то с достаточной достоверностью ею в расчетах можно пренебречь. Тогда из уравнения /3/:

$$v_c = \sqrt{\frac{2gH}{\alpha_2 + \zeta_{BX}}} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_2 + \zeta_{BX}}} \cdot \sqrt{2gH}, \quad /4/$$

Обозначим в уравнении /4/:

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha_2 + \zeta_{BX}}}$$

Тогда скорость в сечении С-С:

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad /5/$$

где φ - **коэффициент скорости**.

Зная v_c расход жидкости Q составит

$$Q = v_c \omega_c = \omega_c \varphi \sqrt{2gH}$$

Так как $\omega_c = \varepsilon \omega$ (из уравнения 1), то

$$Q = \varepsilon \varphi \omega \sqrt{2gH} = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad /6/$$

где $\mu = \varepsilon \varphi$ - **коэффициент расхода**.

Установление основных зависимостей для определения μ при истечении жидкости через насадки имеет общую методическую основу с их определением через отверстия. Истечение жидкости через насадки имеет ряд специфических особенностей. **Насадком** называется короткая трубка длиной $l = (3...5)d$, прикрепленная к отверстию. Существуют следующие виды насадков: а) цилиндрические (внешние и внутренние); б) конические (сходящиеся и расходящиеся); в) коноидальные.

Цилиндрический внешний насадок имеет применение в качестве водо-

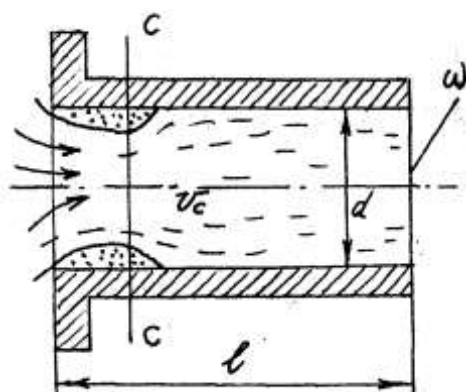


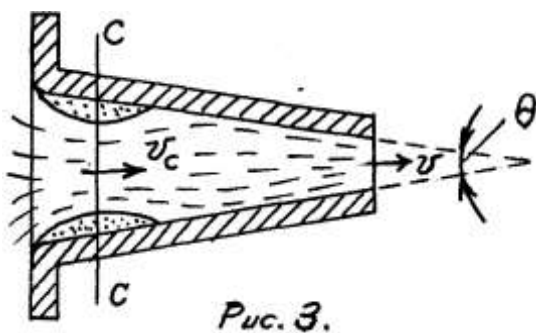
Рис. 2

пусков в плотинах, труб под насыпями дорог, жиклеров в карбюраторах ДВС и др. Вследствие изгиба линий токов, при входе жидкости в насадок, происходит сжатие струи с образованием водоворотной зоны (рисунок 2) и образованием разрежения.

Полный напор для насадка, как бы уве-

личивается и складывается из напора H над центром тяжести входного отверстия и величины разрежения $P_{раз}$ в сечении $C-C$. Вместе с тем, присоединение насадка к отверстию дает дополнительные потери напора по сравнению с истечением жидкости через отверстие, вызываемое внезапным расширением потока с образованием водоворотной зоны и трением потока о его внутреннюю поверхность. Тем не менее, образование $P_{раз}$ так существенно, что приводит к увеличению расхода воды через насадок примерно на 30%. Расход жидкости через насадок определяется по формуле /6/, а скорость течения в выходном отверстии насадка аналогична уравнению /5/

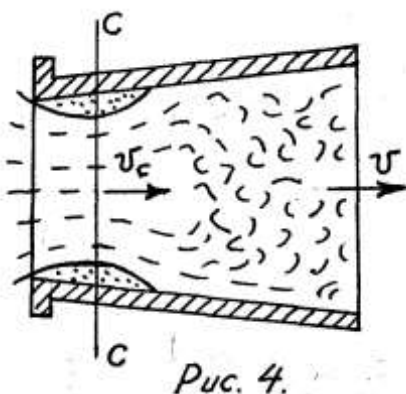
$$v = \varphi \sqrt{2gH} . \quad /7/$$



Конический сходящийся насадок (рисунок 3) применяется там, где требуется большая кинетическая энергия потока. Например, в пожарных брандспойтах, гидромониторах, фонтанах, эжекторах и др. В этом насадке коэффициент μ , увеличивается за счет уменьшения гидравлических сопротивлений на входе и уменьшении эффекта внезапного

расширения. Коэффициент расхода зависит от угла конусности θ . При возрастании θ от 0 до $13^{\circ} 24'$ коэффициент μ увеличивается от $0,829$ до $0,946$. При дальнейшем увеличении θ коэффициент μ уменьшается, так как происходит дополнительное сжатие струи при выходе из насадка. Расход жидкости Q скорость v определяется по уравнениям /6/, /7/.

Коэффициент расхода зависит от угла конусности θ . При возрастании θ от 0 до $13^{\circ} 24'$ коэффициент μ увеличивается от $0,829$ до $0,946$. При дальнейшем увеличении θ коэффициент μ уменьшается, так как происходит дополнительное сжатие струи при выходе из насадка. Расход жидкости Q скорость v определяется по уравнениям /6/, /7/.



Конически расходящийся насадок (рисунок

4) применяется там, где нужно за счет уменьшения скорости увеличить давление, например в реактивных турбинах, центробежных насосах и др., что следует из уравнения Бернулли. В конически расходящемся насадке сжатие струи и раз-

ряжение в сечении $C-C$ больше, чем у цилиндрического внешнего насадка. С увеличением θ разряжение возрастает. Для надёжной работы без срыва разряжения допускается угол конусности $\theta = 5 \dots 7^\circ$. Потери напора при входе в насадок велики в сравнении с другими видами насадков. Также значительны потери от эффекта внезапного расширения, водоворотная зона более обширна. Потому коэффициент μ минимален и при $\theta = 5 \dots 7^\circ$ равен примерно 0,5. Определение Q , v производится по уравнениям /6/, /7/. Коэффициент сжатия ε у всех насадков примерно равен единице, поэтому $\mu = \varphi$.

При истечении жидкости через отверстие и насадки под уровень для определения расхода применяется формула

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \quad /8/$$

где H_1 - высота уровня жидкости, под действием происходит истечение жидкости; H_2 - высота уровня подтопления. Указанная формула аналогична выражению /6/. Многочисленными исследователями установлено, что коэффициенты расхода жидкости через затопленные и незатопленные отверстия и насадки практически не одинаковые. Поэтому при расчетах следует пользоваться известными коэффициентами расходов для незатопленных отверстий и насадков.

Для случая, когда в сосуде на поверхность жидкости действует избыточное (манометрическое давление P_M), расход жидкости через отверстия и насадки может быть определен из выражения

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H + P_M/\rho g)}. \quad /9/$$

Определение расхода жидкости при истечении жидкости через большие отверстия можно производить по формуле:

$$Q = \mu \cdot b \cdot a \sqrt{2gH_c}, \quad /10/$$

где b , a – ширина и высота отверстия; H_c – глубина погружения центра тяжести отверстия.

Величина коэффициента расхода μ для больших отверстий по Н.Н. Павловскому, в зависимости от типа отверстия и условий подхода воды к отверстию колеблется в пределах $0,65 \dots 0,90$.

При истечении жидкостей из отверстий или насадков при переменном напоре величина скорости и напора с течением времени меняется, т.е. имеем неустановившееся движение жидкости. Поэтому подробно и всесторонне этот вопрос рассматривается в специальных курсах гидравлики. Мы рассматриваем наиболее простой, но важный для инженерной практики случай опорожнения или наполнения призматического резервуара, приводимый в литературных источниках.

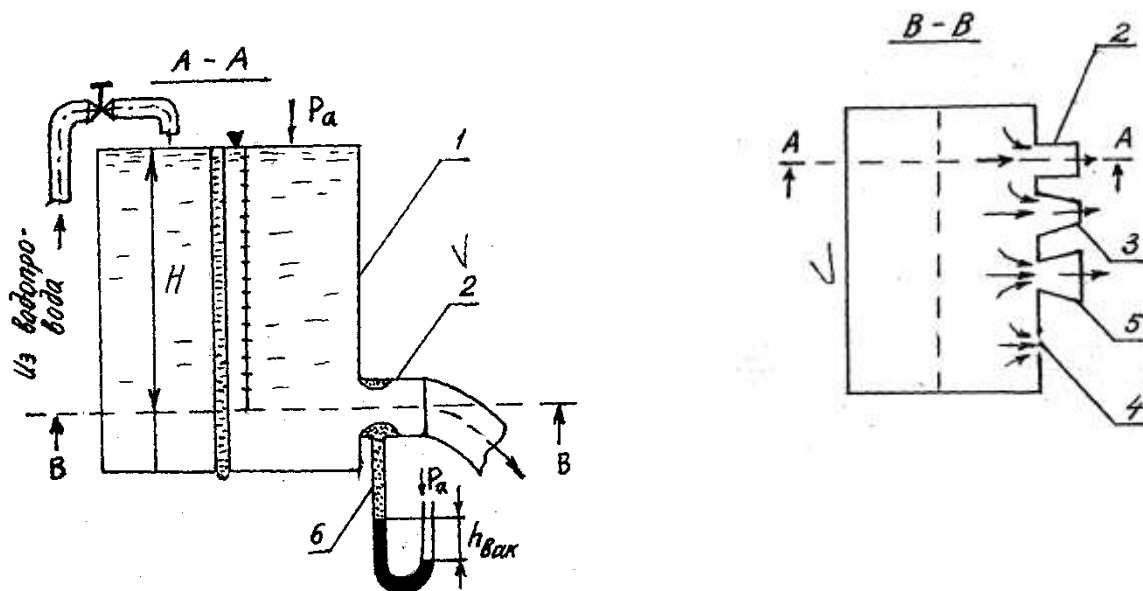


Рисунок 5 – Схема лабораторной установки

Описание лабораторной установки (рис. 5).

Установка для определения коэффициентов $\mu, \varphi, \varepsilon$ состоит из напорного резервуара (1) и размещенных на его боковой поверхности (на одном уровне) цилиндрического (2), конически сходящегося (3), расходящегося (5), насадков и отверстия в тонкой стенке (4). Диаметр диктующих отверстий для насадков равен 10 мм, диаметр отверстия в тонкой стенке 12 мм. Область, где образуется сжатое сечение в цилиндрическом насадке соединена с жидкост-

ным манометром (6). Расход жидкости определяется объемным способом с применением бочка емкостью $W = 6750 \text{ см}^3$ и секундомера.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Перекрыть насадки и отверстие резьбовыми пробками.
2. Заполнить резервуар на высоту « H » указанную преподавателем.
3. Открыть резьбовую пробку с отверстия в тонкой стенке, отрегулировать постоянство напора « H ». Определить время наполнения мерного бочка, данные занести в таблицу опытных и расчетных данных.
4. Те же операции провести для всех насадков, с замером вакуумметрической высоты у цилиндрического насадка. Данные занести в таблицу.

Таблица - Значения опытных и расчетных данных

№№ п.п	Отверстие и типы насадков	Напор H , см	Время напол- нения t , с	Расход воды Q , $\text{см}^3/\text{с}$	Расчетные данные ко- эффициентов			Вакуумметриче- ская высота, м <i>вод. ст.</i>
					μ	φ	ε	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	<i>Отверстие в тон- кой стенке</i>							
2	<i>Конический расхо- дящийся насадок</i>							
3	<i>Конический сходя- щийся насадок</i>							
4	<i>Цилиндрический насадок</i>							

Порядок расчета:

1. Объемный расход воды (*графа 5*) определяется по формуле:

$$Q = W/t, \quad /11/$$

где W – емкость мерного бочка ($W = 6750 \text{ см}^3$); t – время заполнения мерного бочка, с.

2. Определение коэффициента расхода μ и коэффициента скорости φ (графы 6, 7) при истечении жидкости через отверстие в тонкой стенке производится по формулам:

$$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}, \quad /12/$$

где $\omega\sqrt{2gH}$ - расход идеальной жидкости (теоретический расход Q_T).

$$\varphi = \frac{Q}{\omega_c\sqrt{2gH}}, \quad /13/$$

где ω - живое сечение отверстия, $см^2$; ω_c - живое сечение струи в сжатом сечении ($\omega_c = 0,64 \cdot \omega$), $см^2$; $g = 981 \text{ см}/с^2$.

3. Определение коэффициентов μ, φ при истечении жидкости через насадки производится по формуле (12). В данном случае $\varphi = \mu$.

4. Коэффициент сжатия струи « ε » определяется только для истечения жидкости через отверстие в тонкой стенке, по следующей зависимости:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi} \quad /14/$$

Отчетность

1. Вычертить схему экспериментальной установки.
2. Заполнить таблицу значений опытных и расчетных данных.

Контрольные вопросы:

1. Дать определение понятиям: отверстие в тонкой стенке и насадок.
Классификация насадков.
2. Объяснить физическую сущность коэффициентов $\mu, \varphi, \varepsilon$.
3. Когда коэффициенты $\mu, \varphi, \varepsilon$ могут быть равны единице?
4. Объяснить роль разрежения при истечении жидкости через насадки.
5. Почему расход жидкости при истечении ее через цилиндрический насадок выше, чем при истечении через отверстие при $H, \omega = const$.
6. Назвать область применения насадков в народном хозяйстве.

Лабораторная работа № 4

«Определение режимов движения жидкости и коэффициента гидравлических сопротивлений трения λ »

Время выполнения – 2 часа

Цель работы: Пронаблюдать и определить режимы движения жидкости в стеклянном трубопроводе. Определить коэффициент гидравлических сопротивлений трения λ .

Краткие теоретические сведения

Определение вида движения потока жидкости по его структуре можно сделать визуально и аналитически. Наблюдая за движением жидкости в стеклянной трубе (Рисунок 1, а) мы видим следующее.

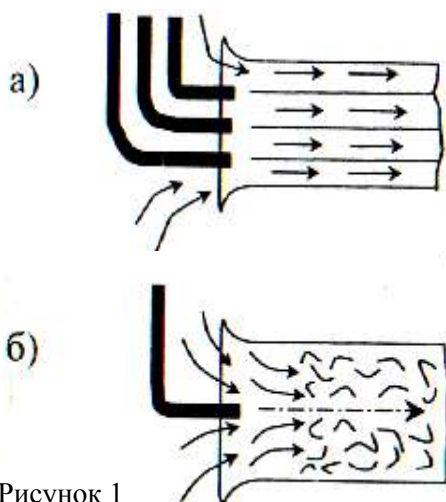


Рисунок 1

Если пустить в поток жидкости краску (подкрашенную жидкость), то при малых скоростях течения появятся окрашенные струйки. Они движутся прямолинейно, но не перемешиваясь с соседней жидкостью потока. Такое параллельно-струйное, спокойное движение жидкости называют *ламинарным* (слоистым) движением, или **ламинарным режимом движения жидкости**.

Если постепенно увеличивать скорость движения жидкости в стеклянной трубе, то при некоторой скорости параллельно-струйное движение будет нарушено. Окрашенные струйки примут вначале извилистую форму, затем появятся разрывы струйки. При дальнейшем увеличении скорости разрывы учащаются и исчезают, перемешиваясь с потоком жидкости (рис.1, б). Беспорядочное движение частиц жидкости, во время которого происходит их перемешивание и

окрашивание всего потока называют *турбулентным* (беспорядочным) *движением жидкости*, или **турбулентным режимом движения.**

На основании анализа размерностей и используя закон динамического подобия потоков, О. Рейнольдс предложил безразмерный критерий динамического подобия потоков жидкости:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad /1/$$

где Re - называемый числом Рейнольдса, v - средняя скорость; d - диаметр трубопровода; ν - коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Однако следует иметь в виду, что переход одного режима движения в другой происходит при совершенно определенной средней скорости движения потока, называемой **критической**. При этом обозначают критические скорости: верхнюю $U_{кр.в.}$ и нижнюю $U_{кр.н.}$. При верхней критической скорости ламинарный режим движения переходит в турбулентный; при нижней критической скорости турбулентный режим переходит в ламинарный. При этом всегда $U_{кр.в.} > U_{кр.н.}$, этим скоростям соответствуют $Re_{кр.н.} = 2320$; $Re_{кр.в.} = 13800$, полученных в результате тщательно поставленных экспериментов.

Многочисленными опытами разных авторов установлено, что нижнее критическое число Рейнольдса для труб при напорном движении равно 2320. По этому числу устанавливают вид режима движения жидкости. Если $Re < 2320$, то поток имеет ламинарный режим движения, при $Re > 2320$ - турбулентный. С физической точки зрения критерий Re есть отношение сил инерции потока ($P_{ин}$) к силам трения при его движении ($T_{тр}$). Так как сила инерции

$$P_{ин} = ma = \rho W \frac{dv}{dt} = \frac{\rho L^3 L}{T^2},$$

а сила трения по закону Ньютона-Петрова

$$T_{тр} = \mu \omega \frac{dv}{dt} = \frac{\mu \cdot L^2 \cdot L}{T \cdot L},$$

то разделив $P_{ин}$ на $T_{ТР}$ имеем:

$$\frac{|P_{ин}|}{|T_{ТР}|} = \frac{|\rho W v t d h|}{|\mu d t^2 \omega d v|} = \frac{|\rho| L^3 \cdot L}{|\mu| T L^2} = \frac{|\rho| L L}{|\mu| T} = \frac{v L}{\nu},$$

где m - масса; a - ускорение; ρ - плотность жидкости; W - объем занимаемый жидкостью, μ - динамическая вязкость; ω - площадь соприкосновения слоев жидкости; dv/dh - градиент скорости; L - характерный линейный размер.

Таким образом

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}. \quad /2/$$

Для трубопроводов круглого сечения характерной линейной величиной является диаметр трубопровода d . А для трубопроводов другого сечения и для открытых русел - гидравлический радиус R . Так как $d=4R$, то для этих случаев

$$Re = \frac{v \cdot 4R}{\nu}. \quad /3/$$

Критерий динамического подобия (число Рейнольдса) есть безразмерная величина.

Для структурных, неоднородных жидкостей (жидкие кормовые смеси, жидкий навоз и др.) применяется критерий динамического подобия Филатова:

$$Re = \frac{1}{\frac{\mu}{\rho \cdot dv} + \frac{\tau_0}{6\rho v^2}}, \quad /4/$$

где τ_0 - предельное напряжение сдвига.

При $\tau_0=0$ (однородные, ньютоновские жидкости) уравнение (4) преобразуется в известную формулу (1).

Для неоднородных жидкостей ламинарный режим называют квазиламинарным, турбулентный - квазитурбулентным.

Ламинарный режим движения наблюдается при движении нефти, горюче - смазочных материалов, движении воды в капиллярах при фильтрации почвы и т.д. При водоснабжении преобладает турбулентный режим.

Определение режима движения жидкости в практических расчетах имеет важное значение. Опыты показали, что потери напора по длине потока и касательное напряжение при ламинарном режиме движения - пропорциональны средней скорости течения в первой степени:

$$h_e = Av, \quad \tau = av,$$

где h_e - потери напора по длине потока; A, a - коэффициенты пропорциональности; τ - касательное напряжение.

Для турбулентного режима движения потери напора и касательное напряжение пропорциональны средней скорости течения в степени « n »:

$$h_e = Bv^n, \quad \tau = bv^n$$

где B, b - коэффициенты пропорциональности; n - показатель степени, изменяющийся от 1,75 до 2.

С увеличением числа Рейнольдса показатель n увеличивается. При развитой турбулентности $n = 2$.

Потери напора по длине потока определяются по известной формуле Дарси:

$$h_w = \lambda \cdot \frac{\ell \cdot v^2}{d \cdot 2g}, \quad /5/$$

где λ - коэффициент гидравлических сопротивлений трения.

Коэффициент λ определяется в зависимости от режимов движения жидкостей. Так, при ламинарном режиме

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad /6/$$

Формулу (6) называют формулой Пуазейля. При турбулентном режиме коэффициент λ определяется по другим зависимостям. Так, в области гидравлически гладких трубопроводов λ , определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad /7/$$

В переходной зоне (доквадратической) для определения λ , применяется ряд уравнений, в том числе формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta y}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad /8/$$

где Δy - эквивалентная равномерно-зернистая абсолютная шероховатость.

В квадратичной области рекомендуются формулы, где λ не зависит от Re , а зависит только от относительной шероховатости.

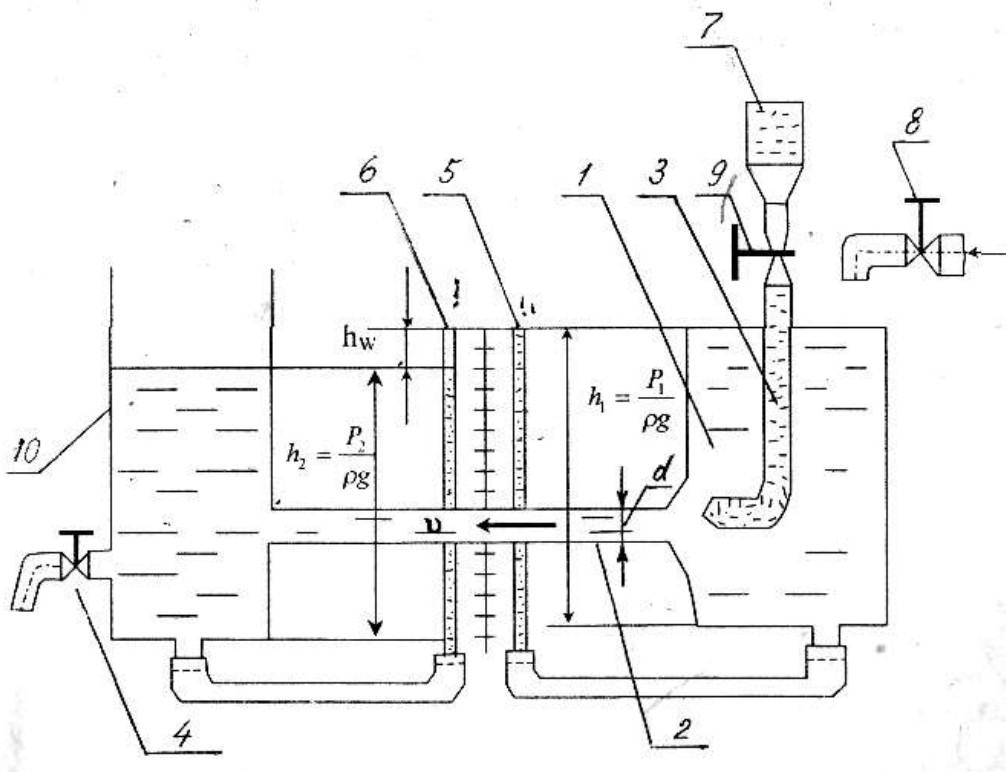


Рисунок 2 – Схема лабораторной установки

Для проведения опытов имеется лабораторная установка (Рисунок 2), где 1 - сосуд; 2 - стеклянная трубка с внутренним диаметром 35 мм; 3 - трубка для ввода в поток подкрашивающей жидкости; 4 - вентиль; 5, 6 - пьезометры; 7- сосуд с подкрашивающей жидкостью; 8 - кран водопровода; 9 - кран подкрашивающей жидкости; 10 - бак.

Порядок проведения работы

1. Ознакомившись с установкой, заполните водой сосуд (1) и подкрашенной жидкостью сосуд (7). При заполнении сосуда (1) водой обратите внимание на то, чтобы в пьезометрах не оставалось пузырьков воздуха, что значительно снижает точность замеров.

2. На 1/4 оборота приоткрыть вентиль 4 (минимальный расход воды), а краном 8 обеспечить постоянство уровня воды в сосуде 1. При установившемся движении потока краном 9 вводится подкрашивающая жидкость, которая в потоке имеет очертание прямой линии, что свидетельствует о наличии ламинарного режима. Увеличивая расход жидкости в трубопроводе вентилем 4 пронаблюдать переход ламинарного режима в турбулентный.

3. При каждом фиксированном положении вентиля 4 (количество замеров должно быть не менее 5) определить время наполнения мерного сосуда t (*графа 2*), занести в таблицу показания пьезометров h_1 и h_2 (*графы 7, 8*).

Таблица - Результаты измерений и расчетов

№ пп	$W, \text{ см}^3$	$t, \text{ сек}$	$Q, \text{ см}^3/\text{с}$	$v, \text{ см}/\text{с}$	Re	$h_1, \text{ см}$	$h_2, \text{ см}$	$h_w, \text{ см}$	λ	Режим движения жидкости
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1										
2										
3										
4										
5										

Порядок расчета:

1. Определить расход воды, и занести в таблицу 1 (*графа 4*):

$$Q = \frac{W}{t}, \quad \text{см}^3/\text{сек} \quad /9/$$

где W - емкость мерного сосуда, см^3 ($W = 4750 \text{ см}^3$); t – время наполнения мерного сосуда, с .

2. Скорость движения жидкости (*графа 5*) в стеклянном трубопроводе определяется из выражения

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad /10/$$

где v - средняя скорость, $см/с$; Q - расход жидкости, $см^3/с$.

3. Число Рейнольдса (*графа 6*) определяется по формуле /1/, принимая в условиях опыта $\nu=0,015 см^2/с$.

4. Пьезометры 5, 6 характеризуют высоту гидродинамического давления в точках их присоединения. Из уравнения Бернулли при $v_1 = v_2$, $z_1 = z_2$, пренебрегая местными сопротивлениями на входе и выходе из трубопровода определяем потери напора (*графа 9*)

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} = h_w \quad \text{или} \quad h_1 - h_2 = h_w \quad /11/$$

5. Из уравнения Дарси /5/ при $\ell = 100 см$, известных значениях v , $d = 3,5 см$, h_w , $g=981 см/с^2$ необходимо определить коэффициент λ (*графа 9*):

$$\lambda = \frac{h_w \cdot d \cdot 2g}{\ell \cdot v^2}, \quad /12/$$

6. По расчетным данным построить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса - $100\lambda = f(Re)$.

Отчетность:

1. Дать эскиз лабораторной установки.
2. Заполнить таблицу, определяя режимы движения жидкости.
3. Построить графическую зависимость $100\lambda = f(Re)$.

Контрольные вопросы к лабораторной работе:

1. Написать формулу Дарси.
2. Физическая сущность ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости.
3. Написать формулу для определения числа Рейнольдса.
4. Объяснить значение критического числа.
5. От чего зависит коэффициент гидравлических сопротивлений.

Лабораторная работа №5

«Геометрическая, энергетическая и механическая сущность уравнения Бернулли»

Цель работы:

На основании опытных и расчетных данных построить график геометрической интерпретации уравнения Бернулли.

Краткие теоретические сведения:

Уравнения Бернулли было получено действительным членом Петербургской академии наук Д. Бернулли в 1738г. Уравнение получено с применением к элементарной струйке идеальной жидкости закона изменения кинетической энергии (закона живых сил). Это же уравнение было получено Л. Эйлером в 1755г. после вывода им дифференциальных уравнений движения жидкости.

Под идеальной жидкостью понимают такую фиктивную абсолютно несжимаемую жидкость, которая не оказывает сопротивления усилиям сдвига и растягивающим силам. Если первое и третье ограничения близко совпадают со свойствами реальной жидкости, то второе ограничение является главным отличием идеальной жидкости от реальной. Поэтому идеальную жидкость иногда называют невязкой.

Приступая к изучению законов движения идеальной жидкости, получают уравнения, которые затем распространяются на реальные потоки.

Уравнение Бернулли характеризует взаимосвязь между *средней скоростью потока, гидродинамическим давлением p и высотным положением расчетных сечений*. Для установившегося движения потока реальной жидкости оно имеет вид:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_w. \quad (1)$$

Все члены уравнения имеют определенный геометрический и энергетический смысл:

z - геодезический напор относительно принятой горизонтальной плоскости сравнения (удельная потенциальная энергия положения);

$\frac{p}{\rho g}$ - пьезометрический напор относительно центра тяжести сечения

(удельная потенциальная энергия давления);

$\frac{v^2}{2g}$ - скоростной напор (удельная кинетическая энергия);

h_w - потери напора (потери удельной механической энергии).

Сумма первых двух членов уравнения (1) есть статический напор относительно плоскости сравнения, и характеризует запас удельной потенциальной энергии в рассматриваемом сечении. Величина U_n определяется как вертикальная высота от плоскости сравнения до уровня жидкости в пьезометре.

$$z + \frac{p}{\rho g} = U_n, \quad (2)$$

Сумма трех членов уравнения Бернулли называется *гидродинамическим напором* и характеризует *полную удельную энергию E* потока жидкости в рассматриваемом сечении.

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} = E. \quad (3)$$

Гидродинамический напор E может быть измерен с помощью пьезометра и трубки Пито или вычислен по формуле (3). Уравнение Бернулли имеет линейную размерность.

Линия, соединяющая уровень в пьезометрах, расположенных по длине трубопровода, называется *пьезометрической*. Соответственно линия, соединяющая уровень жидкости в трубках Пито - *напорная*.

Пьезометрическая линия, характеризующая изменения удельной энергии (потенциальной энергии по длине потока) может, как понижаться (при увеличении скорости), так и повышаться (при уменьшении скорости).

Напорная линия, характеризующая изменения полной удельной энергии по длине потока из-за наличия потерь энергии может только понижаться.

Падение пьезометрической линии характеризуется *пьезометрическим уклоном*, который представляет собой разность удельных потенциальных энергий в рассматриваемых сечениях, отнесенную к расстоянию между этими сечениями.

$$J_p = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right)}{\ell}, \quad (4)$$

где ℓ - расстояние между сечениями, м.

Падение напорной линии на единицу длины потока жидкости называется **гидравлическим уклоном**:

$$J = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}\right)}{\ell}. \quad (5)$$

Пьезометрический уклон J_p может быть *положительным и отрицательным*, а **гидравлический уклон J** только *положительным*.

При равномерном движении жидкости в горизонтальном трубопроводе гидравлический уклон равен пьезометрическому, а напорная линия параллельна пьезометрической линии.

Лабораторная установка состоит (рис. 1): 1 - бак; 2 - пьезометр; 3 - трубка Пито; 4 - трубопровод $d_1=12$ мм, $\ell=1$ м; 5 - трубопровод $d_2=25$ мм, $\ell=1$ м; 6 - трубопровод $d_3=19$ мм, $\ell=1$ м; 7 - питательный кран; 8 - расходный кран.

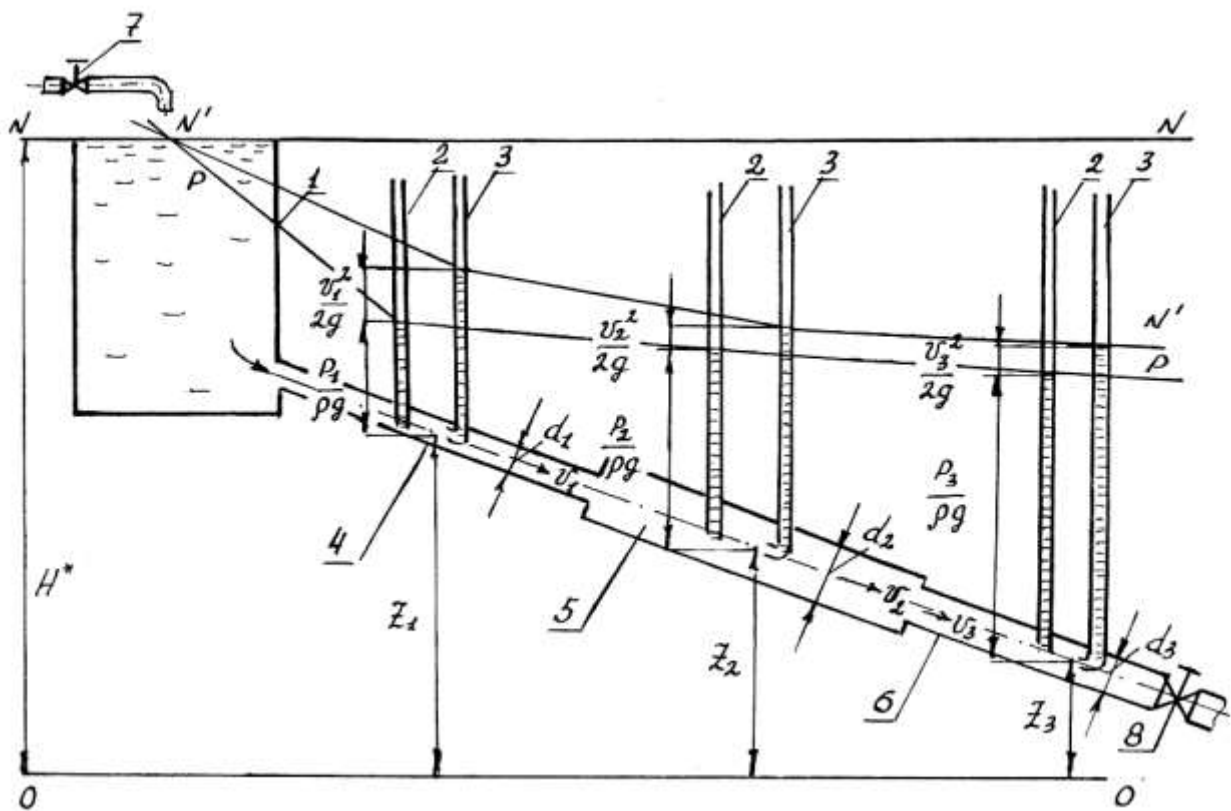


Рисунок 1 - Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

$N-N$ - теоретическая напорная линия; $N'-N'$ - действительная напорная линия; $P-P$ - пьезометрическая линия. В масштабе 1:10 в условиях опыта $H^* = 100$ мм.

Порядок выполнения работы:

Отвернуть кран 7 на несколько оборотов, отрегулировать постоянство уровня воды в баке 1. При наличии пузырьков воздуха в пьезометрических трубках и трубках Пито, сообщить преподавателю или лаборанту.

$$\text{Зная, что } \frac{v_1^2}{2g} = h_1; \quad \frac{v_2^2}{2g} = h_2; \quad \frac{v_3^2}{2g} = h_3$$

где h_1, h_2, h_3 - высоты скоростных напоров, определить скорости движения воды v_1, v_2, v_3 по формуле: $v = \sqrt{2gh}$

Из теоретического курса известно, что в пьезометрических трубках будут соответствующие показания: $\frac{p_1}{\rho g}$; $\frac{p_2}{\rho g}$; $\frac{p_3}{\rho g}$, в трубках Пито $\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$; $\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$; $\frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g}$, а линии соединяющие показания пьезометров называются пьезометрической линией, показания в трубках Пито - действительной напорной линией.

Высоты z_1 ; z_2 ; z_3 - показывают положения центров тяжести сечений 1-1; 2-2; 3-3 относительно плоскости сравнения О-О.

Сумма всех высот дает представление об уравнении Бернулли:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_w,$$

где h_w - потери энергии при движении жидкости из сечения 1-1 в сечение 2-2

$$h_{w_1} = \left(\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right). \quad /6/$$

При движении из сечения 2-2 в сечение 3-3 потери энергии h_{w_2} можно определить:

$$h_{w_2} = \left(\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) - \left(\frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} + z_3 \right), \quad /7/$$

Потери энергии движения жидкости из сечения 1-1 в сечение 3-3:

$$h_{w_3} = \left(\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} + z_3 \right). \quad /8/$$

Отчетность

1. Зарисовать схему установки.
2. Данные замеров h_1, h_2, h_3 при постоянном расходе, а также значений $p_1/\rho g, p_2/\rho g, p_3/\rho g, z_1, z_2, z_3$ занести в таблицу журнала наблюдений, определяя указанные в ней параметры.
3. Вычертить по данным опыта теоретическую, фактическую и пьезометрическую линии. Рекомендуемый по оси Y масштаб 1:10 по оси X на усмотрение студента.

Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
2. Назвать три вида уравнения Бернулли (их отличия).
3. Назовите геометрический и энергетический смысл каждого члена уравнения Бернулли.
4. Сделайте графическое изображение каждого члена уравнения Бернулли.
5. Написать уравнение пьезометрического и гидравлического уклонов, объяснить их физическую сущность.
6. На примере ступенчатого трубопровода лабораторной установки дать объяснение уравнению неразрывности потока жидкости.

Журнал наблюдений

№ сечения	Величина координаты, см	Показания пьезометра, см	Показания трубки Пито, см	Скоростной напор, см	Действительный скоростной напор, см	Скорость, см/с	Живое сечение, см ²	Расход воды, см ³ /с	Потери напора, см	Гидравлический уклон
	z	$p/\rho g + z$	$\frac{\alpha \cdot v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z$	H	h^I	$v = \sqrt{2gh^I}$	ω	$Q = v \cdot \omega$	h_w	J
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1-1										
2-2										
3-3										

Примечание: Поправочный коэффициент трубки Пито - $K_1=2,24$; $K_2=1,0$; $K_3=1,37$

Номера задач расчетно-графических работ №1, 2

		Последняя цифра зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Предпоследняя цифра зачетной книжки	0	9 38	8 39	10 31	1 32	2 37	7 36	6 33	5 34	4 35	3 40
	1	17 36	19 47	18 37	11 39	20 44	12 45	1 40	3 32	2 34	4 44
	2	15 45	17 43	20 48	18 41	12 42	23 37	14 38	16 31	22 39	13 47
	3	6 43	22 40	24 36	28 33	23 32	25 35	23 39	27 37	26 31	29 46
	4	12 44	11 42	13 45	14 49	20 41	15 46	19 47	18 50	17 43	16 48
	5	27 35	25 33	28 39	22 31	30 38	26 36	21 34	23 40	29 37	22 32
	6	5 48	1 41	4 44	2 46	6 43	3 41	8 50	9 45	1 47	7 42
	7	2 46	10 47	1 42	4 45	3 50	5 43	10 41	6 44	8 49	9 50
	8	18 33	20 31	14 32	15 37	13 39	16 34	5 43	12 35	11 36	18 38
	9	7 34	6 35	2 40	10 32	7 33	6 38	3 37	1 36	9 39	8 35

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РГР РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

Раздел 1. Приборы для измерения давления

(данные для решения задач 1-10 приведены в табл. 1)

Задача 1

Определить приведенную пьезометрическую высоту поднятия воды h_x в закрытом пьезометре (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке A), если показание открытого пьезометра h , расстояние от точки B до свободной поверхности жидкости в резервуаре h_1 , а точка A расположена выше точки B на величину h_2 (рис. 1.1). Атмосферное давление $p_{атм} = 98,1$ кПа, удельный вес воды $\gamma_в = 9,81$ кН/м³.

Задача 2

Закрытый резервуар с водой снабжен открытым и закрытым пьезометрами (рис. 1.2). Определить приведенную пьезометрическую высоту поднятия воды h_x в закрытом пьезометре (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке A), если показание открытого пьезометра h , уровень воды в открытом пьезометре выше уровня воды в сосуде на величину h_1 , а точка A расположена выше точки B на величину h_2 . Атмосферное давление $p_{атм} = 98,1$ кПа, удельный вес воды $\gamma_в = 9,81$ кН/м³.

Задача 3

Определить абсолютное гидростатическое давление в точке A закрытого резервуара с водой (рис. 1.3), если высота столба ртути в трубке дифманометра h , а линия раздела между ртутью и водой расположена ниже точки B на величину h_1 , точка B - выше точки A на величину h_2 . Атмосферное давление $p_{атм} = 98,1$ кПа, удельный вес воды $\gamma_в = 9,81$ кН/м³, удельный вес ртути $\gamma_р = 133,4$ кН/м³.

Задача 4

Закрытый резервуар снабжен дифманометром, установленным в точке B , и закрытым пьезометром (рис. 1.4). Определить приведенную пьезометрическую высоту поднятия воды h_x в закрытом пьезометре (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке A), если высота столба ртути в трубке дифманометра h , а точка A расположена на глубине h_1 от свободной поверхности. Атмосферное давление $p_{атм} = 98,1$ кПа, удельный вес воды $\gamma_в = 9,81$ кН/м³, удельный вес ртути $\gamma_р = 133,4$ кН/м³.

Задача 5

Определить высоту подъема жидкости в пьезометре h_x , если высота столба ртути в трубке дифманометра h_1 , а точка A расположена на глубине h_2 от свободной поверхности (рис. 1.5). Атмосферное давление $p_{атм} = 98,1$ кПа, удельный вес воды $\gamma_e = 9,81$ кН/м³.

Задача 6

К двум резервуарам A и B , заполненным водой, присоединен дифференциальный ртутный манометр (рис. 1.6). Составить уравнение равновесия относительно плоскости равного давления и определить разность давлений в резервуарах A и B , если расстояния от оси резервуаров до мениска ртути равны h_1 и h_2 . Удельный вес воды $\gamma_e = 9,81$ кН/м³, удельный вес ртути $\gamma_p = 133,4$ кН/м³.

Задача 7

Определить разность показаний ртутного дифманометра h_x , составив уравнение равновесия относительно плоскости равного давления. Дифманометр подключен к двум закрытым резервуарам с водой (рис. 1.7), давление в резервуаре A равно p_A , а в резервуаре B - p_B . Удельный вес воды $\gamma_e = 9,81$ кН/м³, удельный вес ртути $\gamma_p = 133,4$ кН/м³.

Задача 8

Резервуары A и B частично заполнены водой разной плотности и газом, причем к резервуару A подключен баллон с газом (рис. 1.8). Какое необходимо создать давление p_0 в баллоне, чтобы получить давление p_B на свободной поверхности в резервуаре B , если высота столба ртути в трубке дифманометра h , а расстояния от оси резервуаров до мениска ртути равны h_1 и h_2 ? Удельный вес ртути $\gamma_p = 133,4$ кН/м³, плотность воды в резервуаре A — $\rho_e = 998$ кг/м³, в резервуаре B — $\rho_e = 1029$ кг/м³.

Задача 9

К двум резервуарам A и B , заполненным нефтью, присоединен дифференциальный ртутный манометр (рис. 1.9). Определить разность давлений в точках A и B , составив уравнение равновесия относительно плоскости равного давления. Разность показаний манометра $h_1 - h_2 = h$. Удельный вес ртути $\gamma_p = 133,4$ кН/м³, нефти - $\gamma_n = 8,83$ кН/м³.

Задача 10

Резервуары A и B частично заполнены водой и газом (рис. 1.10). Определить избыточное давление газа на поверхности воды закрытого резервуара B , если избыточное давление на поверхности воды в закрытом резервуаре A равно p_A разность уровней ртути в двухколенном дифманометре h , мениск

ртути в левой трубке манометра ниже уровня воды на величину h_1 , в правой трубке - $h_3 = 0,25h_1$, высота подъема ртути в правой трубке манометра h_2 . Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено этиловым спиртом. Удельный вес ртути $\gamma_p=133,4 \text{ кН/м}^3$, воды $\gamma_w=9,81 \text{ кН/м}^3$, этилового спирта $\gamma_c=7,74 \text{ кН/м}^3$.

Таблица 1 - Исходные данные для решения задач 1-10

Исходные данные	Номера задач									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , м	4	2,8	0,5	0,5	—	—	—	0,28	0,25	0,20
h_1 , м	2	1,8	0,2	4	0,4	0,8	—	0,6	—	0,7
h_2 , м	1	0,5	0,35	—	6,8	0,6	—	0,22	—	0,4
p_A , кПа	—	—	—	—	—	—	190	—	—	85
p_B , кПа	—	—	—	—	—	—	160	110	—	—

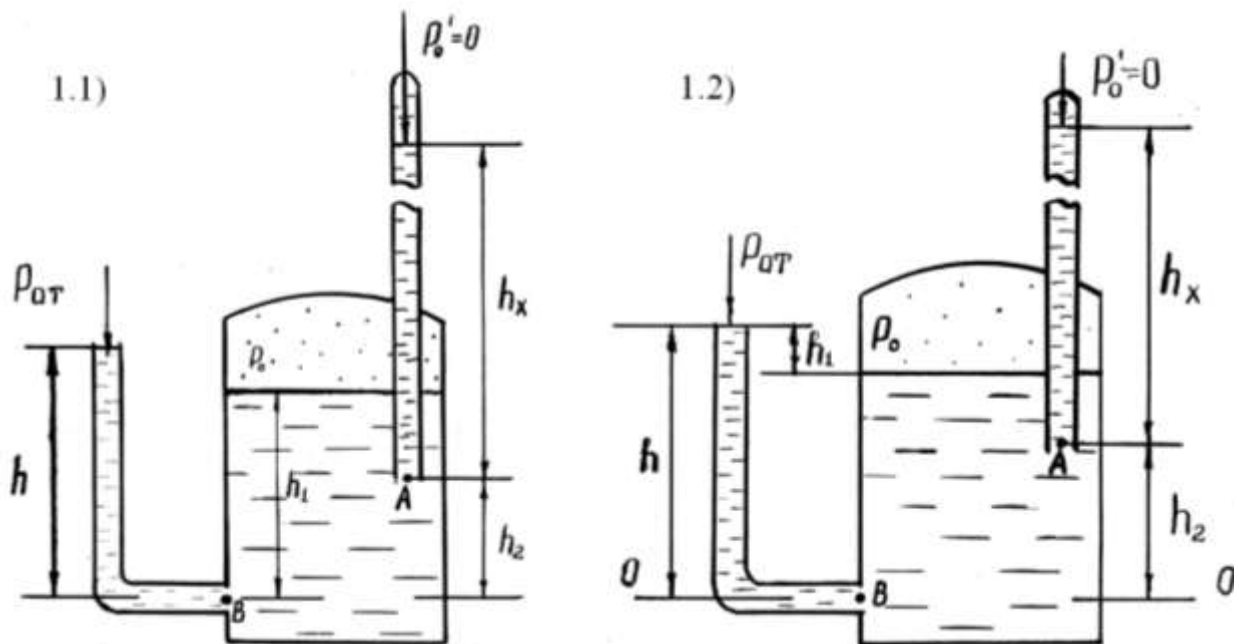


Рисунок 1 – Приборы для измерения давления

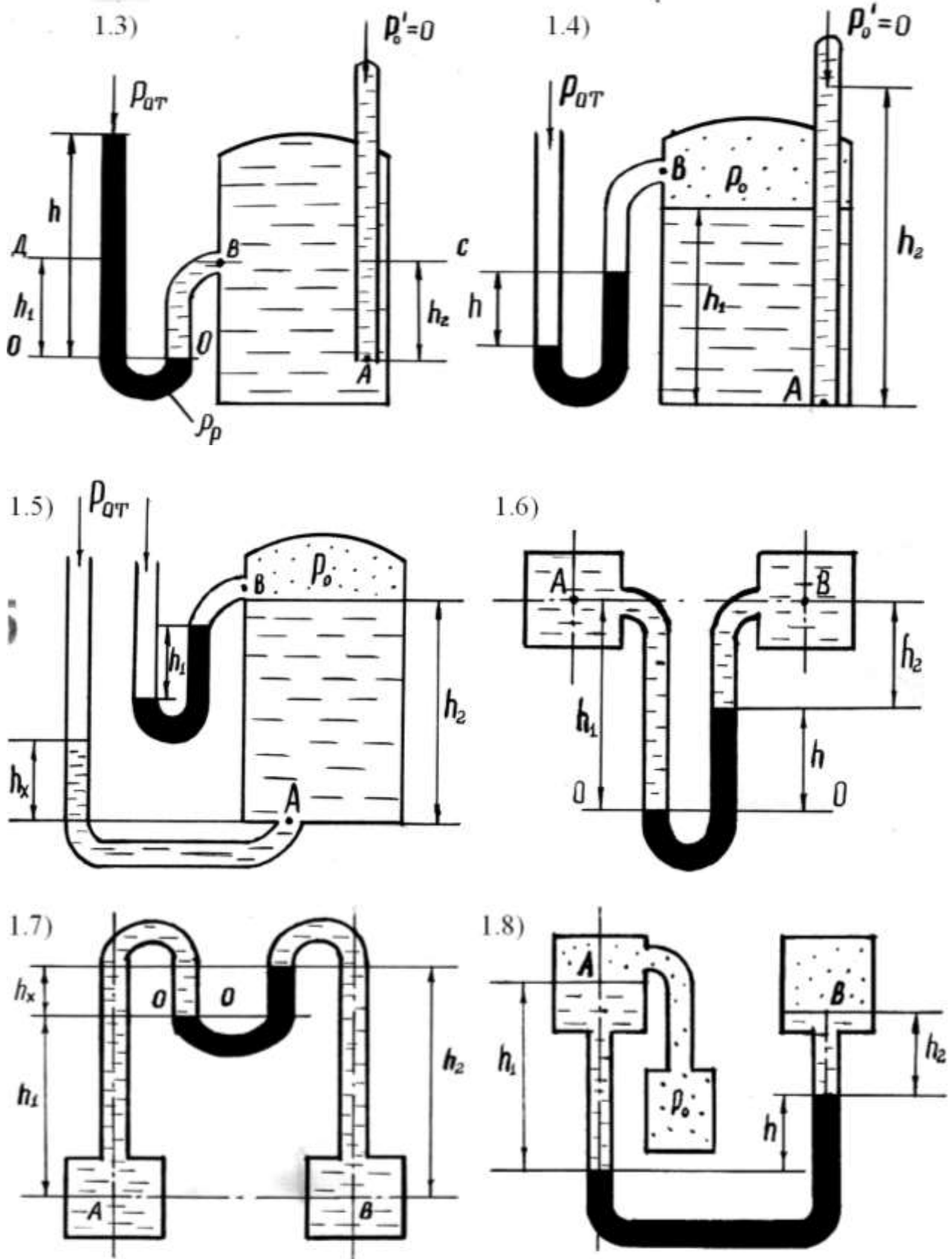


Рисунок 1 – Приборы для измерения давления (продолжение)

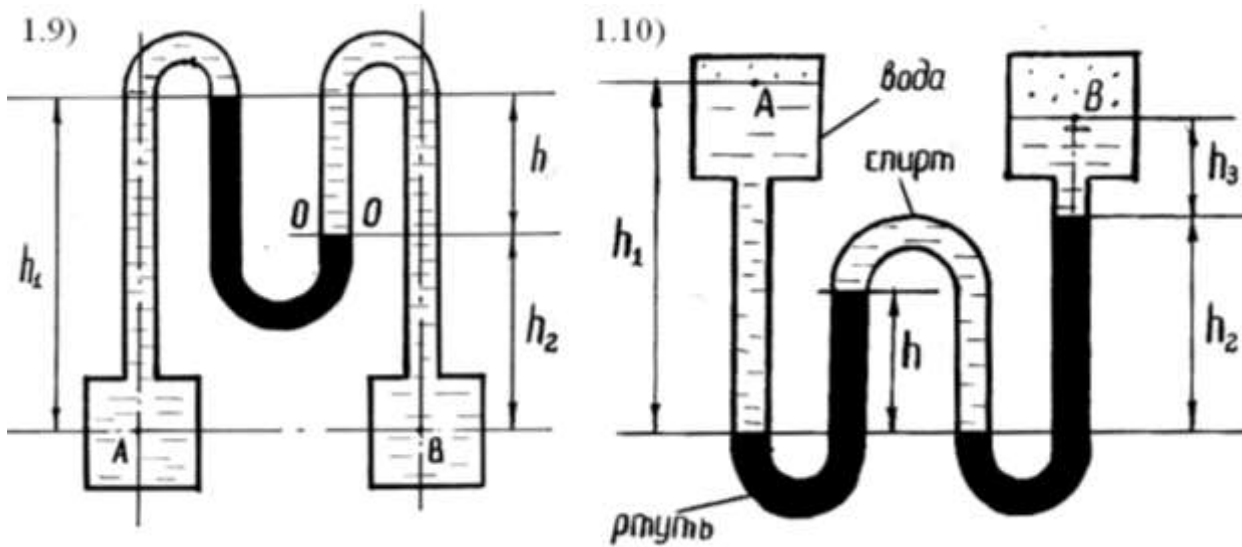


Рисунок 1 – Приборы для измерения давления (продолжение)

Методика решения

Раздел 1: Приборы для измерения давления (задачи 1...10)

Давление в жидкости. Под действием поверхностных и массовых сил в жидкости возникает напряжение (аналогично твердому телу). Нормальное напряжение, т.е. напряжение силы давления (p), называется гидромеханическим (в случае покоя – гидростатическим) давлением, или просто давлением, и обозначается буквой p . Таким образом:

$p = \frac{P}{\omega}$	(1)
------------------------	-----

где ω – поверхность, на которую действует сила P .

За единицу давления в системе СИ принят паскаль – давление, вызываемое равномерно нормально распределенной силой в 1 Н и действующей на площадке в 1 м². Наряду с этой единицей давления применяют укрупненные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа};$$

$$1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Величина атмосферного давления, принимаемая в технических расчетах (техническое атмосферное давление, соответствующее высоте столба ртути $h = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$) составляет в разных системах измерения:

$$1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Физическая (барометрическая) величина атмосферного давления, соответствующая высоте столба ртути $h = 760 \text{ мм рт. ст.}$ равна 101325 Па.

Исходным уравнением для решения задач 1...10 является основное уравнение гидростатики

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

где p – абсолютное давление в жидкости; p_0 – абсолютное давление на поверхности жидкости; $\rho g h$ – гидростатическое давление от столба жидкости высотой h .

Абсолютное давление на поверхности жидкости, определяется как (при действии избыточного давления):

$$p_0 = p_m + p_a, \quad (3)$$

где p_m – манометрическое (избыточное) давление; p_a – атмосферное давление.

Избыточное давление представляет собой

$$p_{изб} = p_{абс} - p_a. \quad (4)$$

Избыточное давление на глубине h , при действии на поверхности жидкости манометрического давления, определяется как

$$p_{изб} = p_m + \rho \cdot g \cdot h. \quad (5)$$

Если абсолютное давление $p_{абс}$ в жидкости или газе меньше атмосферного ($p_{абс} < p_a$), то имеет место разрежение или вакуум. За величину давления разрежения или вакуумметрического давления принимается

$$p_{раз} = p_{вак} = p_a - p_{абс}. \quad (6)$$

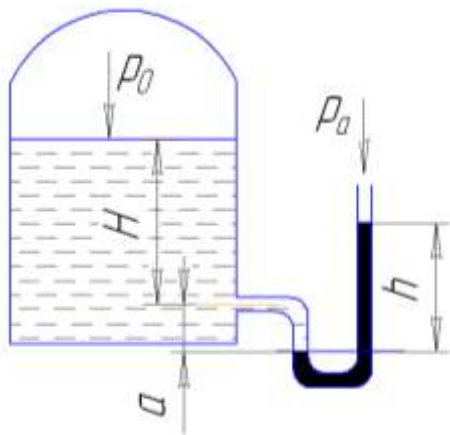


Рисунок 1.11 - Определение давления ртутным манометром

Пример: Определить давление p_0 на

свободной поверхности жидкости в закрытом сосуде (рис. 1.11), если подключенный на глубине H ртутный манометр показывает разность уровней ртути h . Величина a известна, $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$. Для решения этой и других задач рекомендуется следующая методика:

1. С учетом размещения жидкостного манометра и высоты h необходимо определится с размещением плоскости равного давления, т.е. такой горизонтальной плоскости

на которой давления равны. Обычно ее располагают на стыке жидкостей, и для данного примера она ограничивается линией $N-N$ на стыке вода-ртуть.

2. Пользуясь основным уравнением гидростатики (2) напишем уравнение равновесия. Из анализа рис. 1 следует, что давление в жидкостном манометре на линии $N-N$ со стороны сосуда $p_0 + \rho_v g (H+a)$, с правой стороны (в самом жидкостном манометре) - $p_a + \rho_{рт} g h$, так как $p_0 = p_m + p_a$ (уравнение (3)), а в открытой трубке $p_m = 0$, то $p_0 = p_a$. Или

$$p_0 + \rho_\varepsilon \cdot g \cdot (H + a) = p_a + \rho_{pm} \cdot g \cdot h.$$

Отсюда искомое значение p_0 :

$$p_0 = p_a + \rho_{pm} \cdot g \cdot h - \rho_\varepsilon \cdot g \cdot (H + a).$$

Раздел 2. Гидравлические машины

(данные для решения задач 11-20 приведены в табл. 2)

Задача 11

Определить сжимающее усилие P_1 гидравлического пресса с диаметрами поршней D и d (рис. 2.1), используемого для получения виноградного сока, если к малому поршню приложена сила P .

Задача 12

При ремонте сельскохозяйственных машин и оборудования широко используется гидравлический домкрат, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.2. Определить усилие P , которое необходимо приложить к малому поршню, чтобы поднять груз весом G . Диаметры поршней D и d .

Задача 13

Два вертикальных цилиндра, имеющих диаметры D и d наполнены жидкостью и сообщаются между собой (рис. 2.3). В цилиндры заключены поршни, из которых больший при помощи блока может перемещаться по вертикали, а в пространстве над малым поршнем находится воздух при атмосферном давлении. Определить, на сколько изменится давление воздуха над малым поршнем, если большой будет перемещаться вверх с силой P (трением пренебречь).

Задача 14

Система, состоящая из двух вертикальных цилиндров, соединенных между собой, заполнена жидкостью (рис. 2.4). В цилиндры заключены поршни диаметрами D и d . К большему из них приложена вертикально вниз сила P , а в пространстве над малым поршнем — воздух при атмосферном давлении. Определить изменение давления воздуха над малым поршнем (трением пренебречь).

Задача 15

Два сообщающихся цилиндра наполнены жидкостью (рис. 2.5). В меньший цилиндр диаметром d заключен поршень весом G . На какой высоте H установится уровень жидкости в большем цилиндре, когда вся система придет в равновесие (трением пренебречь)? Удельный вес жидкости $\gamma = 9,81$ кН/м³.

Задача 16

Определить давление пара p в цилиндре поршневого парового насоса (рис. 2.6), необходимое для подачи воды на высоту $H = 60$ м, если диаметры цилиндров D и d .

Задача 17

Для повышения гидростатического давления применяется мультипликатор - повыситель давления (рис. 2.7), давление на входе которого $p_1 = 20$ кПа, а диаметры поршней D и d . Определить давление жидкости p_2 на выходе из мультипликатора.

Задача 18

Для накопления энергии используется грузовой гидравлический аккумулятор (рис. 2.8), вес плунжера которого равен G , диаметр - D . Определить запасаемую аккумулятором энергию при ходе плунжера $H = 6$ м.

Задача 19

Цилиндрический резервуар с водой диаметром D и весом G висит на плунжере диаметром d (рис. 2.9). Сосуд заполнен водой на высоту $a = 0,5$ м. К поршню через блоки подвешен груз, удерживающий систему в равновесии. Определить вакуум в сосуде, обеспечивающий равновесие цилиндра. Трением в системе пренебречь.

Задача 20

Плунжер диаметром d и весом G висит на цилиндрическом сосуде, заполненном воздухом (рис. 2.10). Определить вакуум в сосуде, обеспечивающий равновесие плунжера. Трением в системе пренебречь.

Таблица 2 - Исходные данные для решения задач 11 - 20

Исходные данные	Номера задач									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D , мм	340	250	300	500	—	300	400	300	600	—
d , мм	15	25	200	250	200	150	40	—	400	150
P , кН	0,196	—	0,80	1,0	—	—	—	—	—	—
G , кН	—	19,6	—	—	0,10	—	—	196,2	0,196	0,10

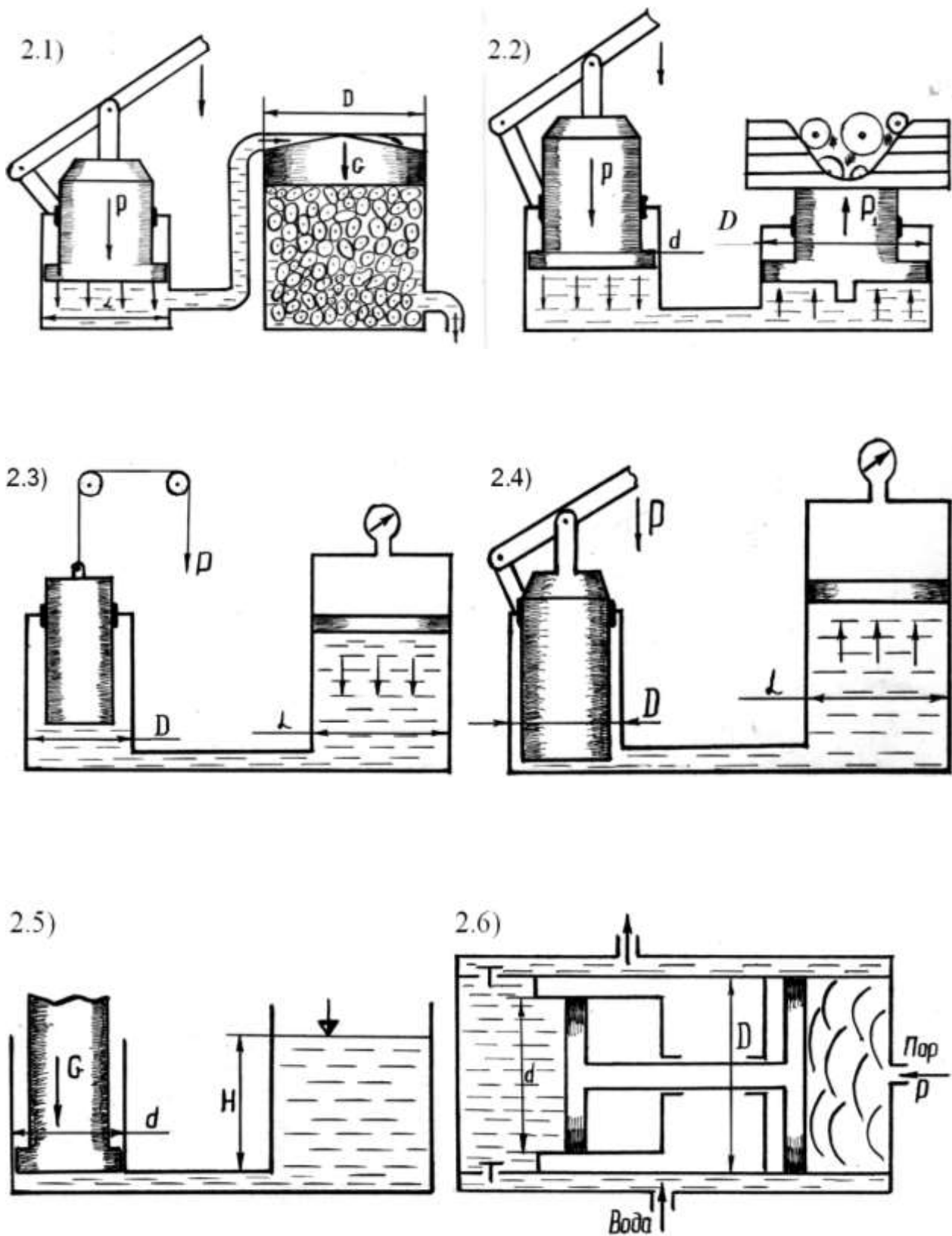


Рисунок 2 – Гидравлические машины

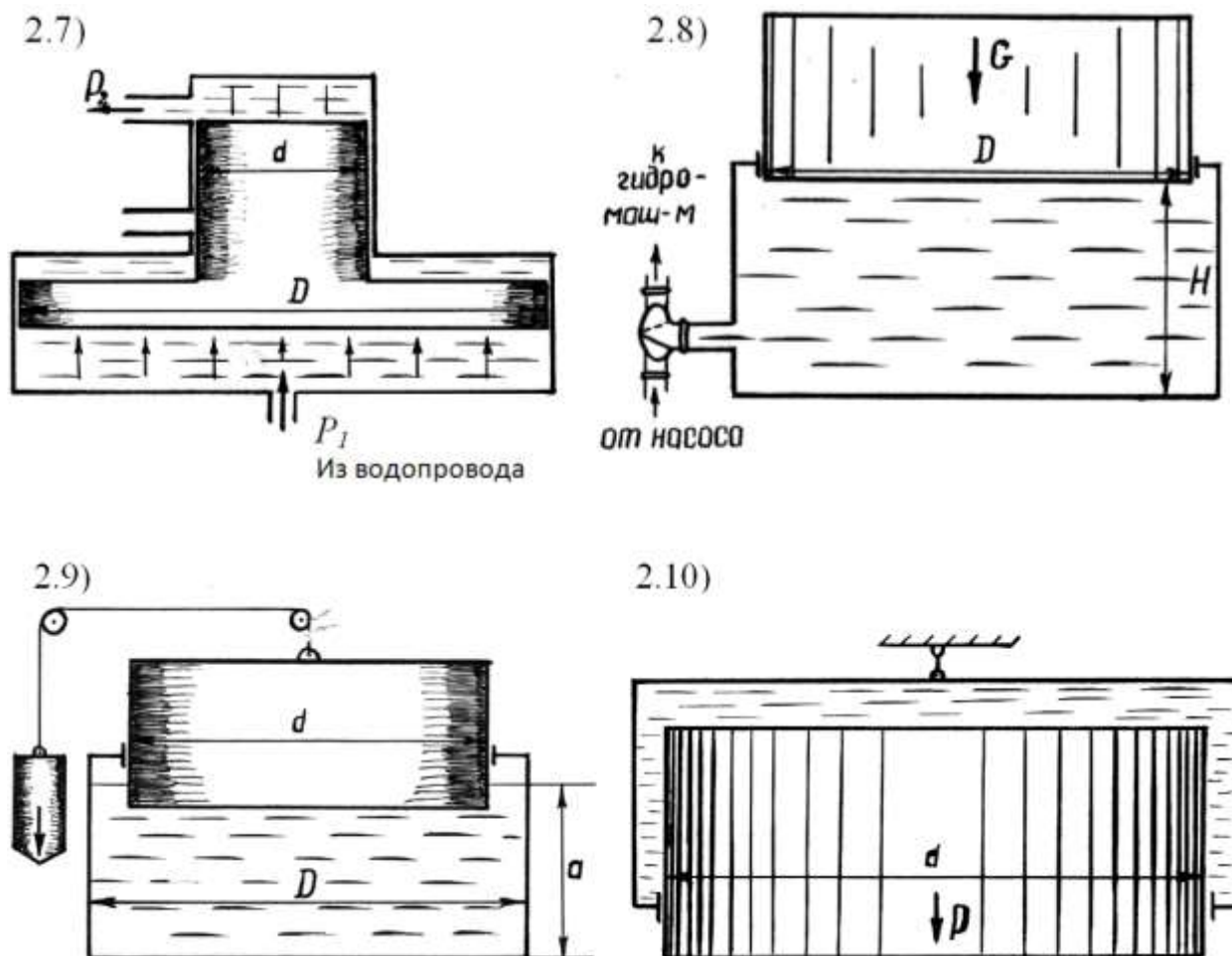


Рисунок 2 – Гидравлические машины
(продолжение)

Методика решения

Раздел 2: Гидростатические машины (задачи 11...20)

Решение задач 11...17 основано на законе Паскаля. Из уравнения (2) следует, что в любой точке жидкости (на любой глубине h) гидростатическое давление p зависит от величины внешнего давления p_0 на свободной поверхности. Причем увеличение внешнего давления вызывает точно такое же изменение гидростатического давления в данной точке. Таким образом, жидкость обладает свойством передавать внешнее давление всем расположенным внутри её частицам жидкости без изменения. В этом и заключается закон Паскаля. На этом свойстве жидкости основана работа гидравлических машин, гидропневмотранспорта, гидродинамических передач, объемного гидропривода и т.д.

На рисунке 2.11 изображено два цилиндра, в которых размещены поршни разного диаметра, полость цилиндров заполнена жидкостью (масло или др.). Под действием силы P_1 под поршнем 1 образуется давление p_1 ,

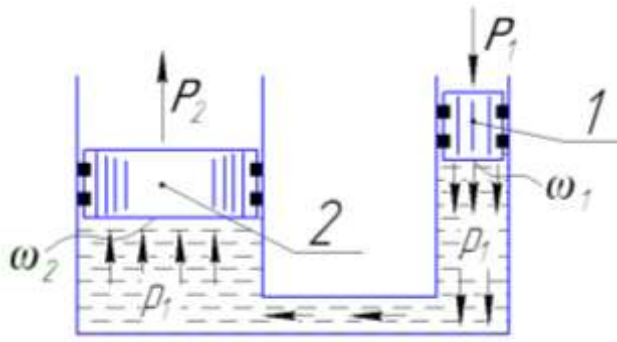


Рисунок 2.11 - Схема к закону Паскаля

$p_1 = P_1 / \omega$ (см. уравнение (1)). Это давление передается по закону Паскаля под поршень 2. При этом сила P_2 (подъемная, прессующая и т.д. по условиям задач) составляет

$$P_2 = p_1 \cdot \omega_1 = \omega_2 \cdot \frac{P_1}{\omega_1}$$

или $P_2 = P_1 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1}$, при $\omega_2 = \omega_1 \rightarrow$

$P_2 = P_1$, т.е. величина силы P_2 зависит

от соотношения $\frac{\omega_2}{\omega_1}$.

Задача 18 основана на зависимости потенциальной энергии относительно высоты его положения

$$\boxed{\mathcal{E}_п = m \cdot g \cdot H}$$

Задачи 19, 20 решаются на основе баланса сил, действующих при указанных в задачах условиях. Например, в задаче 19 баланс сил выразится

$$G + p_0 \cdot \omega_1 = p_a \cdot \omega_2 \text{ или } G = p_0 \cdot \omega_1 - p_a \cdot \omega_2 \text{ при } \omega_1 = \omega_2 = \omega$$

$$\frac{G}{\omega} = p_a - p_0, \text{ где } p_a - p_0 = p_{\text{вак}}$$

Раздел 3. Давление на плоскую стенку

(данные для решения задач 21—30 приведены в табл. 3)

Задача 21

Шлюзовое окно закрыто щитом треугольной формы, ширина которого a , высота b , (рис. 3.1). За щитом воды нет, а глубина воды перед ним h_1 при этом горизонт воды перед щитом совпадает с его вершиной. Определить силу абсолютного гидростатического давления и положение центра давления на щит. Удельный вес воды $\gamma_в=9,81$ кН/м³.

Задача 22

Плоский квадратный щит установлен с углом наклона к горизонту α (рис. 3.2). Глубина воды перед щитом — h_1 , за щитом — h_2 , ширина щита — b . Определить силу избыточного гидростатического давления и центр давления жидкости на щит. Удельный вес воды $\gamma_в=9,81$ кН/м³.

Задача 23

Для сброса излишков воды используется донный водовыпуск, прямоугольный затвор которого имеет размеры a и b (рис. 3.3). Глубина воды от ее свободной поверхности до нижней кромки затвора h_1 , угол наклона затвора α , плотность воды $\rho=1000$ кг/м³. Определить силу абсолютного гидростатического давления жидкости на затвор водовыпуска.

Задача 24

Затвор донного водовыпуска треугольной формы имеет ширину a и высоту b (рис. 3.4). Угол наклона затвора α , нижняя кромка затвора находится в воде на глубине h_1 , плотность воды $\rho=1000$ кг/м³. Определить силу абсолютного гидростатического давления жидкости и положение центра давления на затвор.

Задача 25

Цистерна диаметром D наполовину заполнена керосином (рис. 3.5). Определить силу избыточного гидростатического давления P , которую необходимо приложить для открытия крышки A цистерны, а также найти координату точки приложения этой силы. Плотность керосина $\rho_к=830$ кг/м³.

Задача 26

Отверстие шлюза-регулятора (рис. 3.6) перекрыто плоским металлическим затвором с размерами: высота a , ширина b и толщина $c = 0,25b$. Глубина воды слева от затвора h_1 , а справа - h_2 . Определить начальную силу тяги, необходимую для открытия затвора, равнодействующую силы давления воды на затвор и положение центра ее приложения. Коэффициент трения скольже-

ния $f = 0,4$, удельный вес материала, из которого изготовлен затвор $\gamma_3 = 11$ кН/м³, удельный вес воды $\gamma_6 = 9,81$ кН/м³.

Задача 27

Прямоугольный щит перекрывает отверстие в теле плотины (рис. 3.7). Щит установлен с углом наклона α , имеет высоту a , ширину b и толщину $c = 0,25 b$. Нижняя кромка щита находится в воде на глубине h_1 , масса щита $m = 2$ т. Определить силу тяги T , которая необходима для поднятия щита вверх, принимая коэффициент трения скольжения его направляющих $f = 0,3$. Удельный вес воды $\gamma_6 = 9,81$ кН/м³.

Задача 28

Плоский прямоугольный щит перекрывает выходное отверстие резервуара (рис. 3.8). Щит имеет размеры $a \times b$, вес $G = 26$ кН. Глубина воды перед щитом от свободной поверхности воды до нижней его кромки h_1 , за щитом — h_2 . Определить начальную силу тяги T троса, необходимую для открывания щита. Удельный вес воды $\gamma_6 = 9,81$ кН/м³. Трением в шарнирах пренебречь.

Задача 29

Для создания подпора в реке применяется плотина Шануана (рис. 3.9), представляющая собой плоский прямоугольный щит, который может вращаться вокруг горизонтальной оси O . Угол наклона щита α , глубина воды перед щитом h_1 , а за щитом — h_2 . Определить положение оси вращения щита (x_0), при котором в случае увеличения верхнего уровня воды выше плотины щит опрокидывался бы под ее давлением.

Задача 30

Ирригационный канал перегораживается плоским квадратным наклонным щитом шириной a (рис. 3.10). Угол наклона щита α , глубина воды перед щитом h_1 , а за ним — h_2 , вес щита $G = 20$ кН. Определить, пренебрегая трением в шарнире, начальную силу тяги T , которую необходимо приложить для подъема щита.

Таблица 3 - Исходные данные для решения задач 21-30

Исходные данные	Номера задач									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
h_1 , м	4	6	10	9,5	—	3	10	5	2	2
h_2 , м	—	1,5	—	—	—	1,5	—	2	0,4	0,8
a , м	1,5	—	1,2	1,2	—	4	2	3	—	4
b , м	4	4	2	1,5	—	2	1,6	4	—	—
α°	—	45	60	45	—	—	70	—	60	60
D , м	—	—	—	—	1,2	—	—	—	—	—

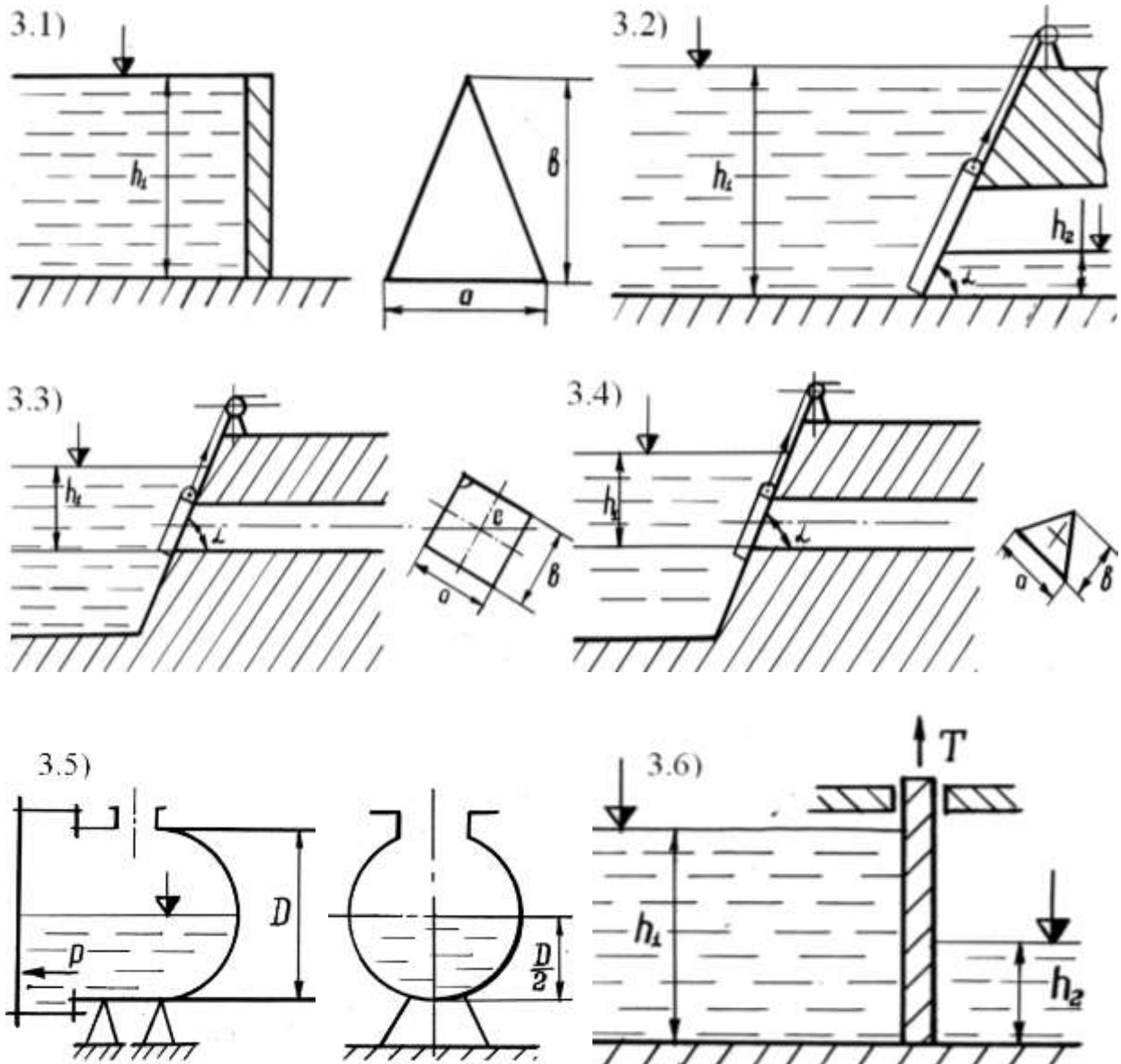


Рисунок 3 – Давление на плоскую стенку

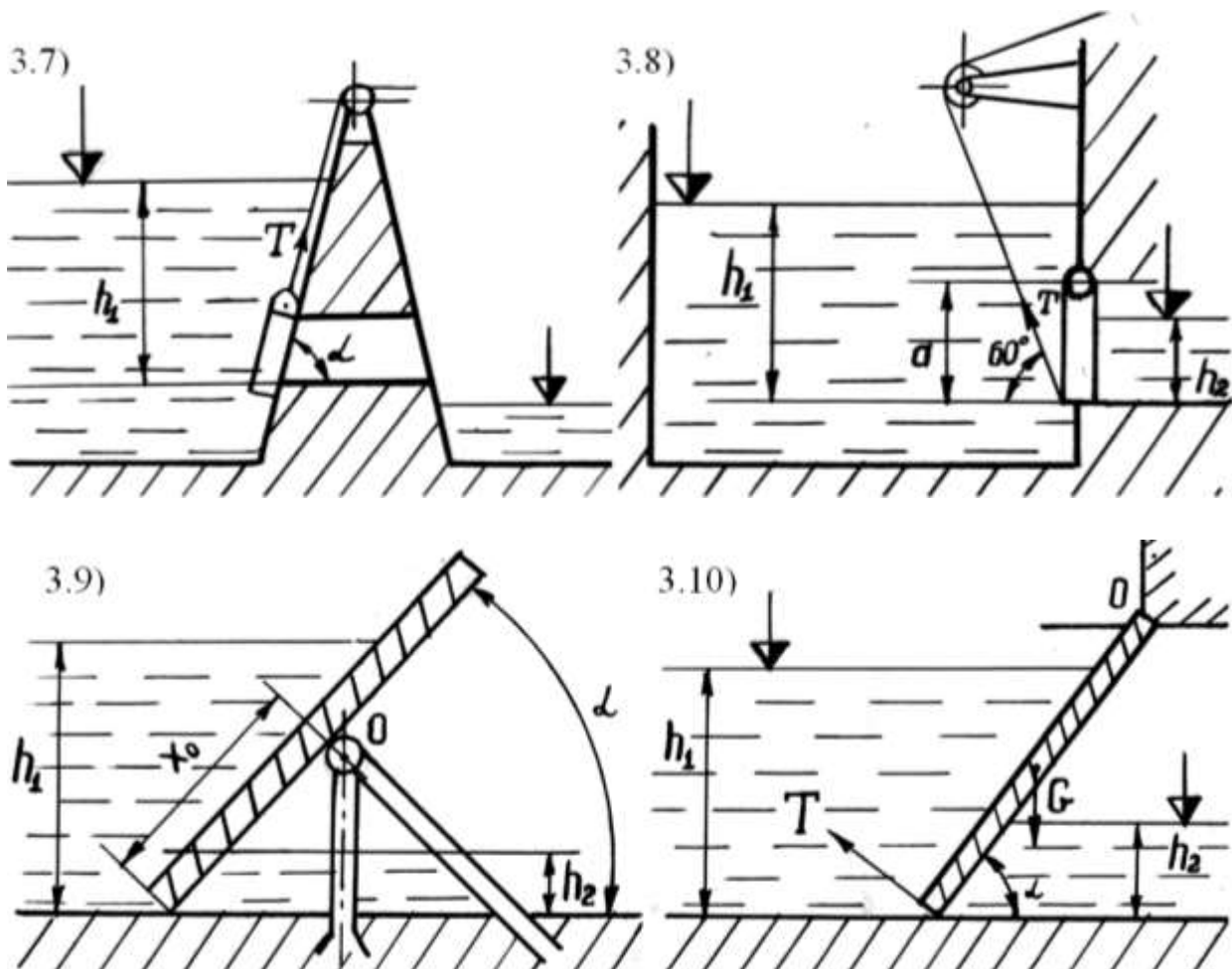


Рисунок 3 – Давление на плоскую стенку
(продолжение)

Методика решения

Раздел 3: Давление на плоскую стенку (задачи 21...30)

Для определения силы гидростатического давления на щит применяется известная формула

$$P = \rho \cdot g \cdot h_{ц.т.} \cdot \omega, \quad (5)$$

где $h_{ц.т.}$ - высота погружения центра тяжести щита; ω – площадь щита.

Если щит наклонен под углом α

$$P = \rho \cdot g \cdot \frac{h_{ц.т.}}{\sin \alpha} \cdot \omega, \quad (6)$$

Пример: щит прямоугольный вертикальный со сторонами h, b . Так как $h_{ц.т.} = \frac{h}{2}$, а $\omega = b \cdot h$, то

$$P = \rho \cdot g \cdot \frac{h^2}{2} \cdot b.$$

Этот же щит наклонен под углом α :

$$P = \rho \cdot g \cdot \frac{h^2}{2 \cdot \sin \alpha} \cdot b.$$

Этот же щит действие жидкости с двух сторон с высотами h_1 и h_2 :

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot \frac{h_1^2}{2} \cdot b; P_2 = \rho \cdot g \cdot \frac{h_2^2}{2} \cdot b;$$

результатирующая сила $P=P_1+P_2$. Аналогично если щит наклонен под углом α :

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot \frac{h_1^2}{2 \cdot \sin \alpha} \cdot b; P_2 = \rho \cdot g \cdot \frac{h_2^2}{2 \cdot \sin \alpha} \cdot b; P=P_1+P_2.$$

Определение координаты точки приложения силы гидростатического давления производится по формуле

$$h_{ц.д.} = \frac{I_0}{h_{ц.м.} \cdot \omega} + h_{ц.м.}, \quad (7)$$

где $h_{ц.д.}$ – высота погружения точки приложения силы гидростатического давления относительно свободной поверхности; I_0 – момент инерции смоченной поверхности относительно оси, проходящей через центр тяжести щита.

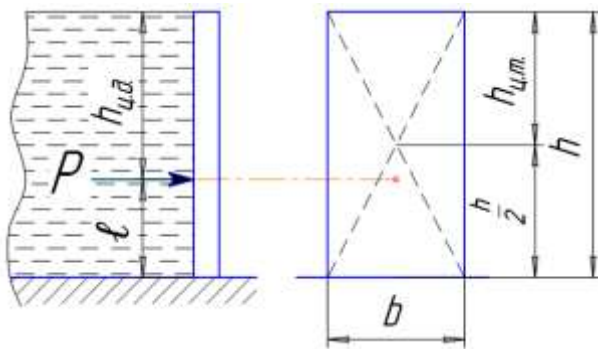


Рисунок 3.11 - К определению высоты центра давления

Пример: определить $h_{ц.д.}$ для прямоугольного щита со сторонами h , b (рисунок 3.11). Воспользуемся формулой (7), где I_0 находится по справочным данным. Для данного примера $I_0 = \frac{bh^3}{12}$, $h_{ц.м.} = \frac{h}{2}$, $\omega = bh$, тогда подставляя значение в формулу (7): $h_{ц.д.} = \frac{2}{3}h$, где высота $h_{ц.д.}$ рассматривается от уровня жидкости.

При решении задач встречается необходимость определения точки приложения силы путем сопоставления суммы моментов относительно основания щита. В этом случае воспользуемся координатой l :

$$l = \frac{1}{3}h \quad (8)$$

В задачах 26, 27, 28, 30 при составлении суммы моментов относительно оси вращения щита необходимо учитывать действие нормальной составляющей силы тяжести G' (см. рисунок 4.11), определяемой из параллелограмма сил:

$$G' = G \cdot \cos \alpha,$$

при этом момент G' составит $G' \cdot l_{ц.м.}$.

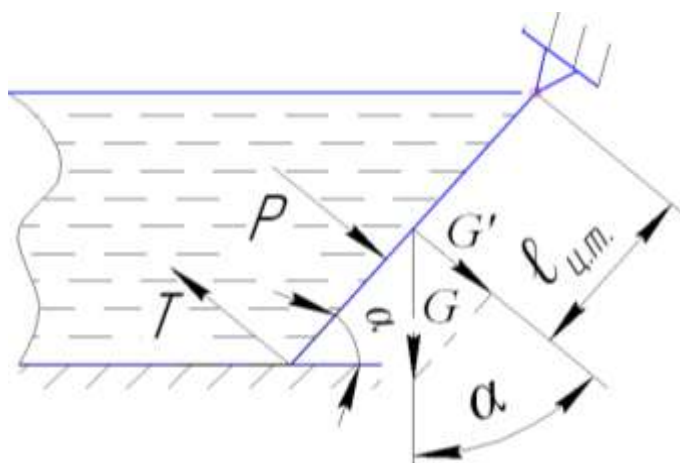


Рисунок 4.11 - Определение момента силы G'

В задаче 29 положение x_0 будет соответствовать точке приложения силы давления, т.е. $x_0 = h_{ц.д.}$, а для её определения необходимо составить сумму моментов сил

$$P_1 \cdot l_1 - P_2 \cdot l_2 = P \cdot x_0,$$

$$x_0 = ?$$

Для определения сил P_1 , P_2 применимы формулы (5), (6) и их преобразования.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА №2

Раздел 4. Длинные трубопроводы. Параллельное и последовательное соединения труб. Сифонный трубопровод. Гидравлический удар (данные для решения задач 31—40 приведены в табл. 4)

Задача 31

От пункта A (рис. 4.1) проложена водопроводная сеть с последовательным и параллельным соединением стальных бывших в эксплуатации трубопроводов, на которой расположены два водоема на разных отметках с постоянной разницей уровней H . Вода подается из одного водоема в другой посредством сифона, выполненного из стального трубопровода диаметром d . От нижнего водоема отходит стальной трубопровод, заканчивающийся задвижкой. На последнем участке последовательного соединения трубопроводов имеется равномерно распределенный путевой объемный расход q .

Требуется:

1. Определить объемный расход в сифоне с углами поворота α и β .
2. Определить распределение объемного расхода воды Q_1 в параллельных ветвях водопровода.
3. Определить потери напора по длине трубопровода на участках последовательного соединения, если объемный расход в конце трубопровода Q_2 .
4. Определить повышение давления Δp в трубопроводе длиной L и диаметром d при внезапном закрытии задвижки.

Задача 32

Из источника A вода подается в разветвленную сеть (рис. 4.2). Магистральный трубопровод имеет последовательные участки длиной L , диаметрами d , $d/2$, $d/3$ и параллельные ветви, имеющие диаметры $d/2$. На одном из участков имеется путевой объемный расход воды q . По ответвлению вода подается в резервуар, который связан посредством сифонного трубопровода с другим резервуаром. Разница уровней в резервуарах H . Сифонный трубопровод выполнен с углами поворота α и β , имеет сетку с обратным клапаном. От нижнего резервуара отходит трубопровод с толщиной стенок e , в котором перед закрытием задвижки имеется давление p_0 . Трубы в сети чугунные.

Требуется:

1. Определить распределение расхода в ветвях трубопровода с объемным расходом Q_1 на параллельных участках.
2. Определить потери напора на последовательных участках трубопровода с объемным расходом Q_2 .

3. Определить, при какой начальной скорости v_0 движения воды в чугунном трубопроводе давление при мгновенном закрытии задвижки достигнет величины p .
4. Определить диаметр сифона.

Задача 33

В тепличном комбинате стальные трубопроводы для подачи питательного раствора (кинематическую вязкость ν принять равной $0,01 \text{ см}^2/\text{с}$) разветвляются на три участка: последовательный с объемным расходом Q_2 , параллельный с объемным расходом Q_1 и участок с объемным расходом Q , в конце которого установлена задвижка (рис. 4.3). Резервуары с питательным раствором сообщаются посредством сифона с углами поворота α и β . Движение в сифоне происходит с разностью напоров — H . Последовательные и параллельные участки трубопроводов имеют длину L , диаметры $d, d/2, d/3, d/4$. На одном из участков имеется путевой объемный расход q .

Требуется:

1. Определить повышение давления Δp в стальном трубопроводе длиной L , с толщиной стенки e и объемным расходом Q .
2. Определить распределение расхода в параллельных ветвях участка.
3. Определить объемный расход в сифоне.
4. Определить потери напора h_1, h_2, h_3 на последовательных участках трубопровода, имеющего объемный расход Q_2 .

Задача 34

Из пункта A (рис. 4.4) вода подается по чугунному трубопроводу в открытые емкости с разницей между верхней и нижней отметками — H . Емкости сообщаются посредством сифона, выполненного из чугунных труб с углами поворота α и β . Трубопровод с объемным расходом Q_2 состоит из последовательных участков каждый длиной L и диаметрами $d, d/2, d/4$. Параллельный участок состоит из двух ветвей каждая длиной L и диаметром $d/2$. От нижней емкости отходит чугунный трубопровод, заканчивающийся задвижкой.

Требуется:

1. Определить потери напора по длине чугунного трубопровода при последовательном соединении.
2. Определить распределение расхода в трубопроводе на участках при параллельном соединении.

3. Определить напряжение σ в стенках толщиной e чугунного трубопровода диаметром d при внезапном его закрытии, если начальное избыточное давление в трубопроводе — p_0 и начальная скорость — v_0 .

4. Определить диаметр сифона при заданном объемном расходе $Q_{сиф}$.

Задача 35

Из нефтехранилища A (рис. 4.5) нефть подается в накопительный резервуар, где поддерживается постоянный уровень. Из резервуара-накопителя нефть поступает в приемный резервуар под напором H при помощи сифонного нефтепровода, причем труба отходит под углом α и имеет острые входные кромки. Сифонный чугунный трубопровод в верхней точке имеет плавный поворот на угол β . От хранилища A по чугунному трубопроводу нефть подводится к двум параллельным ветвям каждая длиной L и диаметром $d/2$. Система последовательно соединенных трубопроводов состоит из двух участков каждый длиной L , диаметрами $d, d/2$. Третий участок, кроме транзитного объемного расхода Q_1 имеет равномерно распределенный путевой объемный расход q .

Требуется:

1. Определить объемный расход в сифоне при заданном диаметре d .
2. Определить повышение давления Δp в чугунном трубопроводе с толщиной стенки e при объемном расходе Q .
3. Определить потери напора по длине нефтепровода на участках последовательного соединения с объемным расходом Q_2 .
4. Определить распределение расхода нефти на параллельных участках нефтепровода, если объемный расход в конце его Q_1 .

Задача 36

Водораспределительная сеть, выполненная из чугунных трубопроводов, состоит из последовательных и параллельных участков, двух резервуаров, сообщающихся при помощи сифона, и отходящего от нижнего резервуара чугунного трубопровода с задвижкой (рис. 4.6). Один из последовательных участков имеет путевой объемный расход q . Горизонты уровней в резервуарах разнятся на величину H . Сифонный трубопровод с углами поворота α и β имеет обратный клапан с сеткой и пропускает объемный расход $Q_{сиф}$.

Требуется:

1. Определить распределение объемного расхода Q_1 в трубопроводах при параллельном соединении.
2. Определить диаметр сифона.

3. Определить потери напора по длине последовательно соединенных участков трубопровода, пропускающего объемный расход Q_2 .
4. Определить начальную скорость v_0 в чугунном трубопроводе с толщиной стенок e , если после внезапного закрытия задвижки давление перед задвижкой будет p , а перед закрытием давление было p_0 .

Задача 37

Два бассейна сообщаются чугунным сифоном с углами поворотов α и β (рис. 4.7). Отметки уровней воды отличаются на величину H . От нижнего бассейна отходит бетонная труба с задвижкой. Магистральные асбестоцементные трубопроводы имеют последовательные и параллельные участки. Объемный расход в трубопроводе с параллельными участками — Q_1 , с последовательным соединением участков — Q_2 . На конечном участке последовательного соединения происходит равномерная путевая раздача q .

Требуется:

1. Определить распределение расхода по параллельным ветвям.
2. Определить потери напора на последовательных участках.
3. Определить повышение давления Δp в трубопроводе диаметром d и длиной L при внезапном закрытии задвижки при пропуске объемного расхода Q .
4. Определить объемный расход в сифоне $Q_{сиф}$, имеющем обратный клапан с сеткой.

Задача 38

Из водосточника A (рис. 4.8) вода подается в накопительный резервуар, где поддерживается постоянный уровень. Из резервуара-накопителя вода поступает в приемный резервуар при помощи стального сифонного водопровода, имеющего углы поворота α и β . Стальной трубопровод диаметром d , отходящий от нижнего резервуара, заканчивается задвижкой. Система последовательно соединенных трубопроводов с длиной L и диаметрами d , $d/2$, $d/3$, $d/4$ пропускает транзитом из источника A объемный расход Q_2 к потребителю. Система трубопроводов с параллельными ветвями заканчивается последовательным участком с равномерно распределенным путевым объемным расходом q .

Требуется:

1. Определить повышение давления Δp в трубопроводе диаметром d , длиной L , имеющем толщину стенок e , при внезапном закрытии задвижки, если объемный расход составляет Q .

2. Определить диаметр сифона, пропускающего объемный расход $Q_{\text{сиф}}$.
3. Определить распределение расхода в трубопроводах с параллельным соединением.
4. Определить потери напора на участках трубопровода при последовательном соединении.

Задача 39

Два хранилища с керосином сообщаются со стальным сифоном, имеющим длину L и диаметр d (рис. 4.9). Отметки уровней керосина в хранилищах отличаются на величину H . От нижнего хранилища отходит стальная труба диаметром d с задвижкой и толщиной стенок e . От пункта A отходят стальные трубопроводы с последовательным и параллельным соединением, имеющие объемные расходы соответственно Q_2 и Q_1 . На втором участке последовательного соединения производится равномерная путевая раздача воды q .

Требуется:

1. Определить объемный расход в сифоне при заданном диаметре.
2. Определить потери напора на участках с последовательным соединением.
3. Определить, при какой начальной скорости u_0 движения керосина в стальном трубопроводе давление при мгновенном закрытии задвижки достигает величины p , если перед закрытием задвижки в трубопроводе — давление p_0 .
4. Определить распределение расхода в параллельных ветвях трубопровода.

Задача 40

Из источника A (рис. 4.10) вода подается по чугунному трубопроводу в водоем, где поддерживается постоянный уровень и который сообщен с другим водоемом посредством сифона. Чугунный сифон имеет диаметр d и углы поворота α и β . От второго водоема отходит чугунный трубопровод диаметром d с толщиной стенки e , в котором перед закрытием задвижки создается давление p_0 . Другой участок системы водоснабжения имеет трубопроводы с параллельным и последовательным соединениями. Путевой объемный расход в конце последовательного участка составляет q .

Требуется:

1. Определить распределение расхода в параллельных ветвях трубопровода.
2. Определить потери напора в последовательно соединенных трубопроводах.
3. Определить объемный расход в сифоне Q .
4. Определить напряжение σ в стенках трубопровода при внезапном закрытии задвижки, если до закрытия вода в нем двигалась со скоростью u_0 .

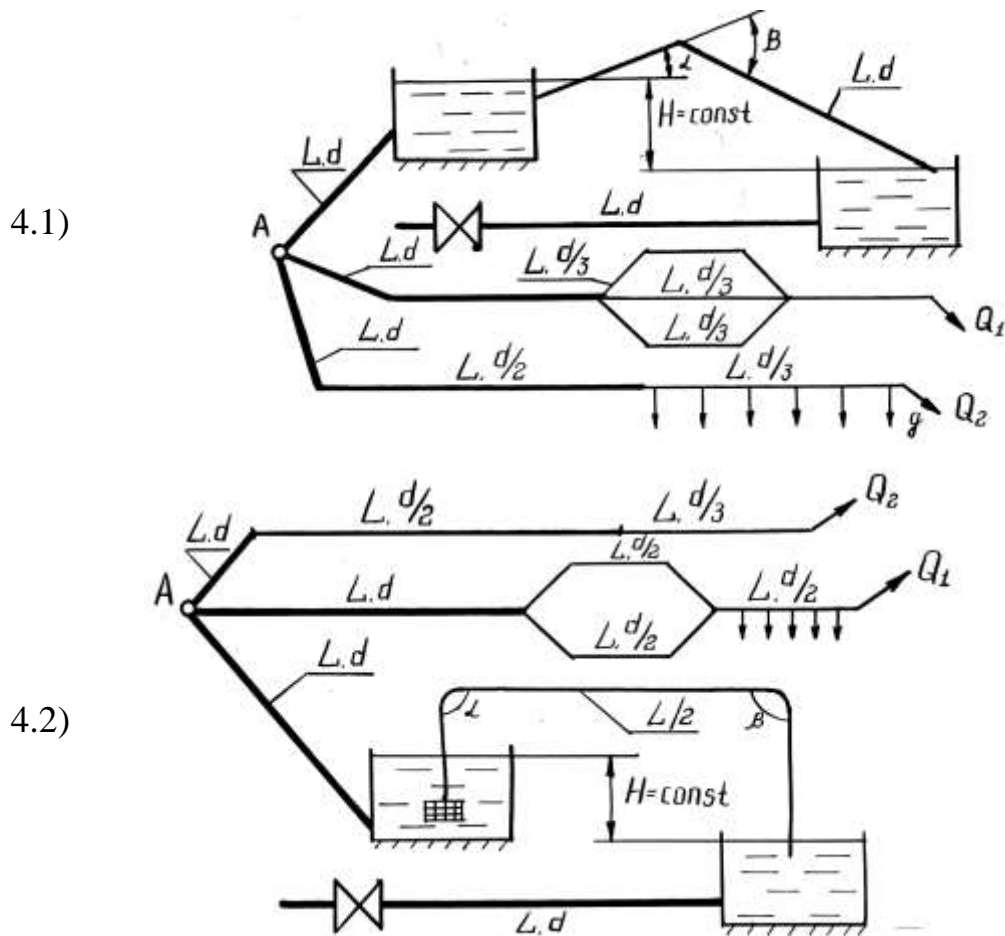


Рисунок 4 – Длинные трубопроводы с параллельным и последовательным соединениями. Сифонный трубопровод, гидравлический удар.

Таблица 4 - Исходные данные для решения задач 31—40

Исходные данные		Номера задач									
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Магистральный трубопровод:	диаметр d , мм	300	300	300	200	250	300	300	300	150	200
	длина L , м	300	400	200	250	250	350	200	400	200	200
Расход воды	$Q_1 \times 10^{-3}$, м ³ /с	29,5	16	10,2	12	17,0	25	30	14	10	3
	$Q_2 \times 10^{-3}$, м ³ /с	5,5	10	6,0	3,0	17,3	20	38	10	8	—
Путевой расход воды на 1 п. м. $q \times 10^{-2}$, л/с		2	3	8	10	3	9	2	4	3	2
Углы поворота сифона	α , град	45	90	60	90	45	90	45	90	45	60
	β , град	60	90	90	90	90	90	90	90	90	60
Разность уровней в резервуарах (напор) H , м		1	2	0,5	1,2	2	1,5	2,5	1	0,8	2,2
Расход сифона $Q_{сиф} \times 10^{-3}$, м ³ /с		—	25	—	30	—	20	—	20	—	—
Расход воды в трубопроводе с задвижкой $Q \times 10^{-3}$, м ³ /с		—	—	120	—	30	—	20	—	—	—
Давление у задвижки:	перед ее закрытием $p_0 \times 10^5$, Па	—	1,2	—	0,6	—	6	—	—	5	0,7
	после ее внезапного закрытия $p \times 10^6$, Па	—	1,9	—	—	—	1,7	—	—	2	—
Толщина стенок трубы e , мм		6	7	4	7	5	12	8	10	6	7
Скорость течения жидкости в трубе до закрытия задвижки u_0 , м/с		1,8	—	—	1,2	—	—	—	—	—	1,5

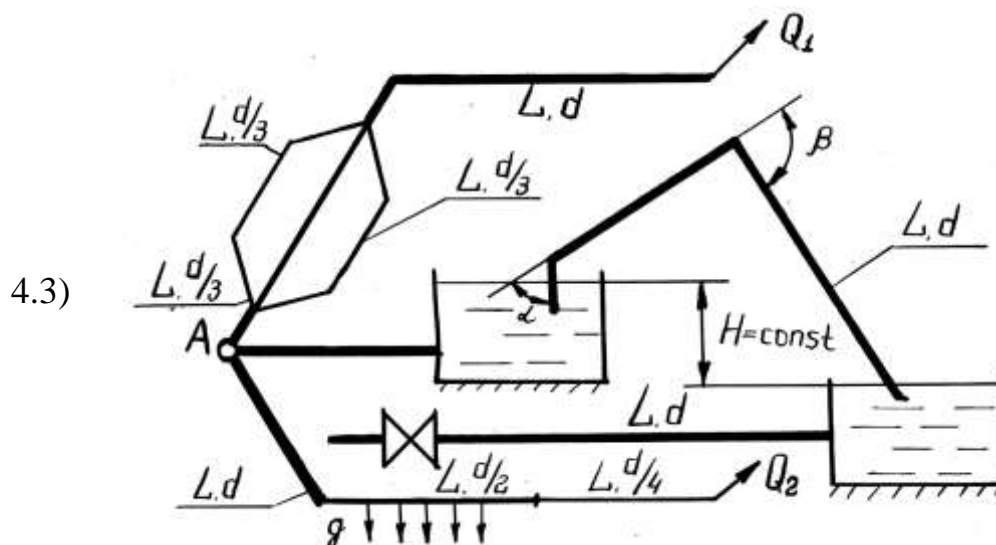


Рисунок 4 – Длинные трубопроводы с параллельным и последовательным соединениями. Сифонный трубопровод, гидравлический удар (продолжение).

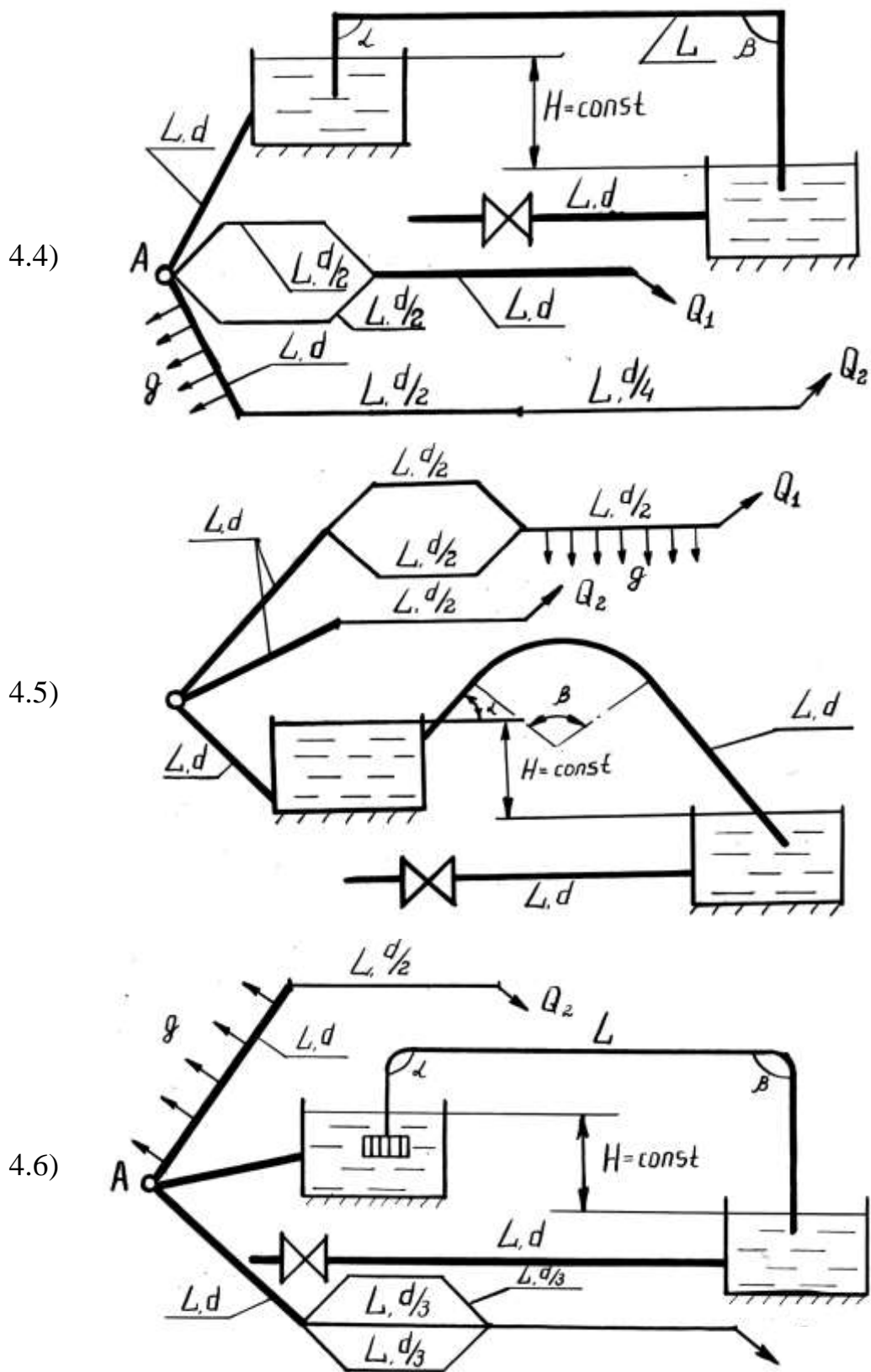


Рисунок 4 – Длинные трубопроводы с параллельным и последовательным соединениями. Сифонный трубопровод, гидравлический удар (продолжение).

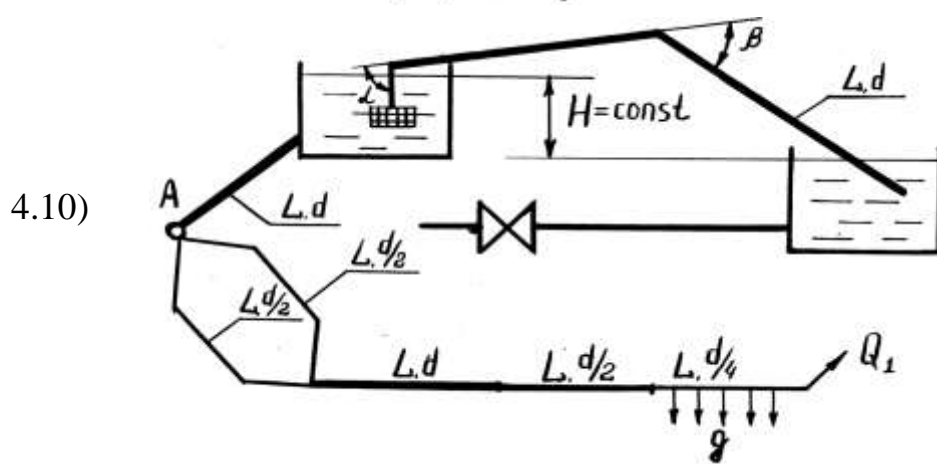
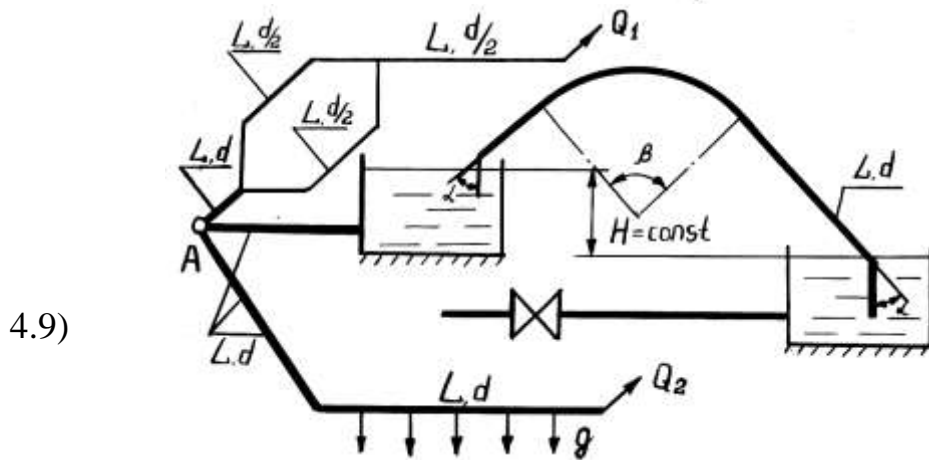
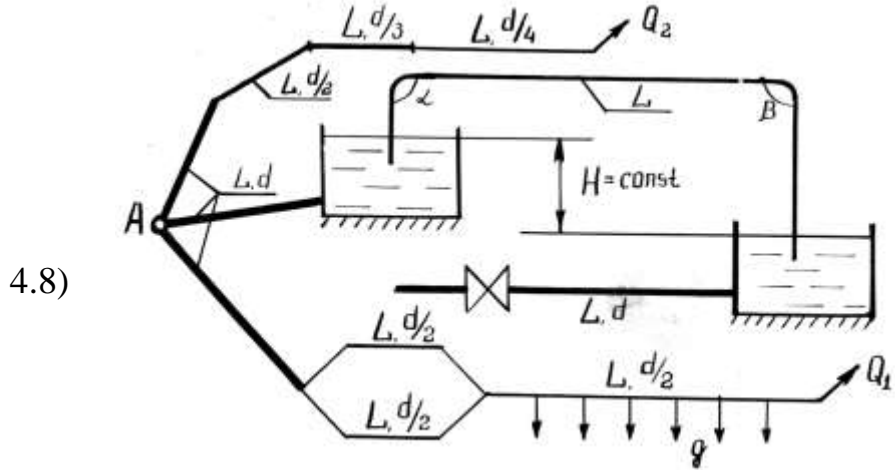
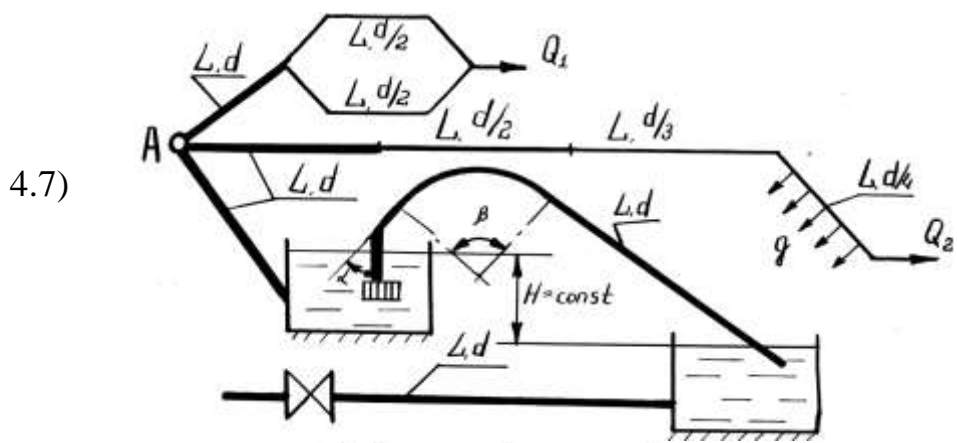


Рисунок 4 (Продолжение).

Методика решения

Раздел 4: Длинные трубопроводы, параллельное и последовательное соединение труб, сифонный трубопровод, гидравлический удар (задачи 31...40)

В каждую из указанных задач включены четыре задачи. Необходимо решить их, используя исходные данные, приведенные в таблицах.

1. Гидравлический расчет длинных трубопроводов сводится к определению потерь напора по длине трубопроводов. Основная формула для решения:

$h_W = \ell \cdot Q^2 / k^2,$	(9)
-------------------------------	-----

где ℓ - длина трубопровода, м; Q - расход жидкости, м³/с; k - модуль расхода (расходная характеристика), м³/с.

Трубопровод обычно включает несколько последовательно соединенных между собой участков (ℓ_1, ℓ_2 и т.д.) с диаметрами d_1, d_2 , и т.д. Тогда

$$h_W = h_{W1} + h_{W2} + \dots + h_{Wi} = \ell_1 \frac{Q^2}{k_1^2} + \ell_2 \frac{Q^2}{k_2^2} + \dots + \ell_i \frac{Q^2}{k_i^2}.$$

2. Для определения расходов жидкости на параллельных участках трубопроводов применяется формула:

$Q = k\sqrt{I} = k\sqrt{\frac{h_W}{\ell}}$	(10)
--	------

где Q - общий расход жидкости в точке «А»,

$$Q_A = Q_T + Q_P = Q_T + q\ell,$$

где Q_T - транзитный расход, м³/с; Q_P - путевой расход, м³/с. Значения Q_T, q, ℓ известны из условия задачи.

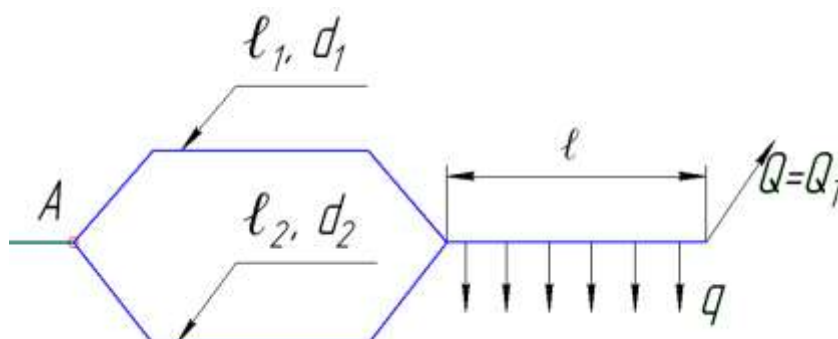


Рисунок 5 - К определению расхода на параллельных участках трубопровода

Таким образом, расход Q_A разделится по параллельным участкам (Q'_1 , Q'_2), $Q_A = Q'_1 + Q'_2$, а для их определения необходимо знать величину h_W (уравнение 10):

$$h_W = \frac{Q_A^2}{\left(\frac{k_1}{\sqrt{\ell_1}} + \frac{k_2}{\sqrt{\ell_2}}\right)^2}.$$

Тогда $Q'_1 = k_1 \sqrt{\frac{h_W}{\ell_1}}$; $Q'_2 = k_2 \sqrt{\frac{h_W}{\ell_2}}$. Следует обратить внимание, что $Q'_1 + Q'_2 = Q_A$. Значение Q_A известно.

Потери напора в трубопроводе при непрерывном расходе по его длине определяются:

$h_W = \ell \frac{(Q_T + 0,55 Q_P)^2}{k^2}.$	(11)
--	------

3. Гидравлический расчет сифонного трубопровода производится по методике расчета гидравлически короткого трубопровода. В отдельных вариантах задачи необходимо определить скорость u и расход Q в сифонном трубопроводе. В других вариантах – определение диаметра сифона при заданном $Q_{сиф}$.

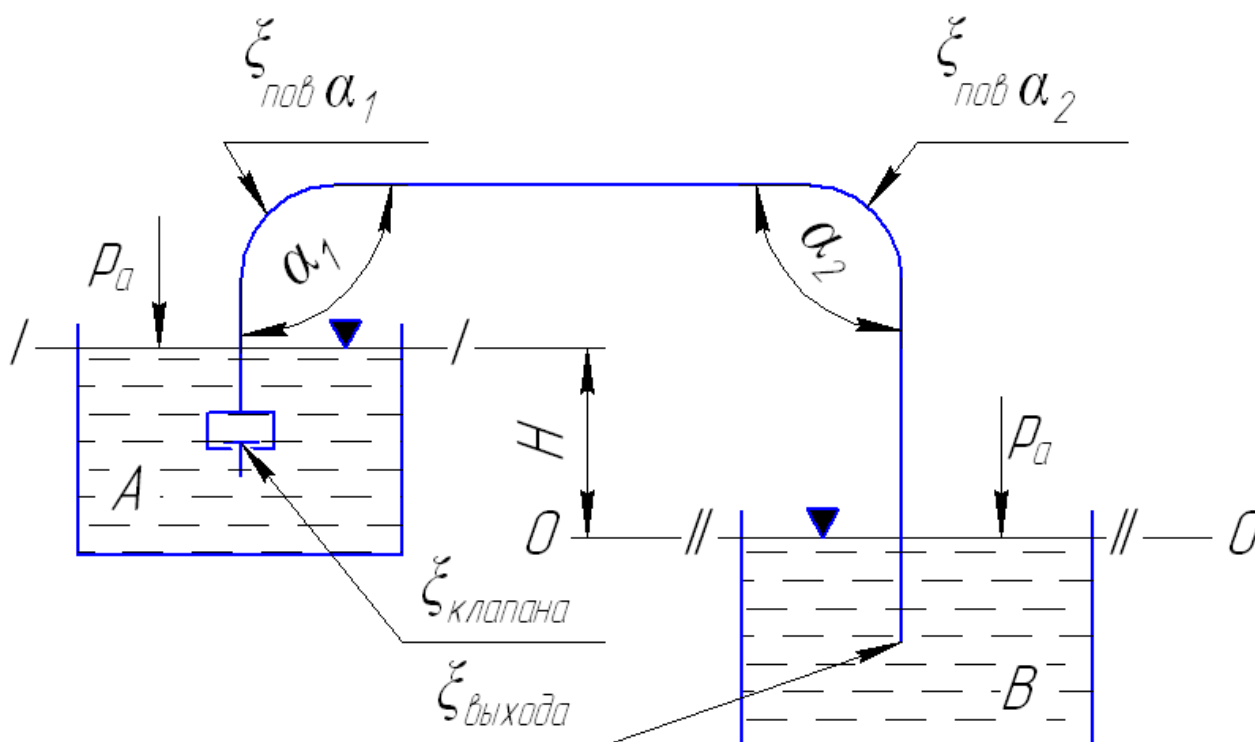


Рисунок 6 - Сифонный трубопровод

Рассмотрим первый вариант. На рисунке 6 представлен сифонный трубопровод. Жидкость перемещается из резервуара «А» в резервуар «В». Вначале трубопровод оборудован обратным клапаном с сеткой (могут быть по условию задач и другие варианты). Резервуары «А» и «В» открыты, на свободную поверхность жидкости действует атмосферное давление p_a , фигура треугольника означает, что уровень жидкости не изменяется. Требуется определить скорость движения v и расход жидкости Q .

Задача решается с применением уравнения Бернулли для потока реальной жидкости:

$\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_W.$	(12)
--	------

Так как в уравнении (12) рассматривается два сечения, то необходимо:

1) Установить и нанести на схему (рисунок 6) сечения *I-I* и *II-II*, плоскость сравнения *0-0*. Сечения размещаются так, чтобы все значения уравнения (12) (кроме h_W) были известны, при $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

2) Сделать расшифровку значения $h_W = \sum h_m + \sum h_\ell$, где h_m - потери напора на местные сопротивления, м; h_ℓ - потери напора по длине трубопровода.

Таким образом,

в сечении <i>I-I</i> :	<i>II-II</i> :
$v_1=0;$	$v_2=0;$
$p_1=p_a;$	$p_2=p_a;$
$z_1=H;$	$z_2=0.$

После подстановки этих значений в уравнение (12) имеем $H=h_W$. То есть превышение уровней резервуаров «А» и «В» расходуется на преодоление потерь напора. Потери напора определяются:

$h_m = \xi \frac{v^2}{2g},$	(13)
$h_\ell = \lambda \ell \frac{v^2}{d \cdot 2g},$	(14)

Где ξ – коэффициент местных сопротивлений.

И так, с учетом (13), (14) и рисунка 6:

$H = \xi_{\text{кл}} \cdot \frac{v^2}{2g} + \xi_{\text{пов } \alpha_1} \cdot \frac{v^2}{2g} + \xi_{\text{пов } \alpha_2} \cdot \frac{v^2}{2g} + \xi_{\text{вых}} \cdot \frac{v^2}{2g} + \lambda \ell \frac{v^2}{d_{\text{сиф}} \cdot 2g}$	(15)
---	------

Значения коэффициентов местных сопротивлений в обратном клапане, на поворотах, на выходе из трубы и коэффициента гидравлического трения λ находим из справочных данных.

Общее значение в правой части (15) $\frac{v^2}{2g}$ вынесем за скобку

$$H = \frac{v^2}{2g} \left[\xi_{\text{КЛ}} + \xi_{\text{ПОВ}} \alpha_1 + \xi_{\text{ПОВ}} \alpha_2 + \xi_{\text{ВЫХ}} + \frac{\lambda \ell}{d_{\text{сиф}}} \right], \quad (16)$$

$$v = \sqrt{\frac{2gH}{\xi_{\text{КЛ}} + \xi_{\text{ПОВ}} \alpha_1 + \xi_{\text{ПОВ}} \alpha_2 + \xi_{\text{ВЫХ}} + \frac{\lambda \ell}{d_{\text{сиф}}}}}. \quad (17)$$

Расход жидкости

$$Q = v \cdot \omega = v \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{сиф}}^2}{4}. \quad (18)$$

Рассмотрим **второй вариант**, где ставиться задача определения диаметра сифона ($d_{\text{сиф}}$) при заданном значении расхода сифона ($Q_{\text{сиф}}$).

Задача решается аналогично первому варианту с использованием уравнения Бернулли (12), но с использованием метода подбора. Все методические указания (уравнения (12)...(17)) и рисунок 6 полностью относятся к задаче по определению диаметра сифонного трубопровода $d_{\text{сиф}}$. Следует обратить внимание на то, что в уравнении (17) при решении задачи по варианту 1 $d_{\text{сиф}}$ был задан, по второму варианту – $d_{\text{сиф}}$ необходимо определить.

Методика решения

Задаемся диаметром сифона, например, $d_{\text{сиф}} = 50 \text{ мм}$, находим по таблицам или справочным данным значение λ_1 . По формуле (17) определяем v_1 , и по уравнению (18) находим $Q_{\text{сиф} 1}$. Задаемся значением $d_2 = 75 \text{ мм}$ находим λ_2 , v_2 и Q_2 . И т.д.

$$d_3 = 100 \text{ мм}, \lambda_3, v_3, Q_3;$$

$$d_4 = 125 \text{ мм}, \lambda_4, v_4, Q_4;$$

$$d_5 = 150 \text{ мм}, \lambda_5, v_5, Q_5.$$

По указанным значениям строим кривую зависимости $d_{\text{сиф}} = f(Q_{\text{сиф}})$, см. рисунок 7.

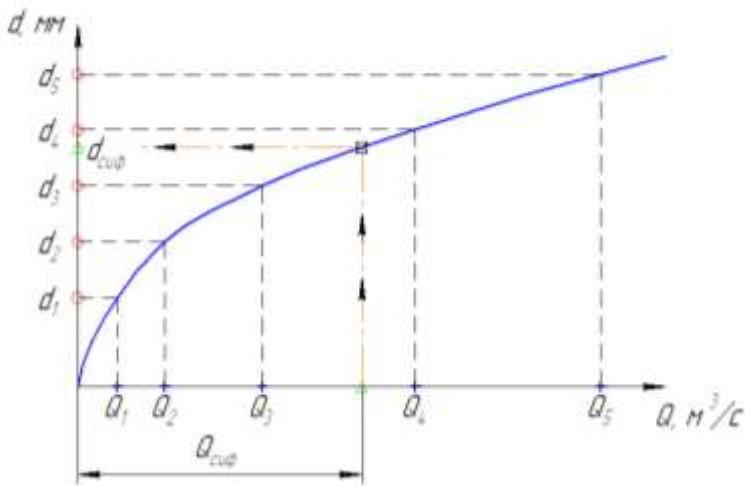


Рисунок 7 - График зависимости диаметра сифона от расхода

На графике (рисунок 7) откладываем значение заданного по условию задачи расхода сифона $Q_{сиф}$, проводим от этого значения линию параллельно оси ординат до пересечения с кривой $d_{сиф} = f(Q_{сиф})$. От этой точки пересечения проводим линию параллельно оси абсцисс до пересечения с ординатой. Получим какое-то значения $d_{сиф}$. Этот размер не

обязательно будет соответствовать искомому значению. Необходимо проверить его соответствие стандарту труб, выпускаемых промышленностью. Принимаем $d_{сиф}$ стандартного значения (в сторону увеличения), это и будет необходимым диаметром сифона.

4. Гидравлический удар в трубах.

Гидравлическим ударом называется резкое повышение давления в трубе при резком изменении скорости движения жидкости во времени. Движущаяся жидкость обладает кинетической энергией, которая при $v \rightarrow 0$ переходит в потенциальную энергию гидродинамического давления. Повышение давления (ударное давление) определяется по формуле Жуковского

$\Delta p_{уд} = \rho \cdot c \cdot v$	(19)
--	------

где c – скорость распространения упругих деформаций (скорость распространения ударной волны); v – скорость движения жидкости до её остановки.

Формула (19) применима, когда время закрытия крана меньше фазы гидравлического удара. Т.е. $t_{закр} < T = 2\ell/c$. В этом случае происходит прямой гидравлический удар.

В случаях непрямого гидравлического удара (когда закрытие крана происходит сравнительно медленно или трубопровод имеет малую длину, в связи, с чем отраженная волна успевает достичь крана до окончания его закрытия, т.е. когда $t_{закр} > T = 2\ell/c$) приращение давления может быть ориентировочно определено по формуле

$\Delta p_{уд} = \rho \cdot c \cdot v \frac{T}{t_{закр}} = \frac{2\rho\ell v}{t_{закр}}$	
--	--

Скорость распространения ударной волны зависит от упругих свойств жидкости и может быть найдена по формуле Н.Е. Жуковского

$c = \frac{\sqrt{E_{\text{ж}}/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{ж}} \cdot d}{E_{\text{тр}} \cdot \delta}}}$	(20)
---	------

где $E_{\text{ж}}$, $E_{\text{тр}}$ – объемный модуль упругости жидкости и материала стенок трубы; d - диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы (по условиям задачи обозначена как e).

Выражение $\sqrt{E_{\text{ж}}/\rho}$ представляет собой скорость распространения звука

в однородной упругой среде с плотностью ρ и объемным модулем упругости $E_{\text{ж}}$. Для воды скорость звука – $a=1435$ м/с, бензина – 1116 м/с, масло – 1200 ... 1400 м/с (в зависимости от температуры масла).

Модуль упругости $E_{\text{ж}}$ для некоторых жидкостей:

Нефть - $E_{\text{ж}}=1,35 \cdot 10^9$ Па, вода – $1,96 \cdot 10^9$ Па, ртуть – $3,3 \cdot 10^{10}$ Па.

Модуль упругости $E_{\text{тр}}$ для материала стенки трубы:

Сталь - $E_{\text{тр}}=1,96 \cdot 10^{11}$ Па, чугун – $1,15 \cdot 10^{11}$ Па, бетон – $0,212 \cdot 10^{10}$ Па, алюминий – $0,705 \cdot 10^{11}$ Па, дерево – $1 \cdot 10^{10}$ Па, свинец – $2 \cdot 10^7$... $5 \cdot 10^9$ Па.

Следует иметь ввиду, что в тупиковом трубопроводе $\Delta p_{\text{уд}}$ может увеличиться в 2 раза.

Раздел 5. Местные сопротивления. Истечение жидкости через отверстия и насадки

(данные для решения задач 41—50 приведены в табл. 5, расчет коротких трубопроводов произвести без учета работы насадка и наоборот)

Задача 41

Из открытого резервуара при постоянном напоре H_1 вытекает вода с одной стороны в атмосферу по короткому трубопроводу диаметром d_1 и длиной l_1 с диффузором на конце, площадь живого сечения которого за расширением $\omega_2=2\omega_1$, с другой стороны через затопленный внешний цилиндрический насадок (насадок Вентури) диаметром d_H и длиной $l_H=5d_1$ в другой резервуар. Разность уровней в резервуарах H . Температура воды $t^\circ = 50^\circ\text{C}$.

Определить:

1. Скорость истечения v_2 и расход воды по короткому трубопроводу Q_2 , если коэффициент сопротивления задвижки $\zeta_3=2,5$; диффузора $\zeta_{\text{диф}}=0,9$. Коэффициент гидравлического трения определить по заданной шероховатости стенок трубы $\Delta=1$ мм.

2. Расход через насадок диаметром d_H и длиной l_H , если коэффициент расхода насадка $\mu=0,82$.

3. Сравнить расход воды через насадок с расходом через отверстие в тонкой стенке того же диаметра. Коэффициент расхода для отверстия $\mu=0,62$.

Задача 42

К открытому резервуару подсоединены короткий стальной трубопровод, состоящий из двух участков длиной l_1 и l_2 , диаметрами d_1 и d_2 и внутренний цилиндрический насадок (насадок Борда) диаметром d_H и длиной $l_H=5d_H$ (рис. 5.2). Истечение по короткому трубопроводу происходит в атмосферу под постоянным напором H_1 , коэффициент сопротивления крана принять равным $\zeta_{\text{кр}}=3$.

Определить:

1. Скорость и расход воды, вытекающей из трубопровода при температуре воды $t^\circ=10^\circ\text{C}$.

2. Расход через насадок при разности уровней в резервуарах H , если коэффициент расхода насадка $\mu_n=0,71$.

3. Сравнить расход воды через насадок с расходом через отверстие в тонкой стенке того же диаметра. Коэффициент расхода для отверстия $\mu=0,62$.

Задача 43

К закрытому резервуару, на свободной поверхности которого действует манометрическое давление p_m , подсоединены чугунный трубопровод пере-

менного сечения с диаметрами d_1 , d_2 , заканчивающийся соплом диаметром $d_c=d_1$ и конически сходящийся насадок с диаметром выходного сечения d_H и длиной $l_H=5d_H$. Трубопровод и насадок подсоединены на глубине H_1 . На первом участке длиной l_1 установлен вентиль, коэффициент сопротивления которого $\xi_6=4$. Длина второго участка l_2 . Коэффициент сопротивления сопла $\xi_c=0,06$, сжатие струи на выходе из сопла отсутствует (рис. 5.3).

Определить:

1. Скорость истечения v и расход Q вытекающей из сопла воды при температуре $t^\circ = +10^\circ\text{C}$ и постоянном напоре H_1 .
2. Расход воды через затопленный насадок при разности уровней в резервуарах H , если коэффициент расхода насадка $\mu_H=0,94$.
3. Сравнить расход воды, проходящей через насадок, с расходом через отверстие в тонкой стенке того же диаметра. Коэффициент расхода для отверстия $\mu=0,62$.

Задача 44

Истечение происходит из открытого резервуара при постоянном напоре воды H_1 по короткому трубопроводу переменного поперечного сечения с диаметрами d_1 и d_2 в атмосферу и из конически расходящегося насадка с диаметром выходного сечения d_H и длиной $l_H=5d_H$ под уровень (рис. 5.4). Разность уровней — $H_2=1,5$ м.

На втором участке трубопровода имеются два колена с плавным поворотом, коэффициент сопротивления каждого $\xi_k = 0,15$, и задвижка, коэффициент сопротивления которой $\xi_3=8,0$. Коэффициент гидравлического трения на первом участке длиной l_1 принять равным $\lambda_1=0,04$, на втором участке длиной $l_2 - \lambda_2=0,025$.

Определить:

1. Скорость истечения v_2 и расход Q_2 через трубопровод.
2. Скорость истечения и расход через затопленный конически расходящийся насадок, если коэффициент скорости и коэффициент расхода насадка равны и составляют $\varphi_H=\mu_H=0,45$.
3. Сравнить скорость и расход через насадок со скоростью и расходом через отверстие в тонкой стенке того же диаметра. Коэффициент скорости для отверстия $\varphi=0,97$, а коэффициент расхода $\mu=0,62$.

Задача 45

Из открытого резервуара по короткому стальному трубопроводу постоянного поперечного сечения d_1 и длиной l_1 который заканчивается соплом диаметром $d_c=0,5d_1$, вытекает вода при $t^\circ = +30^\circ\text{C}$ в атмосферу. Истечение

происходит под напором H_1 (рис. 5.5). Коэффициент сопротивления крана принять равным $\zeta_K = 2,5$. С другой стороны к резервуару подсоединен коноидальный насадок диаметром выходного сопла d_H и длиной $l_H = 5d_H$.

Определить:

1. Скорость истечения из сопла v_c и расход воды по короткому трубопроводу Q .
2. Расход воды через затопленный коноидальный насадок при разности уровней в резервуарах H , если коэффициент расхода насадка $\mu = 0,97$.
3. Сравнить расход воды через насадок с расходом через отверстие в тонкой стенке того же диаметра. Коэффициент расхода для отверстия $\mu = 0,62$.

Задача 46

Вода при температуре $t^\circ = 15^\circ\text{C}$ из резервуара A подается в резервуар B по трубопроводу, состоящему из двух участков длиной l_1 и l_2 , диаметрами d_1 и d_2 . Коэффициент гидравлического трения принять равным $\lambda = 0,03$. С другой стороны на том же уровне к резервуару A подсоединен внешний цилиндрический насадок (насадок Вентури), диаметром d_H и длиной $l_H = 5d_H$ (рис. 5.6).

Определить:

1. Напор H_1 , который нужно поддерживать в баке A , чтобы наполнить бак B , объемом $W_B = 18 \text{ м}^3$ за 30 мин. Коэффициент гидравлического трения принять равным $\lambda = 0,03$. Коэффициент потерь при входе в трубу принять равным $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$.
2. Скорость истечения воды через насадок в предположении, что в резервуаре A находится вода под напором H , определенным из предыдущего условия. Коэффициент скорости насадка φ_H принять равным $\varphi_H = 0,82$.
3. Сравнить скорость истечения из насадка со скоростью истечения через отверстие в тонкой стенке того же диаметра, если $\varphi_{\text{отв}} = 0,62$.

Задача 47

Вода при температуре $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ из резервуара A подается в резервуар B со скоростью $v = 0,5 \text{ м/с}$ по стальному трубопроводу диаметром d_1 и длиной l_1 . Уровень воды в баке A поддерживается постоянным. Коэффициенты сопротивления: входа в трубу $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$; крана $\zeta_{KP} = 1,5$; колена без закругления $\zeta_{\text{кол-1}} = 0,25$; колена с закруглением $\zeta_{\text{кол-2}} = 0,14$. На глубине H_1 к резервуару подсоединен внутренний цилиндрический насадок (насадок Борда) диаметром d_H и длиной $l_H = 5d_H$ (рис. 5.7).

Определить:

1. Время заполнения водой резервуара B объемом $W = 1,15 \text{ м}^3$ и потери напора в трубопроводе.

2. Скорость истечения воды из насадка, если коэффициент скорости для насадка $\varphi_H=0,71$.

3. Сравнить скорость истечения из насадка со скоростью истечения из отверстия в тонкой стенке того же диаметра, если $\varphi_{отв}=0,62$.

Задача 48

Из резервуара A , заполненного водой на высоту H_1 и находящегося под манометрическим давлением p_m , вода подается по стальному трубопроводу длиной l_1 и диаметром d_1 в резервуар B на высоту H . К резервуару A на глубине H_1 подсоединен конически сходящийся насадок с диаметром выходного сечения d_H и длиной $l_H=5d_H$ (рис. 5.8).

Коэффициенты сопротивлений задвижки $\zeta_3=9,0$; каждого колена с закруглением $\zeta_k=0,25$; коэффициент гидравлического трения $\lambda=0,04$. Кинематическая вязкость воды $\nu=1,24 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Скоростным напором и изменением уровня в баке A пренебречь.

Определить:

1. Режим течения, расход Q и скорость протекающей по трубопроводу воды.

2. Скорость и расход, проходящий через конически сходящийся насадок, если коэффициент скорости для насадка $\varphi_H=0,96$, а коэффициент расхода $\mu_H=0,94$.

3. Сравнить скорость и расход воды через насадок со скоростью и расходом через отверстие в тонкой стенке такого же диаметра, если коэффициент скорости для отверстия $\varphi=0,97$, а коэффициент расхода $\mu=0,62$.

Задача 49

Из резервуара A , на свободной поверхности которого избыточное давление p_m , вода температурой $t^0=15^\circ\text{C}$ поступает в резервуар B по трубопроводу переменного сечения, состоящему из двух участков длиной l_1 и l_2 и диаметрами d_1 и d_2 . Разность уровней в резервуарах $h=H_1+H$ (рис. 5.9).

На глубине H_1 к резервуару A подсоединен конически расходящийся насадок с диаметром выходного сечения d_H и длиной $l_H=5d_H$.

Определить:

1. Режим течения, скорость v и расход воды Q , поступающей в резервуар B по трубопроводу, если коэффициент потерь входа в трубу $\zeta_{вх}=0,5$, коэффициент сопротивления колена $\zeta_k=0,4$, коэффициент сопротивления полностью открытой задвижки $\zeta_3=5$, коэффициент гидравлического трения на первом участке $\lambda_1=0,025$, на втором — $\lambda_2=0,04$. Скоростным напором и изменением уровня в резервуаре A пренебречь.

2. Скорость и расход воды через конически расходящийся насадок, если коэффициенты φ_n и μ_n равны и составляют 0,45.

3. Сравнить скорость и расход, проходящий через насадок, со скоростью и расходом через отверстие в тонкой стенке, если $\varphi_{отв}=0,97$, а $\mu_{отв}=0,62$.

Задача 50

Вода при температуре $t^\circ = 20^\circ \text{C}$ подается из резервуара A в резервуар B по короткому трубопроводу, состоящему из двух участков длиной l_1 и l_2 и диаметрами d_1 и d_2 . Разность уровней в резервуарах равна H . На глубине H_1 к резервуару A подсоединен коноидальный насадок диаметром выходного сечения d_H и длиной $l_H=5d_H$ (рис. 5.10).

Определить:

1. Расход Q , поступающий в резервуар B по трубопроводу, если коэффициент сопротивления крана $\xi_k=4,2$, коэффициент гидравлического трения $\lambda=0,032$

2. Расход воды через коноидальный насадок, если коэффициент расхода насадка $\mu_H=0,97$.

3. Сравнить расход через коноидальный насадок с расходом через отверстие в тонкой стенке, если коэффициент расхода для отверстия $\mu=0,62$

Таблица 5 - Исходные данные для решения задач 41-50

Исходные данные		Номера задач									
		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Диаметр труб	d_1 , мм	80	200	120	400	100	200	100	100	200	80
	d_2 , мм	—	100	250	100	—	80	—	—	80	150
Длина трубопроводов	l_1 , м	4	4	10	0,80	3	8	15	6	8	8
	l_2 , м	—	10	5	2	—	10	—	—	12	10
Диаметр насадка d_H , мм		100	100	120	200	80	100	100	100	200	80
Напор в резервуарах	H , м	3	2	3	6	2	—	—	2	4	4
	H_1 , м	6	5	8	5	4	—	4	5	6	8
Манометрическое давление p_M , кПа		—	—	500	—	—	—	—	150	200	—

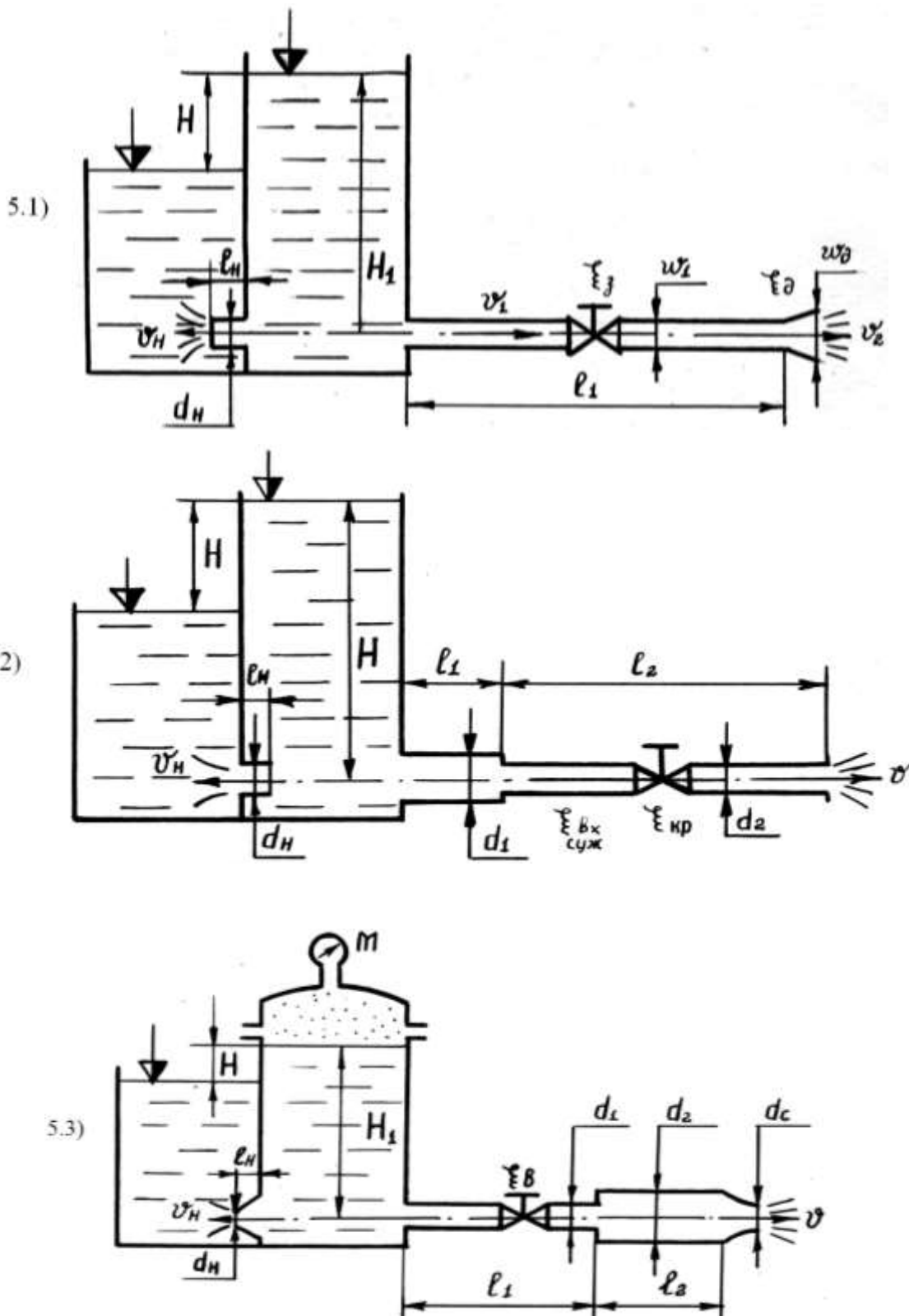


Рисунок 5 – Местные сопротивления.
Истечение жидкости через отверстия и насадки

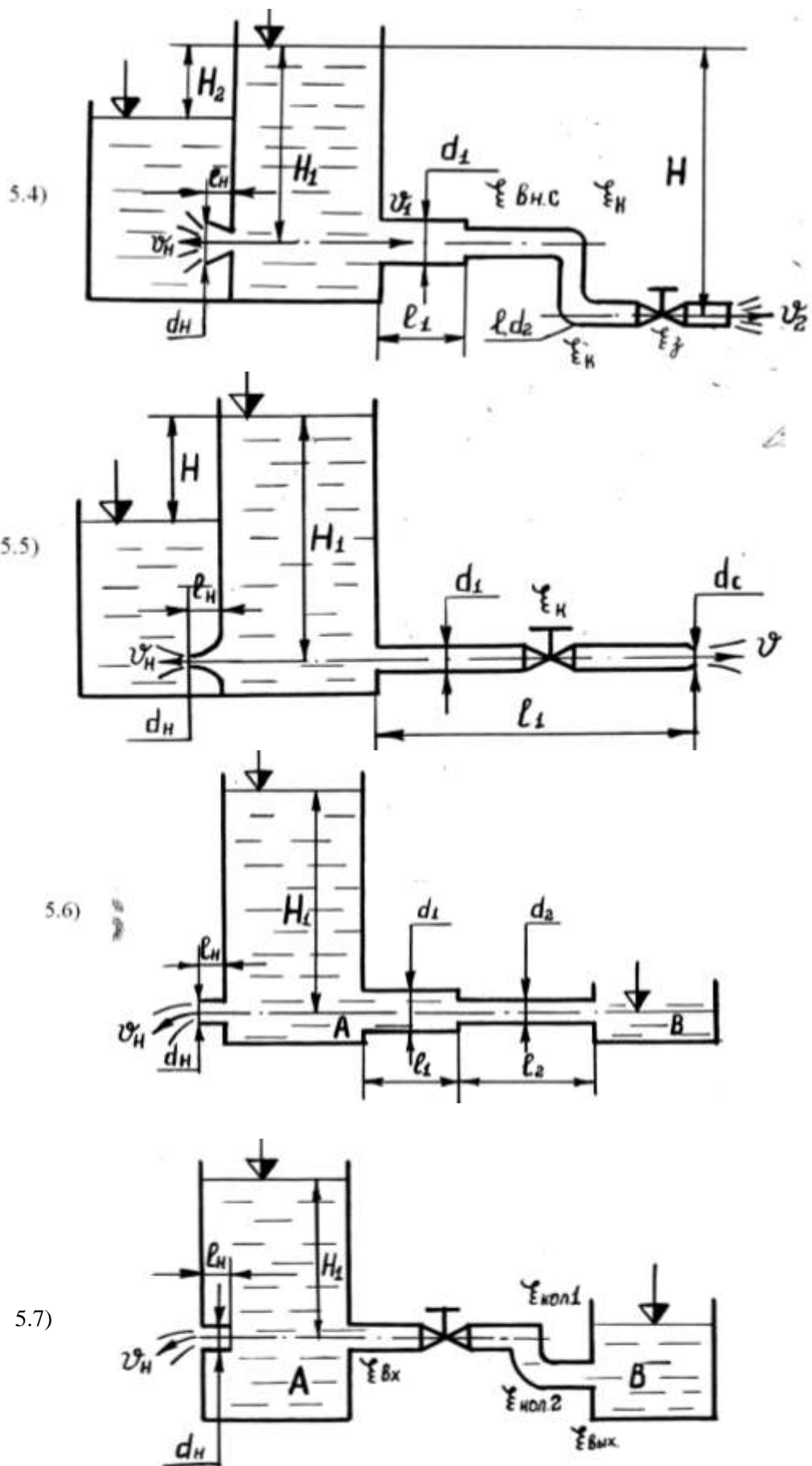
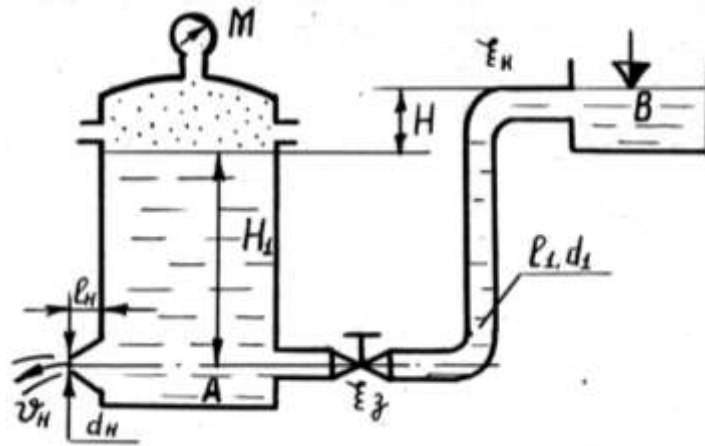
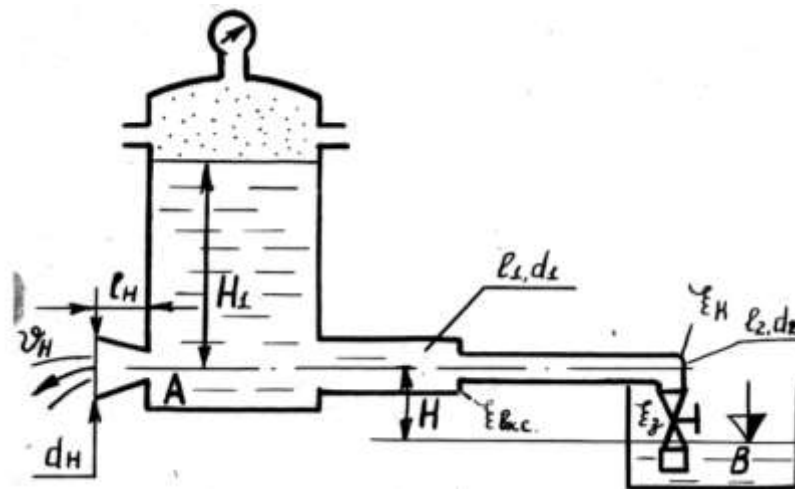


Рисунок 5 - Местные сопротивления.
Истечение жидкости через отверстия и насадки (продолжение).

5.8)



5.9)



5.10)

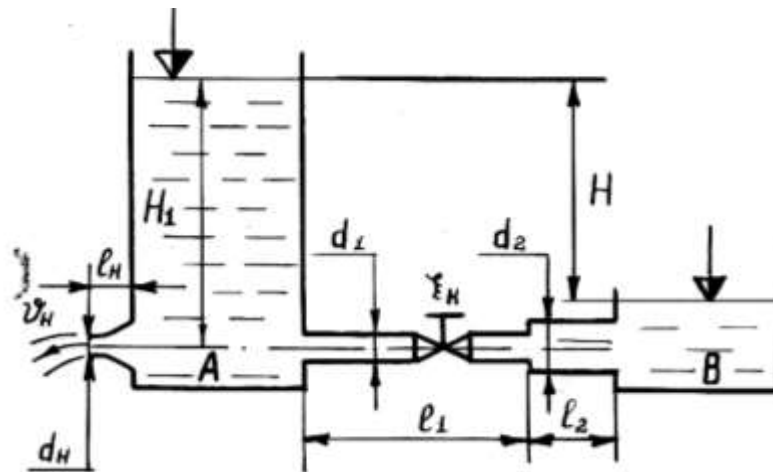


Рисунок 5 - Местные сопротивления.
Истечение жидкости через отверстия и насадки (продолжение).

Методика решения

Раздел 5: Местные сопротивления.

Истечение жидкости через отверстия и насадки (задачи 41...50)

Каждая задача представлена двумя примерами:

1. Определение скорости движения и расхода при истечении жидкости из резервуара по трубопроводу;

2. Определение скорости и расхода жидкости через насадки.

Рассмотрим методику расчета гидравлически короткого трубопровода применительно к первому примеру задачи.

Пример решается с применением уравнения Бернулли (12) и условия, что превышение уровня резервуара расходует на преодоление потерь напора, для чего:

а) Правильно выбрать сечения *I-I* и *II-II* согласно схемы (рисунок 8);

б) Выбрать плоскость сравнения *0-0*.

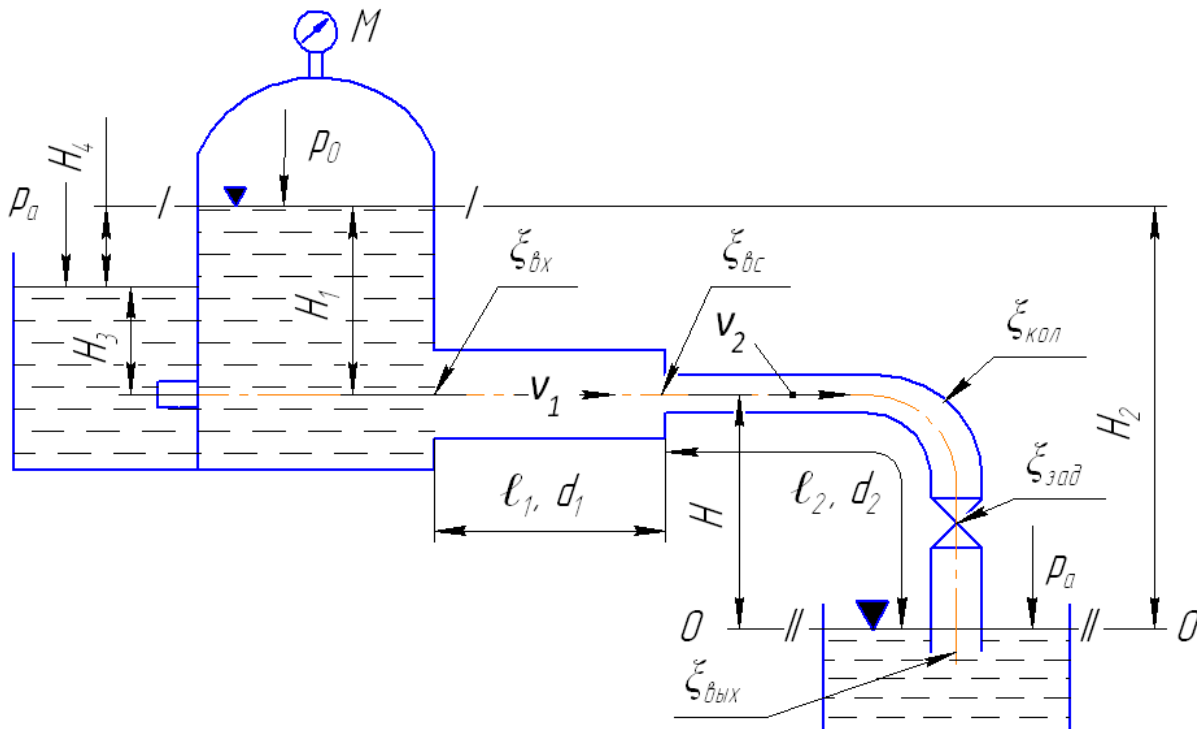


Рисунок 8 - Расчет гидравлически короткого трубопровода

Запишем уравнение Бернулли:

$$\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_w.$$

Сечения *I-I*, *II-II* следует принимать из расчета, чтобы все члены уравнения в *I-I* и *II-II* (кроме h_w) были известны. Плоскость сравнения *0-0* принимается с

учетом исходных данных положения сечений *I-I*, *II-II*. С учетом этих замечаний будем иметь:

в сечении – <u><i>I-I</i></u> $v_1=0;$ $p_1=p_0;$ $z_1=H_2;$	в сечении – <u><i>II-II</i></u> $v_2=0;$ $p_2=p_a;$ $z_2=0.$
---	---

После подстановки в исходное уравнение:

$$\frac{p_0}{\rho g} + H_2 = \frac{p_a}{\rho g} + h_w, \text{ или } \frac{p_0 - p_a}{\rho g} + H_2 = h_w.$$

Из основного уравнения гидростатики известно, что $p_0 - p_a = p_m$, тогда $\frac{p_m}{\rho g} + H_2 = h_w$. Обозначим левую часть через суммарный напор $H_0 = h_w$. Из полученного выражения следует, что весь напор $\frac{p_m}{\rho g} + H_2 = H_0$ расходуется на преодоление потерь напора h_w .

Известно, что

$$h_w = \sum h_m + \sum h_\ell,$$

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g},$$

$$h_\ell = \lambda \ell \frac{v^2}{d \cdot 2g},$$

где h_m - потери напора на местные сопротивления, м; h_ℓ - потери напора по длине трубопровода, м; ξ – коэффициент местных сопротивлений; λ - коэффициент гидравлических сопротивлений трения.

Суммарные потери напора h_m и h_ℓ :

$H_0 = \xi_{\text{вх}} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \xi_{\text{вс}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{\text{кол}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{\text{зад}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{\text{вых}} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$ $+ \lambda_1 \ell \frac{v_1^2}{d_1 \cdot 2g} + \lambda_2 \ell \frac{v_2^2}{d_2 \cdot 2g}$	(21)
---	------

Для дальнейшего преобразования полученной зависимости приведем скорости v_1 и v_2 к одной скорости v_2 , пользуясь уравнением неразрывности потока $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$. Из этого уравнения:

$$v_2 = v_1 \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

где ω_1 – живое сечение трубопровода с d_1 ; а ω_2 – с d_2 ; $\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$, $\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$.

И тогда скорость v_1 , определится как

$v_2 = v_1 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2.$	(22)
---	------

Подставим значение (22) в уравнение (21):

$$H_0 = \xi_{\text{вх}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + \xi_{\text{вс}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{\text{кол}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{\text{зад}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{\text{вых}} \cdot \frac{v_2^2}{2g} + \lambda_1 \ell \frac{v_2^2}{d_1 \cdot 2g} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + \lambda_2 \ell \frac{v_2^2}{d_2 \cdot 2g}$$

В полученном выражении общим членом является $\frac{v_2^2}{2g}$, поэтому вынесем его за скобку и имеем

$$H_0 = \frac{v_2^2}{2g} \left[\xi_{\text{вх}} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + \xi_{\text{вс}} + \xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{зад}} + \xi_{\text{вых}} + \frac{\lambda_1 \ell}{d_1} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 + \frac{\lambda_2 \ell}{d_2} \right]$$

Значение всех коэффициентов должно быть известно. Обозначим их сумму через $\xi_{\text{сист}}$ (коэффициент сопротивления системы), тогда

$$H_0 = \xi_{\text{сист}} \frac{v_2^2}{2g},$$

а искомая скорость определится:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gH_0}{\xi_{\text{сист}}}} = \sqrt{\frac{2g\left(\frac{p_M}{\rho g} + H_2\right)}{\xi_{\text{сист}}}}, \text{ так как } \frac{p_0 - p_a}{\rho g} = \frac{p_M}{\rho g}.$$

Второй пример задачи сводится к определению v , Q при истечении жидкости через насадки. В общем виде Q определяется:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (23)$$

где μ – коэффициент расхода; ω – живое сечение (радиальное сечение) насадка; H – напор, под которым происходит истечение жидкости через насадок.

При истечении под уровень жидкости (рисунок 8) используется формула

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H_1 - H_3)},$$

где H_1 – напор, под которым происходит истечение жидкости; H_3 – высота подтопления насадка.

При $H_3=0$ получаем формулу (23); при $H_1=H_3$, $Q=0$.

Для рассматриваемого примера (рисунок 8) высота $H_4=H_1-H_3$. Так как при истечении жидкости через насадки коэффициент сжатия $\varepsilon=1$ (сжатие струи за насадком не происходит), то $\varphi=\mu$, а

$$v = \varphi \sqrt{2g\left(\frac{p_M}{\rho g} + H_4\right)}; Q = \mu \omega \sqrt{2g\left(\frac{p_M}{\rho g} + H_4\right)}.$$

Список рекомендуемой литературы

1. Гидравлика: учеб. для вузов / Д.В. Штеренлихт. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2008. - 655 с.
2. Гидравлика, гидравлические машины и водоснабжение сельского хозяйства: учеб. для вузов / Р. Г. Сабашвили. - М.: Колос, 1997. - 479 с.
3. Гидравлика и гидравлические машины: учеб. пособие для с.-х. вузов по спец. "Механизация сел. хозяйства" / З. В. Ловкис [и др.]. - М.: Колос, 1995. - 303 с.
4. Гидравлика и гидравлические машины: учеб. пособие / А. А. Калекин. - М.: Мир, 2005. - 511 с.
5. Сборник задач по гидравлике и гидравлическому приводу: учеб. пособие / С. В. Каверзин. - Красноярск, 1999. - 35 с.
6. Гидравлика. Термины и определения: словарь-справочник / В. К. Евтеев, С. Н. Ильин ; Иркут. гос. с.-х. акад. - Иркутск : ИрГСХА, 2009. - 69 с.
7. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями: учеб. пособие для вузов / В. Н. Метревели. - 2-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2008. - 191 с.

ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ ГИДРАВЛИКИ

А

1. **Автомодельность в отношении определённого критерия подобия (для заданной области его значения)** – независимость условий движения жидкости от этого критерия подобия (в указанной области).

2. **Аэрация потока жидкости** – насыщение потока жидкости пузырьками воздуха. В механике жидкости изучается только отмеченный выше частный случай аэрации потока; случай аэрации жидкости за счет растворения в ней воздуха (или другого газа) исключается из рассмотрения (влияние растворившегося в жидкости воздуха на её физико-механические характеристики для обычных условий практики пренебрежимо мало). К аэрации потока следует отнести выделения растворенного в жидкости воздуха в виде пузырьков.

Б

3. **Бьеф верхний (ВБ)** – область движущейся или покоящейся жидкости, расположенная перед водоподпорным сооружением.

4. **Бьеф нижний (НБ)** – область движущейся или покоящейся жидкости, расположенная за водоподпорным сооружением.

В

5. **Вакуум** – состояние жидкости или газа, когда абсолютное давление в рассматриваемой точке меньше атмосферного.

6. **Вакуумметрическое давление** $\{p_{\text{вак.}}, \text{Па}\}$ – недостаток абсолютного давления (гидромеханического) ($p_{\text{абс}}$) до атмосферного давления ($p_{\text{атм}}$):

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}}$$

7. **Вакуумметрическое давление допустимое** $\{p_{\text{вак. доп.}}, \text{Па}\}$ – наибольшая величина вакуума, допустимая для данного устройства или сооружения (по условию отсутствия опасной кавитационной эрозии; по условиям отсутствия недопустимого разрыва сплошности движения жидкости в напорном трубопроводе; по условию получения достаточного коэффициента полезного действия насоса и так далее).

8. **Вакуумметрическое давление предельное** $\{p_{\text{вак. пред.}}, \text{Па}\}$ – наибольший возможный вакуум для данной жидкости при заданной температуре; это вакуумметрическое давление отвечает абсолютному гидростатическому давлению, равному давлению паров жидкости, насыщающих про-

странство - «давлению насыщенных паров». Увеличение вакуумметрического давления сверх предельного невозможно в связи с появлением в жидкости кавитационных пузырьков, давление в которых равно давлению насыщенных паров.

9. Ватерлиния или контур плавания – линия пересечения поверхности плавающего тела, находящегося в равновесии, с плоскостью, проведенной на уровне свободной поверхности.

10. Водоворотная, или вальцовая, или циркуляционная область – область движущейся жидкости, которая характеризуется наличием линий тока, имеющих вид замкнутых кривых.

11. Водоизмещение плавающего тела – вертикальная сила, направленная вверх и равная весу воды, вытесненной плавающим телом, находящимся в равновесии.

12. Возмущенное состояние жидкости – местное изменение геометрической формы объёма, занимаемого жидкостью, или местное изменение состояния её, как вещества. Возмущение может иногда осуществляться однократно и за относительно короткий промежуток времени. При наличии возмущения может нарушаться форма свободной поверхности жидкости или изменяться степень её сжатия (что обуславливает изменение плотности жидкости). Возмущение может распространяться от данного места в стороны в виде волны или волн возмущения; волн или волны на свободной поверхности жидкости или, в случае напорных потоков, волн или волны повышенного или пониженного гидродинамического давления.

13. Волна возмущения – разрастающаяся или меняющая свою форму область (или часть области) потока, в пределах которой имеет место возмущенное состояние жидкости.

14. Высота вакуума или вакуумметрическая высота $\{h_{\text{вак.}}, \text{ м}\}$ – высота столба жидкости (заданной плотности ρ), уравнивающая разность атмосферного $p_{\text{атм}}$ и абсолютного $p_{\text{абс}}$ гидромеханического давлений в рассматриваемой точке (где имеется вакуум):

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}}}{\rho g} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g}.$$

15. Высота геометрическая $\{z, \text{ м}\}$ – возвышение рассматриваемой точки над плоскостью сравнения.

16. Высота капиллярного поднятия (наибольшая возможная для данного пористого тела или данной капиллярной трубки) $\{h_{\text{к. п.}}, \text{ м}\}$ – пре-

вышение поверхности менисков (или мениска) над поверхностью (проведенной внутри жидкости), в каждой точке которой абсолютное гидростатическое давление равно атмосферному.

17. **Высота приведенная** $\{h_{np}, \text{м}\}$ – высота столба жидкости (заданной плотности) при нулевом абсолютном давлении на его свободной поверхности, создающего у своей подошвы давление, равное абсолютному гидростатическому давлению в рассматриваемой точке. Величина представляет собой высоту жидкости в пьезометре закрытого типа, подключенном к данной точке жидкости.

18. **Высота пьезометрическая** $\{h_p, \text{м}\}$ – высота столба жидкости (заданной плотности) при атмосферном давлении на его свободную поверхность, создающего у своей подошвы давление, равное избыточному гидростатическому давлению в рассматриваемой точке. Величина представляет собой высоту столба жидкости в пьезометре открытого типа, подключенного к данной точке жидкости.

19. **Вязкость жидкости физическая** – свойство жидкости, заключающееся в том, что при её движении по поверхностям скольжения отдельных слоев (или частиц) жидкости друг по другу возникают силы трения той или другой величины (действующие вдоль поверхности скольжения). Вязкость жидкости зависит от рода жидкости, а также от её температуры; она учитывается в расчетах коэффициентами вязкости.

Г

20. **Геометрически подобные потоки** – потоки, для которых отношение любых сходственных размеров одинаковы (формы любых сходственных сечений потоков являются геометрически подобными).

21. **Гидравлическая крупность частиц** $\{w_0, \text{м/с}\}$ – скорость равномерного падения данной тяжёлой твердой частицы в достаточно большом объёме покоящейся жидкости.

22. **Гидравлические сопротивления** – силы трения, появляющиеся в жидкости при её движении и вызывающие потери напора.

23. **Гидравлический диаметр** $\{D_z, \text{м}\}$ – условная величина, равная учетверенной величине гидравлического радиуса (R):

$$D_z = 4R.$$

24. **Гидравлический радиус** $\{R, \text{м}\}$ – параметр живого сечения потока, приближенно учитывающий влияние формы, а также размеров этого сечения,

на среднюю скорость; величина этого параметра равна отношению площади живого сечения (ω) к длине смоченного периметра (χ),

$$R = \frac{\omega}{\chi}.$$

При помощи гидравлического радиуса с достаточной точностью удается учесть указанное влияние только в случае живых сечений «правильной» геометрической формы (имеющей вид фигуры, приближающейся к прямоугольнику, треугольнику, кругу, к части круга и тому подобное); живые сечения сложного очертания, имеющие, например, острые углы, резкие изменения размеров и т.п., не поддаются расчету на основе обычного использования гидравлического радиуса.

25. Гидравлический удар (явление гидравлического удара) - повышение или понижение гидростатического давления в напорном трубопроводе, вызванное изменением во времени в каком-либо сечении трубопровода скорости движения жидкости (например, путем открытия или закрытия задвижки). Гидравлический удар в виде волны возмущения распространяется вдоль напорного трубопровода с большой скоростью (скоростью распространения ударной волны).

26. Гидравлический удар неполный – наибольшая величина гидравлического удара, получающаяся в месте зарождения прямого гидравлического удара, при условии, что отраженный удар успеваает придти к указанному месту раньше, чем постепенно нарастающий прямой гидравлический удар достигает полной своей величины.

27. Гидравлический удар отраженный (непрямой) – волна положительного или отрицательного гидравлического удара, возникшая благодаря отражению от какого-либо «препятствия» или водоёма гидравлического удара, подошедшего к этому «препятствию» или водоёму.

28. Гидравлический удар отрицательный – величина понижения гидростатического давления в результате возникновения гидравлического удара, распространяющегося в виде волны возмущения вдоль напорного трубопровода.

29. Гидравлический удар полный – наибольшая величина постепенно нарастающего (до определенной величины) гидравлического удара, не сниженная отраженным ударом (имеющим другой знак и не успевшим дойти к месту зарождения данного прямого гидравлического удара до момента завершения его роста).

30. **Гидравлический удар положительный** – величина повышения гидростатического давления в результате возникновения гидравлического удара, распространяющегося в виде волны возмущения вдоль напорного трубопровода.

31. **Гидравлический удар прямой (или начальный)** – волна положительного или отрицательного гидравлического удара, распространяющегося вдоль напорного трубопровода от места возникновения гидравлического удара до места, где он отражается.

32. **Гидравлическое уравнение количества движения (при установившемся движении в каком-либо русле):**

$$\alpha_0 \rho Q (v_{2x} - v_{1x}) = G_x + (T_0)_x + R_x + P_x;$$

где α_0 – коэффициент учитывающий неравномерность распределения скорости в потоке (корректив кинетической энергии или коэффициент Бусенеска);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

Q – объёмный расход жидкости, м³/с;

v_{2x} ; v_{1x} – средние скорости, соответственно, в живых сечениях (1-1) и (2-2), м/с;

G_x – собственный вес жидкости находящейся между сечениями (1-1) и (2-2), Н;

$(T_0)_x$ – сила внешнего трения, приложенная к боковой поверхности объёма жидкости, Н;

R_x – реакция (исключая силы трения), приложенная со стороны боковых стенок русла к рассматриваемому объёму жидкости, Н;

P_x – разность (геометрическая) сил давления на торцевые поверхности выделенного объёма жидкости, Н.

Индексы « x » указывают на то, что здесь имеется в виду проекция соответствующих скоростей и векторов на произвольно направленную прямолинейную ось x .

Величина $\alpha_0 \rho Q v$ называется секундным количеством движения. Согласно указанному уравнению при переходе от плоского живого сечения (1-1) к плоскому живому сечению (2-2) проекция (на какую-либо ось) секундного количества движения изменяется на величину, равную сумме проекций на ту же ось всех четырех сил (G , T_0 , R , P), действующих на отсек потока, заключенный между сечениями (1-1) и (2-2).

33. **Гладкие русла (трубы)** – русла, стенки которых имеют столь малые выступы шероховатостей, что они не влияют на величину потерь напора

по длине (при турбулентном режиме движения). Считают, что абсолютная шероховатость русел (Δ) меньше толщины ламинарного подслоя (δ). Для этих русел, называемых «гидравлически гладкими», потери напора не зависят от шероховатости стенки русла не только при ламинарном, но и при турбулентном режиме движения.

34. Давление абсолютное $\{p_{абс}, \text{Па}\}$ – полное давление в рассматриваемой точке жидкости.

36. Давление актуальное местное (или мгновенное) $\{p_{ак}, \text{Па}\}$ - величина гидродинамического давления в некоторой неподвижной точке пространства, занятого жидкостью, при турбулентном режиме движения, в данный момент времени (в данное мгновение).

36. Давление атмосферное – $\{p_{атм}, \text{Па}\}$ – гидростатическое давление, действующее в точках поверхности земли со стороны слоя атмосферы (воздуха). Величина атмосферного давления зависит от природно-климатических условий и положения точки на поверхности земли. При технических гидравлических расчетах величину атмосферного давления часто принимают равным $p_{атм}=98100 \text{ Па}$ или 1 кг/см^2 , что соответствует высоте столба воды равной 10,0 м.

37. Давление весовое гидростатическое $\{p_{вес}, \text{Па}\}$ – гидростатическое давление, обусловленное только заглублением h рассматриваемой точки под свободной поверхностью жидкости и равное

$$p_{вес} = \rho g h;$$

где ρg – вес единицы объёма жидкости (удельный вес жидкости γ , Н/м^3);

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Данный термин относится к случаю, когда покоящаяся жидкость находится под действием только одной объёмной силы – силы тяжести.

38. Давление внешнее поверхностное $\{p_0, \text{Па}\}$ – напряжение для площадки действия, совпадающей с поверхностью жидкости, обусловленное давлением на неё газа (воздуха), а в некоторых случаях и твердого тела, поверхность которого соприкасается с поверхностью жидкости. В случае открытого сосуда, заполненного жидкостью $p_0 = p_{атм}$.

39. Давление гидродинамическое $\{p, \text{Па}\}$ – скалярная величина, равная средней арифметической из величин трех нормальных напряжений σ , действующих на три произвольные взаимно перпендикулярные площадки

действия, намеченные в данной точке пространства, занятого движущейся жидкостью:

$$p = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z);$$

где σ_x ; σ_y ; σ_z – величины трех указанных нормальных напряжений.

40. **Давление гидродинамическое осредненное** $\{\bar{p}, \text{Па}\}$ – среднее во времени значение пульсирующего гидродинамического давления в неподвижной точке пространства, занятого турбулентным потоком. Операция осреднения давления для данной точки пространства описывается формулой

$$\bar{p}(x, y, z) = \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} p_{\text{ак}} dt$$

где $t_0 = t_2 - t_1$ – период осреднения, который должен быть велик по сравнению с наибольшим периодом случайных колебаний актуального давления $p_{\text{ак}}$. Если осредненное движение является неустановившимся, то период осреднения t_0 должен быть мал по сравнению с продолжительностью изменения элементов осредненного движения.

41. **Давление гидростатическое** $\{p, \text{Па}\}$ – величина давления равная пределу отношения элементарной силы гидростатического давления δP к величине, соответствующей элементарной площадке действия δS , при стремлении δS к нулю (при стягивании контура элементарной площадки в точку):

$$p = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \left(\frac{\delta P}{\delta S} \right).$$

Величина гидростатического давления не зависит от ориентировки элементарной площадки действия, намеченной в данной точке; давление p является сжимающим и действует нормально к рассматриваемой площадке. Понятие гидростатического давления в точке p и понятие сжимающего нормального напряжения σ (которое в данном случае можно рассматривать как скалярную величину) является тождественными.

42. **Давление избыточное (манометрическое, сверхатмосферное)** $\{p_{\text{изб}}, p_m, \text{Па}\}$ – давление в точке, уменьшенное на величину атмосферного давления $p_{\text{атм}}$ (превышение абсолютного давления над атмосферным):

$$p_{\text{изб}} = p_m = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}.$$

Величиной $p_{\text{изб}}$, как правило, оперируют при измерении давления и практических расчетах, причем для сокращения речи опускают слово избыточное (манометрическое).

43. **Давление молекулярное** – нормальное к свободной поверхности жидкости давление, развиваемое весьма тонким поверхностным слоем жид-

кости и обусловленное взаимодействием молекул, образующих её. Величина молекулярного давления для воды (развиваемого плоским поверхностным слоем её) достигает 1100 МПа. Внешне молекулярное давление, как правило, не проявляется (исключение составляют капиллярные явления).

44. **Давление, отвечающее скоростному напору (скоростное давление)** $\{p_v, \text{Па}\}$ – давление соответствующее скоростному напору (h_v).

$$p_v = \rho g h_v.$$

45. **Движение безвихревое (потенциальное)** – движение, при котором главные оси деформации элементарных частиц жидкости не вращаются (движутся поступательно). Потенциальное движение характеризуется в случае одномерной области наличием потенциальной функции (потенциала) векторного поля скорости.

46. **Движение безнапорное** – движение (течение) жидкости (в русле), при котором поток имеет свободную поверхность. В одном случае поток может не иметь свободной поверхности: когда в случае закрытого русла пьезометрическая линия потока совпадает с «потолком» русла. Движение осуществляется только за счет силы тяжести.

47. **Движение безотрывное** – движение (течение) жидкости, при котором водоворотные (вальцовые) области отсутствуют.

48. **Движение быстро изменяющееся** – неустановившееся движение, при котором в каждой неподвижной точке пространства, занятого движущейся жидкостью, скорость движения ее частиц существенно изменяется во времени. В этом случае при выполнении тех или других расчетов недопустимо пренебрегать локальными силами инерции.

49. **Движение в виде свободной струи** – движение (течение), при котором поток жидкости (струя) вовсе не ограничен твердыми стенками.

50. **Движение винтообразное** – движение (течение) жидкости, приближающееся к винтовому движению (при котором направление вектора угловой скорости равномерного вращения частиц жидкости совпадает с направлением вектора скорости равномерного поступательного движения частиц жидкости). Винтообразное движение, благодаря действию сил инерции, возникает, в частности, при повороте русла (в напорном или безнапорном движении).

51. **Движение вихревое** – движение (течение) жидкости, при котором элементарные частицы её вращаются с некоторой угловой скоростью относительно своих мгновенных осей (имеется в виду вращение главных осей де-

формации элементарных частиц). Вихревое движение в отличие от безвихревого характеризуется отсутствием потенциальных функций (потенциала) векторного поля скоростей.

52. Движение ламинарное или ламинарный режим движения - движение (течение) жидкости, при котором частицы жидкости перемещаются по траекториям, направленным вдоль общего течения, без поперечного перемешивания, причем пульсации скорости и давления отсутствуют.

53. Движение линейное или линейная задача о движении жидкости – частный случай пространственного и плоского движения, когда гидромеханические параметры жидкости (скорость, давление) могут быть представлены, для данного момента времени, зависящими только от одной координаты пространства, отмеряемой обычно по известной нам оси потока (прямолинейной или криволинейной), вдоль которой изменяется состояние потока (скорость и давление); в направлениях, перпендикулярных к этой оси, состояние потока считается неизменным.

54. Движение медленно изменяющееся – неустановившееся движение, при котором в каждой неподвижной точке пространства, занятого движущейся жидкостью, скорость движения её частиц изменяются во времени весьма мало. В этом случае при выполнении тех или других расчетов представляется возможным пренебрегать локальными силами инерции.

55. Движение напорное – движение (течение), при котором поток жидкости со всех боковых сторон окружён твердыми стенками (не имеет свободной поверхности). Движение осуществляется за счет сил тяжести и сил инерции.

56. Движение неравномерное – движение (течение) жидкости, когда эпюры скоростей являются разными (в данный момент времени) для различных живых сечений потока; при этом средняя скорость и площадь живого сечения могут быть переменными или постоянными вдоль потока (в данный момент времени). Приведенное определение охватывает только течение несжимаемой жидкости, плавно изменяющееся и мало отличающееся от него.

57. Движение неустановившееся (или нестационарное) – движение (течение) жидкости, при котором в каждой неподвижной точке пространства, занятого движущейся жидкостью, скорость движения её частиц изменяется с течением времени по величине и (или) по направлению. Данное определение относится только к случаю движения несжимаемой жидкости.

58. **Движение осесимметричное** – частный случай пространственного движения, при котором поля скоростей (и ускорений) оказываются одинаковыми (в данный момент времени) для всех плоскостей, проходящих через одну и ту же прямую, являющуюся осью симметрии данного поля скоростей (векторы скорости и ускорений здесь должны лежать в упомянутых плоскостях).

59. **Движение плавно изменяющееся** – неравномерное движение (течение) жидкости, при котором кривизной линии тока и углом расхождения между ними можно пренебречь, причем живые сечения представляется возможным считать плоским. При замене несколько искривленного живого сечения плоским расчетным сечением приходится пренебрегать составляющими скоростей и ускорений, лежащими в плоскости расчетного сечения. Гидродинамическое давление в плоских расчетных живых сечениях при плавно изменяющемся установившемся движении распределяется по гидростатическому закону.

60. **Движение плоское или плоскопараллельное** – частный случай пространственного движения, одновременно удовлетворяющий двум условиям: а). в данный момент времени область движения можно пересечь такими плоскими параллельными поверхностями, в которых лежат векторы скоростей и ускорений, отвечающие всем точкам этих поверхностей; б). во всех точках любого перпендикуляра, проведенного к указанным поверхностям, скорости и ускорения в данный момент времени одинаковы.

61. **Движение пространственное** – общий случай движения (течения) жидкости, заполняющий определенное пространство.

62. **Движение равномерное или параллельноструйное** – движение (течение) жидкости, при котором площадь живого сечения, а также форма и размеры эпюры скоростей, являются в данный момент времени неизменными вдоль потока. При равномерном (параллельноструйном) движении живые сечения являются плоскими; средняя скорость постоянна вдоль потока (в данный момент времени). Равномерное движение всегда является прямолинейным: линии тока в случае такого движения представляют собой систему прямых параллельных линий. Гидродинамическое давление в живых сечениях, при равномерном установившемся движении распределяется по гидростатическому закону. Не следует смешивать понятие равномерного (или неравномерного) движения данной частицы жидкости с понятием равномерного (или неравномерного) движения жидкости (то есть движения множества частиц

жидкости). Например, неустановившееся движение несжимаемой жидкости в напорном трубопроводе (стенки которого не деформируются) может быть равномерным в данный момент времени; вместе с тем отдельные частицы жидкости в этом случае будут двигаться неравномерно (во времени) – ускоренно или замедленно.

63. **Движение резко изменяющееся** – неравномерное движение, при котором кривизной линий тока и (или) углом расхождения между ними пренебрегать нельзя, причем живые сечения не представляется возможным считать плоскими.

64. **Движение турбулентное или турбулентный режим движения** – движение (течение) жидкости, при котором (в отличие от ламинарного движения) частицы жидкости перемещаются по случайным неопределённо искривленным траекториям, имеющим пространственную форму; при этом движении траектории частиц, проходящих в разные моменты времени через неподвижную точку пространства имеют различный вид (занимают разное положение в пространстве и имеют различную форму); данное движение носит беспорядочный хаотический характер и сопровождается постоянным, как бы поперечным, перемешиванием жидкости, причем это движение характеризуется наличием пульсации скорости и пульсации движения.

65. **Движение установившееся или стационарное** – движение (течение) жидкости, при котором каждая неподвижная точка пространства, занятого движущейся жидкостью, характеризуется определенной скоростью течения, неизменной во времени по величине и по направлению. В случае сжимаемой жидкости необходимо требовать, чтобы в каждой неподвижной точке пространства плотность жидкости не изменялась во времени.

66. **Деаэрация (дезаэрация) потока жидкости** – снижение степени насыщения аэрированного потока жидкости пузырьками воздуха за счет выхода этих пузырьков через свободную поверхность наружу (или за счет растворения воздуха в жидкости).

67. **Динамика жидкости или гидродинамика** – раздел механики жидкости (гидромеханики), в котором изучается движение жидкости, обусловленное действием приложенных к ней внешних сил.

68. **Динамически или гидродинамически подобные потоки** – кинематически подобные потоки, удовлетворяющие условиям: а) в сходственных точках приложены одноименные силы; б) векторные поля сил, действующих

на жидкость, для рассматриваемых потоков являются геометрически подобными и одинаково ориентированными относительно границ потоков.

69. Дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости или уравнения Эйлера для движущейся невязкой жидкости – уравнения динамического равновесия единицы массы идеальной (невязкой) жидкости:

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{du_x}{dt};$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{du_y}{dt};$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{du_z}{dt},$$

где x, y, z – координаты точки неподвижного пространства, в которой находится рассматриваемая единица массы движущейся жидкости;

X, Y, Z – проекции массовых сил (ускорений) на координатные оси;

ρ – плотность жидкости;

p – гидростатическое давление;

u_x, u_y, u_z – проекции вектора скорости на соответствующие оси x, y, z ;

t – время.

70. Дифференциальное уравнение равновесия (покоя) жидкости или уравнения Эйлера для жидкости, находящей в равновесии (в покое) – уравнение равновесия единицы массы жидкости:

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0;$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0;$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0.$$

где x, y, z – координаты точки неподвижного пространства, в которой находится рассматриваемая единица массы движущейся жидкости;

X, Y, Z – проекции массовых сил (ускорений) на координатные оси;

p – гидростатическое давление;

ρ – плотность жидкости.

71. Диффузор – напорная труба, постепенно расширяющаяся по течению, характеризуемая двумя параметрами: углом конусности и степенью расширения потока.

Ж

72. **Живое сечение** – поверхность, проведенная нормально к линиям тока и находящаяся внутри потока.

73. **Жидкая частица** – бесконечно малый объём жидкости, в котором находится достаточно много молекул жидкости.

74. **Жидкость** – физическое тело, обладающее свойством текучести (легкой подвижностью частиц под действием касательных напряжений).

75. **Жидкость аномальная** – физическое тело, отличающееся от жидкости только тем, что оно в состоянии покоя может воспринимать некоторые, относительно небольшие касательные напряжения.

76. **Жидкость Бингама** – воображаемая модель аномальной жидкости, отличающаяся от ньютоновской жидкости тем, что при градиенте скорости по нормали $\frac{du}{dn}$, равном нулю, величина продольных касательных напряжений внутреннего трения τ (при прямолинейном её движении) не равна нулю. Величина касательных напряжений для жидкостей Бингама выражается зависимостью

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dn},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости Па*с,
 τ_0 – начальное (предельное) напряжение сдвига, Па.

77. **Жидкость газообразная (сжимаемая)** – жидкость, занимающая все предоставленное ей пространство, значительно изменяющая свой объём (плотность), сжимаясь и расширяясь под действием сил. Газы легко изменяют как объём, так и форму.

78. **Жидкость двухфазная (многофазная)** – жидкость, содержащая примеси: твердые частицы, капли другой жидкости, пузырьки газа или пузырьки пара (данной жидкости); указанные примеси в виде твёрдых частиц или капель другой жидкости могут быть легче или тяжелее соответствующих рассматриваемых объёмов. Жидкость, не содержащую перечисленных выше компонентов, называется **однофазной**.

79. **Жидкость идеальная** – воображаемая модель реальной жидкости, представляющая собой непрерывное жидкое тело, обладающее абсолютной подвижностью (лишенную вязкости), абсолютной неизменяемостью объёма (при изменении давления и температуры), абсолютно неспособную сопротивляться разрыву.

80. **Жидкость капельная (несжимаемая)** – жидкость, обладающая вполне определенным объёмом (плотностью), практически не сжимающаяся и не расширяющаяся под действием сил. Капельные жидкости легко изменяют форму (в отличие от твердых тел), но с трудом изменяют объём.

81. **Жидкость неньтоновская** – воображаемая модель жидкости, представляющая собой жидкое непрерывное тело, для которого продольные касательные напряжения внутреннего трения τ при прямолинейном движении жидкости прямо пропорциональны градиенту скорости по нормали $\frac{du}{dn}$ в степени m , отличной от единицы:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dn} \right)^m .$$

82. **Жидкость неоднородная** – жидкость, имеющая в данный момент времени в точках пространства, занятого ею, разные физико-механические свойства.

83. **Жидкость ньютоновская** – воображаемая модель жидкости, представляющая собой непрерывное жидкое тело, для которого продольные касательные напряжения внутреннего трения τ при прямолинейном движении жидкости прямо пропорциональны первой степени градиента скорости по нормали $\frac{du}{dn}$:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} .$$

84. **Жидкость однородная** – жидкость, имеющая в данный момент времени в точках пространства, занятого ею, одинаковые физико-механические свойства.

85. **Жидкость Шведова** – воображаемая модель аномальной жидкости, отличающаяся от неньютоновской жидкости тем, что при градиенте скорости по нормали $\frac{du}{dn}$, равном нулю, величина продольных касательных напряжений внутреннего трения τ для жидкости Шведова (при прямолинейном её движении) не равна нулю. В связи с этим величина τ для жидкости Шведова выражается зависимостью

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dn} \right)^m .$$

З

86. **Задача одномерная, двухмерная или трехмерная** – задача о движении жидкости (линейном, плоском, осесимметричном и т.п.), решение которой приводит к гидромеханическим параметрам жидкости (скорости, давлению), зависящим соответственно от одной, двух или трех координат пространства. Для заданного случая движения жидкости та или другая из названных задач зависит от принятой системы координат пространства.

87. **Затопленное отверстие** – отверстие, при истечении из которого расход и (или) отметка уровня жидкости в верхнем бьефе зависят от отметки уровня жидкости в нижнем бьефе.

88. **Зона или область гидравлического сопротивления** – зона или область соответствующего графика, например графика Никурадзе, отвечающая сочетанию таких параметров потока, при которых имеет место вполне определенная зависимость потерь напора по длине от средней скорости V и относительной шероховатости стенок русла Δ_r .

89. **Зона ламинарного режима** – зона сопротивления, отвечающая ламинарному режиму движения, при котором потери напора по длине h_l не зависят от относительной шероховатости Δ_r и являются прямо пропорциональными средней скорости V в первой степени.

90. **Зона переходного режима или неустойчивая зона** – зона соответствующего графика, располагающаяся между зонами ламинарного и турбулентного режимов движения. Характеризующаяся тем, что в рассматриваемом потоке может иметь место «затянувшийся» ламинарный режим движения (получающийся при увеличении во времени средней скорости); этот ламинарный режим может смениться устойчивым турбулентным режимом.

91. **Зона турбулентного режима** – зона сопротивления, отвечающая турбулентному движению, при котором потери напора по длине h_l прямо пропорциональны средней скорости V в степени m .

И

92. **Инверсия струи** – изменение формы поперечного сечения струи (по её длине) вблизи отверстия, из которого происходит истечение жидкости в атмосферу. Инверсия струи возникает при истечении из отверстия, имеющего некруглую форму, и в тех случаях, когда скорости подхода жидкости к отверстию оказываются неодинаковыми для разных участков его периметра.

93. **Инфильтрация жидкости** – просачивание жидкости с поверхности грунта внутрь его порового пространства.

К

94. **Кавитация** – возникновение при снижении гидродинамического давления пузырьков пара (или паровоздушных пузырьков) в толще движущейся жидкости (или у стенки русла) и захлопывание (в отличие от случая кипения) этих пузырьков внутри жидкости (без выхода их из неё) в зоне, где гидродинамическое давление повышается.

95. **Капиллярное поднятие** – поднятие свободной поверхности жидкости в «смачиваемой» капиллярной трубке или в «смачиваемом» мелкопористом твердом теле, обусловленное действием молекулярного давления. В этом случае свободная поверхность жидкости имеет вид или вогнутого мениска или поверхности, образованной многими вогнутыми менисками. В жидкости, поднявшейся по капиллярам, имеет место вакуум.

96. **Кинематика жидкости** – часть раздела гидравлики, называемого динамикой жидкости (гидродинамикой), в которой изучается движение жидкости без рассмотрения сил, определяющих это движение.

97. **Кинематически подобные потоки** – геометрически подобные потоки, для которых векторные поля скоростей и ускорений, являются геометрически подобными и одинаково ориентированными относительно границ потока. Траектории, описываемые сходственными частицами кинематически подобных потоков, должны быть также геометрически подобными и одинаково ориентированными относительно границ.

98. **Кипение** – возникновение в жидкости пузырьков, заполненных её парами и выходящих (в отличие от случая кавитации) через свободную поверхность жидкости наружу.

99. **Кольматаж грунта** – явление выпадения из воды (фильтрующейся в порах грунта или находящейся над ним) взвешенных частиц грунта. Эти частицы могут отлагаться или в толще грунта (в его поровом пространстве) или на его поверхности.

100. **Компоненты, или составляющие, или проекции скорости** (u_x , u_y , u_z) – проекции вектора u на ортогональные декартовы оси координат x , y , z .

101. **Конфузор** – напорная труба, сужающаяся по течению.

102. **Корректив кинетической энергии или коэффициент Кориолиса или коэффициент учитывающий неравномерность распределения скорости в потоке** $\{\alpha, 1\}$ – безразмерная величина, равная отношению кинетической энергии массы жидкости, протекающей за некоторый отрезок вре-

мени через данное плоское живое сечение, к условной кинетической энергии той же массы жидкости, подсчитанной в предположении, что во всех точках рассматриваемого живого сечения величины скорости одинаковы и равны средней скорости V ;

$$\alpha = \frac{\int u^3 d\omega}{V^3 \omega},$$

где u – действительная скорость в различных точках живого сечения (имеющую различную величину в этих точках), м/с;

ω – площадь живого сечения, м².

103. Коэффициент количества движения или коэффициент Буссинеска $\{\alpha_0, 1\}$ – безразмерная величина, равная отношению количества движения массы жидкости, протекающей за некоторый отрезок времени через данное живое сечение, к условному количеству движения той же массы жидкости, подсчитанному в предположении, что во всех точках рассматриваемого живого сечения величины скорости одинаковы и равны средней скорости V ; величина

$$\alpha_0 = \frac{\int u^2 d\omega}{V^2 \omega},$$

где u – действительная скорость в различных точках живого сечения (имеющую различную величину в этих точках), м/с;

ω – площадь живого сечения, м².

104. Коэффициент динамической вязкости, или коэффициент вязкости или коэффициент молекулярной (физической) вязкости $\{\mu, \text{Па}\cdot\text{с}\}$ – отношение продольного касательного напряжения внутреннего трения при прямолинейном движении жидкости к градиенту скорости по нормали $\frac{du}{dn}$; коэффициент пропорциональности в уравнении жидкостного трения Ньютона.

105. Коэффициент гидравлического трения или коэффициент Дарси $\{\lambda, 1\}$ – безразмерный коэффициент пропорциональности в формуле Вейсбаха-Дарси, зависящий в самом общем случае только от относительной шероховатости стенок русла и от числа Рейнольдса. Величина λ для круглых и некоторых прямоугольных напорных труб определяется по специальным графикам (таблицам) или по особым (эмпирическим для турбулентного движения) формулам.

106. **Коэффициент лобового сопротивления** $\{c_x, 1\}$ – безразмерный эмпирический коэффициент, входящий в формулу для силы R_x лобового сопротивления твердого тела; для квадратичной области сопротивления величина c_x зависит только от формы тела и шероховатости поверхности, а также от положения (от ориентировки) этого тела в потоке. Для некоторых случаев тел простейшей геометрической формы (шара, цилиндра и тому подобных) величина c_x может быть получена теоретическим путем.

107. **Коэффициент объёмного сжатия жидкости** $\{\beta_p, \text{Па}^{-1}\}$, где p – символ давления} – отношение относительного уменьшения объёма жидкости (то есть величины $\Delta W/W$) к нормальному напряжению всестороннего равномерного сжатия данного объёма (изменению гидростатического давления Δp):

$$\beta_w = \frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta p}.$$

При более точном определении надлежит брать отношение соответствующих приращений двух указанных величин. Коэффициент объёмного сжатия жидкости является величиной, обратной модулю упругости.

108. **Коэффициент расхода отверстия или насадка** $\{\mu_{отв}, \mu_{нас}, 1\}$ – безразмерный коэффициент, входящий в формулу для расхода, получающегося в случае истечения жидкости из отверстия в тонкой стенке или насадка:

$$Q_{отв} = \mu_{отв} \omega \sqrt{2gH} \quad \text{или} \quad Q_{отв} = \mu_{отв} \omega \sqrt{2gZ};$$

$$Q_{нас} = \mu_{нас} \omega \sqrt{2gH} \quad \text{или} \quad Q_{нас} = \mu_{нас} \omega \sqrt{2gZ},$$

где: ω – площадь живого сечения отверстия в тонкой стенке, или площадь выходного живого сечения насадка, м^2 ;

H – заглубление центра отверстия или выходного сечения насадка под уровень жидкости (при истечении в атмосферу), м;

Z – разность уровней жидкости перед и за отверстием или насадком (при истечении через затопленные отверстие или насадки), м.

Коэффициент $\mu_{отв}$ учитывает сжатие струи и потери напора; коэффициент $\mu_{нас}$ учитывает только потери напора. Для квадратичной области сопротивления (имеющей место при достаточно больших числах Рейнольдса) величины $\mu_{отв}$ и $\mu_{нас}$ зависят только от геометрической формы потока.

109. **Коэффициент расхода простого, короткого трубопровода** $\{\mu_m, 1\}$ – безразмерный коэффициент, входящий в формулу для расхода Q , получающегося в случае простого короткого трубопровода постоянного диаметра;

$$Q = \mu_m \omega \sqrt{2gH} \text{ или } Q = \mu_m \omega \sqrt{2gZ};$$

где: ω – площадь живого сечения трубопровода, м²;

H – напор на трубопроводе (при истечении в атмосферу), м;

Z – геометрический напор на сооружении (при истечении под уровень),

м.

110. Коэффициент сжатия струи (при истечении из отверстия или насадка) $\{\varepsilon, 1\}$ – отношение площади живого сечения струи в сжатом сечении к площади отверстия или насадка, из которого происходит истечение жидкости.

111. Коэффициент скорости $\{\varphi, 1\}$ – безразмерный коэффициент, равный отношению средней скорости в том или другом живом сечении потока к скорости, вычисленной согласно уравнению Бернулли для этого же сечения в предположении, что жидкость является невязкой (идеальной). Данный коэффициент учитывает в формуле Торричелли потери напора на определенном участке потока (до рассматриваемого живого сечения). Коэффициент φ всегда меньше единицы (только для идеальной жидкости $\varphi=1,0$).

112. Коэффициент сопротивления или коэффициент потерь напора $\{\zeta, 1\}$ – безразмерный коэффициент, равный потери напора (по длине h_l или местной h_m), делённой:

а) для обычных потоков жидкости – на скоростной напор,

б) для фильтрационных ламинарных потоков – на приведённый расход.

При помощи этого коэффициента потери напора h_l или h_m выражаются формулами:

а) для обычных потоков

$$h_l = \zeta \frac{V^2}{2g} \text{ или } h_m = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

б) для фильтрационных потоков

$$h_l = \zeta \frac{q}{k} = \zeta q_r \text{ или } h_l = \zeta \frac{q}{k} = \zeta q_r .$$

Для местных потерь напора, относящихся к квадратичной области сопротивления обычных потоков, и для ламинарных фильтрационных потоков, величина ζ зависит только от геометрической формы потока. Для потерь напора по длине, относящихся к квадратичной области сопротивления обычных потоков, величина ζ зависит дополнительно ещё и от относительной шероховатости русла. Величина ζ обычно устанавливают экспериментальным путем и приводят их в справочной литературе; в отдельных частных случаях ζ может

быть найдено теоретическим путем. У коэффициента ζ проставляют различные индексы, для того чтобы указать, к какому именно частному случаю относится данный коэффициент сопротивления.

113. Коэффициент сопротивления полный (или коэффициент сопротивления системы) $\{\zeta_f, 1\}$ – безразмерный коэффициент, равный полной потери напора, деленной:

- а. для обычных потоков жидкости – на скоростной напор;
- б. для фильтрационных потоков – на приведенный расход.

Величина ζ_f определяется по формуле

$$\zeta_f = \sum \zeta_i + \sum \zeta_j.$$

114. Коэффициент температурного расширения жидкости $\{\beta_T, K^{-1}\}$, где T – символ температуры} – отношение относительного увеличения объема жидкости $\delta W/W$, к соответствующему приращению температуры δT .

$$\beta_T = \frac{1}{W} \frac{\delta W}{\delta T}.$$

115. Коэффициент фильтрации $\{k, \text{м/с}\}$ – коэффициент пропорциональности в формуле Дарси, величина которого зависит от рода пористого тела и вязкости фильтрующей жидкости; этот коэффициент характеризует степень проницаемости (водопроницаемости) рассматриваемого пористого тела; величина его равна скорости фильтрации, получающейся при фильтрации (ламинарной) данной жидкости через рассматриваемое пористое тело в условиях, когда пьезометрический уклон равен единице.

116. Коэффициент Шези $\{C, \text{м}^{1/2}/\text{с}\}$ – эмпирический коэффициент, входящий в формулу Шези. Для определения коэффициента C в литературе приводятся много эмпирических формул, предложенных разными авторами. Эти формулы в большинстве случаев относятся к квадратичной области сопротивления, когда C зависит только от гидравлического радиуса и коэффициента шероховатости; для докватричной области величина C зависит от гидравлического уклона или Re .

117. Коэффициент шероховатости $\{n\}$ – определяемое на основании опытов число, характеризующее степень шероховатости стенок русла (величину выступов шероховатости, их форму и т.п.); коэффициент n вводится в эмпирические формулы, служащие для вычисления коэффициента Шези C , а также и коэффициента гидравлического сопротивления λ . Размерность n может быть различной (в зависимости от вида используемой эмпирической формулы, служащей для вычисления C).

118. **Кривая депрессии** – кривая свободной поверхности фильтрационного потока. При наличии капиллярного поднятия воды в грунте кривая депрессии является линией равного давления (атмосферного); свободной поверхностью в этом случае является поверхность мениска. При отсутствии капиллярного поднятия и инфильтрации кривая депрессии установившегося фильтрационного потока является линия тока.

119. **Кривая свободной поверхности потока** – линия пересечения свободной поверхности потока с продольной (по отношению к потоку) вертикальной плоскостью.

120. **Критерий динамического подобия** - безразмерные комплексы, составленные из различных параметров потока, как, например, безразмерное число Рейнольдса, безразмерное число Фруда и т.п.. Равенство этих безразмерных чисел для натурального явления и для материальной модели его указывает (при определенных дополнительных условиях) на наличие динамического подобия между натурой и моделью.

Л

121. **Ламинарный или вязкий подслой** – слой ламинарно движущейся жидкости (весьма тонкий по сравнению с пограничным пристенным слоем), возникающий у стенок русла при турбулентном движении.

122. **Линия или поверхность равного давления** – геометрическое место точек (намеченных в пространстве, занятом движущейся жидкостью), для которых (в данный момент времени) величина полного напора H является постоянной:

$$H = \text{const.}$$

123. **Линия или поверхность равного потенциала (эквипотенциаль или эквипотенциальная поверхность)** – геометрическое место точек (намеченных в пространстве, занятом движущейся жидкостью), в которых рассматриваемая потенциальная функция (φ или U) имеет одинаковую величину (в данный момент времени).

124. **Линия напорная (фактическая напорная линия) $\{N - N\}$** – 1) линия, каждая точка которой возвышается над плоскостью сравнения на величину полного напора, отвечающего соответствующему живому сечению потока или точке рассматриваемой линии тока; 2) линия, проведенная по горизонтам жидкости в трубках Пито (открытого или закрытого типа), мысленно установленных вдоль оси потока или вдоль рассматриваемой элементарной струйки. Фигура, ограниченная напорной линией и плоскостью сравне-

ния, представляет собой эпюру изменения полного напора вдоль потока (или элементарной струйки). Фигура, ограниченная напорной линией и пьезометрической линиями, представляет собой эпюру изменения скоростного напора вдоль потока (или элементарной струйки), поскольку напорная линия возвышается относительно пьезометрической линии на величину скоростного напора.

125. **Линия пьезометрическая** $\{P - P\}$ – 1) линия, каждая точка которой возвышается над плоскостью сравнения на величину потенциального напора, отвечающего соответствующему живому сечению потока или точке рассматриваемой линии тока; 2) линия, проведенная по горизонтам жидкости в пьезометрах (открытого или закрытого типа), мысленно установленных вдоль оси потока или вдоль рассматриваемой элементарной струйки. Фигура, ограниченная пьезометрической линией и плоскостью сравнения, представляет собой эпюру изменения потенциального напора вдоль потока (или элементарной струйки). В случае безнапорного движения пьезометрическая линия часто совпадает со свободной поверхностью потока.

126. **Линия тока** – кривая, проведенная внутри потока, так что в данный момент времени векторы скорости во всех точках этой кривой касательные к ней. При установившемся движении линии тока являются траекториями движущихся частиц. При неустановившемся движении линии тока, в общем случае, не совпадают с траекториями движущихся частиц и изменяют в пространстве свое местоположение и форму с течением времени.

М

127. **Массовая сила, отнесенная к единице массы, и проекции её на оси x, y, z** $\{X, Y, Z\}$ – величины равные соответственно:

$$X = \frac{dU_x}{dt}; \quad Y = \frac{dU_y}{dt}; \quad Z = \frac{dU_z}{dt}.$$

где t – время;

$U_x; U_y; U_z$ – проекции вектора скорости U на оси координат.

128. **Масштабы сил F , скоростей местной U и средней V и т.д.**

$$\alpha_F = \frac{F_m}{F_n}; \quad \alpha_U = \frac{U_m}{U_n}; \quad \alpha_V = \frac{V_m}{V_n}; \text{ и т.д.,}$$

где индексами «м» обозначены величины, относящиеся к материальной модели, и индексами «н» соответствующие сходственные величины, относящиеся к натурному потоку.

128. **Метацентр плавающего тела** – точка пересечения оси плавания с вертикалью, проведенной через центр водоизмещения, при рассмотрении поперечного сечения плавающего тела.

129. **Метацентрическая высота плавающего тела** $\{h_m; \text{м}\}$ – расстояние между метацентром и центром тяжести плавающего тела, отмеренное по оси плавания.

130. **Метацентрический радиус плавающего тела** $\{r_m; \text{м}\}$ – радиус дуги окружности, аппроксимирующей кривую, описываемую при крене центром водоизмещения тела.

131. **Метод электрогидродинамических аналогий (метод ЭГДА)** – метод, позволяющий экспериментально, при помощи математического моделирования, решать самые различные задачи о потенциальном движении жидкости. Данный метод предусматривает создание из того или другого электропроводного материала модели, как правило, геометрически подобной действительной области движения жидкости. Дополнительно используются особое электрическое устройство, которое позволяет: а) пропускать в соответствующем направлении через электропроводную модель постоянный электрический ток; б) определять электрические потенциалы в отдельных точках модели. На основании таких опытов строятся линии (или поверхности) равного электрического потенциала, которые совпадают с искомыми линиями (или поверхностями) равного напора (соответствующего наименования). В случае плоской задачи при помощи метода ЭГДА строят гидродинамическую сетку.

132. **Механика жидкости или гидромеханика** – наука, в которой изучается равновесие и движение жидкости, а также механическое взаимодействие между жидкостью и твердыми телами (или стенками), омываемыми (смачиваемыми) ею.

133. **Моделирование математическое** – создание материальной модели, имеющей отличие от действительного явления, физическое содержание, которое описывается теми же математическими уравнениями, что и изучаемое действительное явление.

134. **Моделирование физическое** – создание материальной модели, имеющей ту же физическую природу (то же физическое содержание), что и действительное изучаемое явление (процесс, состояние жидкости).

135. **Модель жидкости воображаемая (расчетная)** – воображаемое (не существующее в природе) тело, которым при теоретическом анализе

различных явлений мысленно заменяют действительную (реальную) жидкость (с целью упрощения этого анализа, а также в связи с недостаточностью сведений о рассматриваемом явлении).

136. Модель материальная – в отличие от воображаемой модели воспроизведенное (в определенном масштабе) при помощи различных устройств (конструкций) то или другое материальное тело, являющееся моделью действительного изучаемого тела (или процесса).

137. Модель Рейнольдса-Буссинеска или осреднённый поток - воображаемая (расчетная) модель потока (используемая при изучении турбулентного движения потока жидкости), представляющая собой условный (фиктивный) поток жидкости, частицы которого движутся со скоростями, равными осредненным местным (продольным) скоростям; гидродинамическое же давление в различных неподвижных точках пространства, занятого этим потоком равно осреднённым местным давлениям. Переходя от действительного турбулентного потока к указанной модели, исключают из рассмотрения пульсации продольных и поперечных составляющих актуальной скорости, а также пульсацию давления.

138. Модуль расхода или расходная характеристика $\{K, \text{м}^3/\text{с}\}$

$$K = \frac{Q}{\sqrt{I}}, \text{ или } K = \omega C \sqrt{R}.$$

где Q – расход жидкости, м^3 ;

I – гидравлический уклон;

ω – площадь живого сечения, м^2 ;

C – коэффициент Шези, $\text{м}^{0,5}/\text{с}$;

R – гидравлический радиус, м.

Модуль расхода равен расходу Q , получающемуся при $I=1,0$.

139. Модуль скорости или скоростная характеристика $\{W, \text{м}/\text{с}\}$

$$W = \frac{V}{\sqrt{I}}, \text{ или } W = C \sqrt{R},$$

где V – средняя скорость, $\text{м}/\text{с}$;

I – гидравлический уклон;

C – коэффициент Шези, $\text{м}^{0,5}/\text{с}$;

R – гидравлический радиус, м.

Модуль скорости равен скорости V , получающейся при $I=1,0$.

Н

140. **Напор геометрический** $\{z, \text{м}\}$ – удельная потенциальная энергия положения единицы веса жидкости, равная превышению точки, в которой намечена рассматриваемая единица веса жидкости, над плоскостью сравнения.

141. **Напор давления или пьезометрический** $\{h_A$ или $h_{изб}, \text{м}\}$ – удельная потенциальная энергия давления единицы веса жидкости, равная пьезометрической высоте, отвечающей точке, в которой намечена рассматриваемая единица веса жидкости:

$$h_A = \frac{P_{абс}}{\rho g} \quad \text{или} \quad h_{изб} = \frac{P_{абс} - P_{атм}}{\rho g}.$$

Надлежит различить напор давления h_A , отвечающий абсолютному давлению $P_{абс}$ и напор давления $h_{изб}$, отвечающий избыточному давлению $P_{абс} - P_{атм}$.

142. **Напор или полный напор** $\{H_e, \text{м}\}$ – полная удельная энергия единицы веса потока жидкости; полный напор равен сумме напоров потенциального и скоростного (кинетического):

$$H_e = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g},$$

где z – геометрический напор, м;

$\frac{p}{\rho g}$ – пьезометрический напор, м;

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ – скоростной напор, м.

Надлежит различать полный напор, отвечающий абсолютному давлению и полный напор, отвечающий избыточному давлению. Напор обычно используется при рассмотрении равномерного и плавно изменяющегося движения.

143. **Напор инерционный** $\{h_i, \text{м}\}$ – величина изменения полного напора на пути от «первого» живого сечения до «второго» живого сечения, соединяемых уравнением Бернулли, за счет изменения по времени удельной кинетической энергии единицы веса объёма жидкости, заключенного (в данный момент времени) между двумя упомянутыми живыми сечениями.

В случае плавно изменяющегося движения (на пути от «первого» до «второго» живого сечения) величина инерционного напора равно:

$$h_i = \frac{\alpha_0}{g} \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial V}{\partial t} dS = \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} \int_{s_1}^{s_2} \frac{dS}{\omega},$$

где α_0 – корректив количества движения;

V – средняя скорость, м/с;

t – время, с;

S – расстояние между выбранными сечениями, м;

ω – площадь живого сечения, м².

При выводе этого выражения допускатось, что α_0 не изменяется во времени и по длине потока.

144. Напор на малом отверстии или насадка при истечении жидкости в атмосферу $\{H, \text{м}\}$ – превышение уровня жидкости в сосуде (или водоеме) над центром тяжести малого отверстия или выходного сечения насадка при истечении из отверстия или насадка в атмосферу.

145. Напор на трубопроводе (при истечении в атмосферу) $\{H, \text{м}\}$ – превышение уровня жидкости в сосуде (или водоеме), питающем трубопровод, над центром тяжести выходного сечения трубопровода (при истечении жидкости в атмосферу, когда давление, как сверху, так и снизу струи, выходящей из трубопровода, равно атмосферному).

146. Напор потенциальный $\{H_A, \text{м}\}$ – полная удельная потенциальная энергия единицы веса жидкости;

$$H_A = z + \frac{P_{абс}}{\rho g} \text{ или } H = z + \frac{P_{абс} - P_{атм}}{\rho g}.$$

Надлежит различать потенциальный напор H_A отвечающий абсолютному давлению $P_{абс}$, и потенциальный напор отвечающий избыточному давлению $P_{абс} - P_{атм}$.

147. Напор скоростной (кинетический) $\{h_v, \text{м}\}$ – удельная кинетическая энергия единицы веса жидкости:

$$h_v = \frac{\alpha V^2}{2g},$$

где V – средняя скорость, м/с.

Величина h_v близка к величине разности горизонтов жидкости в пьезометре и в трубке Пито, подключенным к данной точке движущейся жидкости.

148. Напряжение внешнего (наружного) трения $\{\tau_0, \text{Па}\}$ – касательное напряжение для площадки действия, намеченной (в данной точке) на боковой поверхности потока или на боковой поверхности, выделенной в потоке струи.

149. Напряжение внутреннего трения $\{\tau, \text{Па}\}$ – касательное напряжение для площадки действия заданной ориентировки, намеченной в точке находящейся внутри рассматриваемого потока.

150. **Насадок (или насадка)** – короткий напорный трубопровод длиной $l=(3-5d)$; при гидравлическом расчете можно пренебрегать потерями напора по длине (необходимо учитывать только местные потери напора).

151. **Насадок Борда или внутренний цилиндрический насадок** – круглоцилиндрический насадок, расположенный с внутренней стороны стенки сосуда (или водоема), то есть внутри сосуда (или водоёма), из которого он питается.

152. **Насадок Вентури или внешний цилиндрический насадок** – круглоцилиндрический насадок, расположенный с внешней стороны стенки сосуда (или водоема), из которого он питается.

153. **Насадок конический сходящийся** – насадок, имеющий форму конического диффузора (обычно с прямолинейной осью). Угол схождения конического сходящегося насада, соответствующий максимальному коэффициенту расхода, равен $13,4^{\circ}$.

154. **Насадок конический расходящийся** – насадок, имеющий форму конического конфузора (обычно с прямолинейной осью). Предельный угол конусности, исходя из обеспечения работы без срыва вакуума, принимается $5\div 7^{\circ}$.

155. **Насадок коноидальный** – насадок, имеющий криволинейные боковые стенки, очерченные примерно по границам струи жидкости, вытекающей из круглого отверстия (в тонкой стенке) соответствующего размера.

О

156. **Область доквадратичного сопротивления шероховатых русел** – часть зоны турбулентного режима, отвечающая условию: потери напора по длине h_l зависят от относительной шероховатости стенок русла Δ_r и являются пропорциональными средней скорости V в степени m , причем степень m не является постоянной величиной ($2,00 > m > 1,75$). Коэффициент гидравлического трения для доквадратической области зависит от относительной шероховатости и от числа Рейнольдса.

157. **Область квадратичного сопротивления шероховатых русел** – часть зоны турбулентного режима, отвечающая условию: потери напора по длине h_l зависят от относительной шероховатости стенок русла Δ_r и являются прямо пропорциональными средней скорости V во второй степени m . Коэффициент гидравлического трения для квадратической области зависит только от относительной шероховатости (не зависит от числа Рейнольдса).

158. Область сопротивления гладких русел – часть зоны турбулентного режима отвечающая условию: потери напора по длине h_l не зависят от относительной шероховатости стенок русла Δ_r и при числах Рейнольдса $Re < 100000$, являются пропорциональными средней скорости V в степени, близкой к 1,75. Коэффициент гидравлического трения для области гладких русел не зависит от относительной шероховатости и зависит только от числа Рейнольдса.

159. Объёмное водоизмещение плавающего тела – объём воды, вытесненный плавающим телом, находящемся в равновесии.

160. Основное уравнение гидростатики (для жидкости, находящейся под действием только одной системы объёмных сил – сил тяжести)

$$P_{абс} = p_0 + \rho gh,$$

где $p_{абс}$ – абсолютное давление в рассматриваемой точке, Па;

p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности жидкости, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – земное ускорение, м/с²;

h – глубина погружения точки в жидкость.

Абсолютное давление в рассматриваемой точке равно абсолютному давлению на свободной поверхности жидкости плюс давление от столба жидкости (весовое давление).

161. Основное уравнение установившегося равномерного движения

$$\tau_0 = \rho g R I,$$

где τ_0 – напряжение внешнего (наружного) трения, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – земное ускорение, м/с²;

R – гидравлический радиус, м;

I – гидравлический уклон.

Данное уравнение представляет собой уравнение динамического равновесия жидкости (в проекциях на ось, направленную вдоль потока), отнесённое к единице площади смоченной поверхности русла.

162. Остойчивость плавающего тела – способность плавающего тела возвращаться в состояние равновесия после получения крена.

163. Ось плавания тела – ось симметрии поперечного сечения плавающего тела.

164. Отверстие «большое» в стенке (или в дне) сосуда – отверстие, при расчете истечения жидкости из которого нельзя пренебрегать скоростью

подхода и (или) нельзя считать, что местная скорость (осредненная при турбулентном движении) во всех точках сжатого сечения одинакова.

165. **Отверстие «малое» в стенке (или дне) сосуда** – отверстие, при расчете истечения жидкости из которого можно: а) пренебрегать скоростью подхода; б) считать, что местная скорость (осредненная при турбулентном движении) во всех точках сжатого сечения одинакова.

166. **Относительный вес жидкости** – безразмерная величина, равная отношению веса жидкости к весу дистиллированной воды, взятой в том же объёме, при температуре 4°C .

II

167. **Плоскость сравнения $\{O-O\}$** – горизонтальная координатная плоскость, относительно которой определяется величина потенциального и полного напоров.

168. **Плотность жидкости** (плотность распределения массы жидкости) – $\{\rho; \text{кг}/\text{м}^3\}$ – отношение массы M однородной жидкости к объёму V этой массы:

$$\rho = \frac{M}{V}.$$

Плотность неоднородной жидкости в точке пространства, занятого жидкостью выражается как предел указанного отношения, написанного для элементарных величин δM и δV при стремлении элементарного объёма δV к нулю (при стягивании объёма δV в точку):

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\delta M}{\delta V} \right).$$

169. **Площадка действия $\{\delta S; \text{м}^2\}$** – элементарная площадка определенной ориентировки (намеченной у рассматриваемой точки жидкости), на которую действует поверхностная сила.

170. **Поверхность равного давления** – намеченная внутри жидкости или по её границе поверхность, во всех точках которой гидромеханическое давление p одинаково: $p = \text{const}$.

171. **Поверхность тока** – поверхность, образованная системой линий тока проведенных (для заданного момента времени) через все точки какой-либо линии, намеченной внутри потока или по его границе.

172. **Пограничный слой пристенный (турбулентный или ламинарный)** – слой движущейся жидкости у твёрдой стенки (ограничивающей поток), за пределами которого величины градиента скорости по нормали и

напряжения внутреннего трения являются пренебрежимо малыми; в пределах же самого пограничного слоя указанные величины существенно отличаются от нуля, в связи с неравномерным распределением продольных (по отношению к потоку) скоростей по живым сечениям, намеченным для пограничного слоя. В случае турбулентного движения, говоря о пограничном слое, имеем в виду модель пограничного потока.

173. **Потеря напора местная** $\{h_m, м\}$ – величина местного снижения (по длине потока) полного напора, обусловленная работой сил трения в том или другом месте потока, где он претерпевает местную резкую деформацию (и где силы трения в потоке распределяется в значительной мере неравномерно).

174. **Потеря напора полная** $\{h_w, м\}$ – снижение полного напора на определенной длине потока (обусловленное работой сил трения), равное сумме потерь напора по длине h_l , имеющих место по длине потока:

$$h_w = h_l + \sum h_m \text{ или } h_w = \sum h_l + \sum h_m.$$

175. **Потеря напора по длине** $\{h_l, м\}$ – снижение полного напора на определённой длине потока, обусловленной работой сил трения, распределенной по этой длине или равномерно (при равномерном движении, или несколько неравномерно (при плавно изменяющимся движении)). Величина данной потери напора выражается высотой столба рассматриваемой жидкости (имеющей определённую плотность).

176. **Поток безнапорный** – поток, имеющий место при безнапорном движении. Безнапорный поток может быть закрытым или открытым.

177. **Поток взвесенесущий** – поток гидросмеси.

178. **Поток жидкости** – масса жидкости, движущейся в русле (в некоторых случаях в пористой среде) или в виде свободной струи.

179. **Поток напорный** – поток жидкости, имеющий место при напорном движении.

180. **Поток полунапорный** – поток, в пределах одного участка которого имеется напорное движение, а в пределах же другого участка - безнапорного движения.

181. **Поток фильтрационный** – поток (напорный или безнапорный), имеющий место при движении жидкости в пористой среде.

182. **Пуаз** $\{Пз\}$ – единица измерения величины динамического коэффициента вязкости, равная

$$1 \text{ пуаз} = 1 \text{ г/см} \cdot \text{с} = 1 \text{ дина} \cdot \text{с/см}^2.$$

Название единица измерения динамического коэффициента вязкости получила в честь Пуазейля, предложившего формулу по определению вязкости чистой воды от температуры.

183. Пульсация давления (обусловленная турбулентностью) – явление изменения (увеличения или уменьшения) во времени (флюктуация) величины гидродинамического давления в данной неподвижной точке пространства, занятого турбулентным потоком.

184. Пульсация скорости (обусловленная турбулентностью) – явление изменения (увеличения или уменьшения) во времени (флюктуация) величины проекции актуальной скорости на какое-либо направление в данной неподвижной точке пространства, занятого турбулентным потоком.

185. Пьезометр – вертикальная трубка небольшого внутреннего диаметра, приключаемая к месту, где необходимо измерить гидромеханическое давление. Превышение горизонта жидкости в трубке над точкой, в которой измеряется давление, дает соответствующую пьезометрическую высоту, отвечающую избыточному давлению (если трубка «открытого типа», то есть если на поверхность жидкости в этой трубке действует атмосферное давление). Полученная пьезометрическая высота соответствует плотности жидкости, заполняющей пьезометр.

Р

186. Расход жидкости или «объёмный расход жидкости» $\{Q, \text{м}^3/\text{с}\}$ – объём жидкости, протекающей в единицу времени через данное живое сечение

$$Q = \omega V.$$

Расходом называется также объём жидкости, проходящей в единицу времени через ту или другую часть живого сечения. Расход Q является скалярной величиной.

187. Расход твердой фазы или «твердый расход» $\{Q_m, \text{м}^3/\text{с}\}$ – объём твердой фазы (мысленно обращенной в монолит, лишенный пор), проносимый потоком воды в единицу времени через данное живое сечение.

188. Расход жидкости удельный или единичный $\{q, \text{м}^2/\text{с}\}$ – расход приходящийся на единицу ширины русла:

$$q = \frac{Q}{b},$$

где b – ширина русла.

Понятие удельного расхода используется при рассмотрении плоской задачи. Величина скалярная.

189. **Русла закрытые** – русла, контур поперечных сечений которых образован замкнутыми линиями. В закрытом русле может иметь место как напорное, так и безнапорное движение.

190. **Русла открытые** – русла, контур поперечного сечения которых образован незамкнутой линией. В открытом русле имеет место безнапорное движение.

С

191. **Свободная поверхность потока или покоящейся жидкости** – поверхность раздела между жидкостью и газообразной средой.

192. **Свободная струя жидкости затопленная** – свободная струя жидкости, окруженная жидкой средой.

193. **Свободная струя жидкости незатопленная** – свободная струя жидкости, окруженная газом (в частности воздухом).

194. **Сжатие струи неполное** – сжатие струи после выхода ее из отверстия в стенке сосуда или водоема, имеющее место только со стороны части периметра отверстия (не со всех сторон отверстия).

195. **Сжатие струи несовершенное** – сжатие струи после выхода ее из отверстия в стенке сосуда или водоема, возникающее, когда боковые стенки и (или) дно сосуда (или водоема) оказывают влияние на истечение.

196. **Сжатие струи полное** – случай, когда сжатие струи (совершенное или несовершенное) существует со всех сторон отверстия.

197. **Сжатие струи совершенное** – сжатие струи после выхода ее из отверстия в стенке сосуда или водоема, возникающее, когда боковые стенки и (или) дно сосуда (или водоема) практически не влияют на истечение.

198. **Сжатое сечение при истечении из отверстия** – наиболее близко расположенное к отверстию живое сечение струи (транзитной, если рассматривается истечение под уровень), в котором движение является плавноизменяющимся.

199. **Сила абсолютного давления (гидростатического, гидродинамического или гидромеханического)** $\{P_{абс}, H\}$ – сила давления (абсолютного, гидродинамического или гидромеханического) на рассматриваемой поверхности, установленная исходя из абсолютного давления в точках этой поверхности.

200. **Сила весового давления** $\{P_g; H\}$ – сила гидростатического давления на рассматриваемую поверхность, установленная исходя из весового гидростатического давления в точках этой поверхности.

201. **Сила взвешивающая или архимедова** $\{P_z; H\}$ – направленная вертикально вверх сила гидростатического давления, действующая на поверхность неподвижного тела, погруженного в покоящуюся (полностью или частично) жидкость. Имеется в виду случай, когда покоящаяся жидкость, окружающая тело со всех сторон (за исключением верхней при частичном погружении), находится под действием только одной объёмной силы – силы тяжести.

202. **Сила внешнего (наружного) трения** $\{T_o; H\}$ – поверхностная сила, представляющая собой геометрическую сумму элементарных сил внешнего (наружного) трения; каждая элементарная сила внешнего трения выражается как произведение напряжения внешнего (наружного) трения на соответствующую площадку действия.

203. **Сила внутреннего трения** $\{T; H\}$ – поверхностная сила, представляющая собой геометрическую сумму элементарных сил внутреннего трения, установленных для какой либо поверхности, намеченной внутри потока. Каждая элементарная сила внутреннего трения выражается как произведение напряжения внутреннего трения на соответствующую площадку действия.

203. **Сила гидродинамического давления, действующая на поверхность твёрдого тела (или на поверхность, намеченную внутри жидкости)** $\{P; H\}$ – геометрическая сумма элементарных нормальных сил гидродинамического давления, приложенных со стороны движущейся жидкости ко всем элементарным площадкам, составляющим рассматриваемую поверхность. Элементарная нормальная сила гидродинамического давления должна исчисляться, исходя из соответствующих нормальных напряжений. Полное гидромеханическое воздействие движущейся жидкости на рассматриваемую поверхность складывается из упомянутой силы гидродинамического давления и силы внешнего трения (или внутреннего трения).

204. **Сила гидромеханического давления, действующая на поверхность твердого тела (или на поверхность, намеченную внутри жидкости)** $\{P; H\}$ – общее наименование силы гидростатического и гидродинамического давлений.

205. **Сила давления на свободную поверхность** $\{P_0, H\}$ – сила давления, устанавливаемая, исходя из внешнего поверхностного давления в точках свободной поверхности.

206. **Сила избыточного или манометрического давления** $\{P_m; H\}$ – сила давления (гидростатического, гидродинамического или гидромеханического), устанавливаемая, исходя из избыточного давления в точках рассматриваемой поверхности.

207. **Силы внешние** – силы, приложенные к частицам жидкости («точкам») рассматриваемого объёма жидкости со стороны других вещественных тел или физических полей, в частности, со стороны жидкости, окружающей данный её объём.

208. **Силы внутренние** – силы взаимодействия между частицами жидкости (материальными «точками»), составляющими рассматриваемый её объём.

209. **Силы массовые** $\{F; H\}$ – внешние силы, действующие на все частицы («точки») жидкости, образующие рассматриваемый её объём; величина их пропорциональна массе выделенного объёма жидкости (при условии, если ускорения, обусловленные данной системой массовых сил, одинаковы для всех точек области, занятой жидкостью). Примером массовых, а также объёмных сил, является сила тяжести; силы инерции жидкости рассматриваются так же, как массовые (или объёмные) силы.

210. **Силы объёмные** $\{F; H\}$ – массовые силы для жидкости, имеющий всюду одинаковую плотность; величина этих сил пропорциональна объёму, а также массе выделенной жидкости (при условии, если ускорения, обусловленные данной системой объёмных сил, одинаковы для всех точек области, занятой жидкостью).

211. **Силы одноимённые** – силы одной и той же физической природы.

212. **Силы поверхностного натяжения** – гипотетические силы, действующие касательно к свободной поверхности жидкости, при помощи которых (не прибегая к понятию молекулярного давления) можно наглядно объяснить ряд особых явлений, например, явление капиллярности и другие.

213. **Силы поверхностные** $\{P; H\}$ – внешние силы, приложенные к той или другой поверхности, принадлежащей рассматриваемому (выделенному) объёму жидкости; при равномерном распределении этих сил по данной поверхности величина их пропорциональна площади этой поверхности. Примером поверхностных сил могут являться: а) реактивные силы, прило-

женные к жидкости со стороны твёрдых стенок, ограничивающих её; б) силы давления на свободную поверхность жидкости; в) силы трения и давления, действующие на поверхность, ограничивающую выделенный объём жидкости (со стороны окружающей жидкости).

214. **Сифон** – самотечная труба, часть которой расположена выше горизонта жидкости в резервуаре (водоёме), питающем эту трубу.

215. **Скорость актуальная или местная мгновенная** $\{u_{ак}; \text{ м/с}\}$ – местная скорость, отвечающая (при турбулентном движении) данному моменту (мгновению) времени.

216. **Скорость актуальная поперечная или местная мгновенная поперечная** $\{(u_{ак})_y; \text{ м/с}\}$ – проекция актуальной (местной мгновенной) скорости на направление, намеченное поперёк общего перемещения жидкости. Предполагается, что ось y направлена поперёк указанного общего перемещения.

217. **Скорость актуальная продольная или местная мгновенная продольная** $\{(u_{ак})_x; \text{ м/с}\}$ – проекция актуальной (местной мгновенной) скорости на направление, намеченное вдоль общего перемещения жидкости. Предполагается, что ось x направлена вдоль указанного общего перемещения.

218. **Скорость верхняя критическая** $\{v'_к; \text{ м/с}\}$ – средняя скорость в данном живом сечении, при которой ламинарное движение в данном месте переходит (при увеличении скорости движения жидкости) в турбулентное. Величина верхней критической скорости является не вполне определённой (в зависимости от условий, в которых находится поток, существование ламинарного движения при увеличении скорости частиц жидкости может быть «затянуто» в большей или меньшей мере).

219. **Скорость динамическая или скорость трения** $\{v_T; \text{ м/с}\}$ – величина (используемая при исследовании установившегося равномерного движения), равная корню квадратному из отношения внешнего касательного напряжения трения к плотности жидкости:

$$v_T = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{gRI} ,$$

где τ_o – внешнее касательное напряжение, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

R – гидравлический радиус, м;

I – гидравлический уклон, м.

220. **Скорость критическая** $\{v_k; \text{м/с}\}$ – средняя скорость в данном живом сечении, соответствующая критическому числу Рейнольдса.

221. **Скорость местная** $\{u; \text{м/с}\}$ – скорость (вектор) движения частицы жидкости в той или другой неподвижной точке пространства, занятого движущейся жидкости.

222. **Скорость нижняя критическая** $\{v''_k; \text{м/с}\}$ – средняя скорость в данном живом сечении, при которой турбулентный режим в данном месте переходит (в случае снижения скорости движения жидкости) в ламинарный.

223. **Скорость осреднённая поперечная** $\{(\bar{u}_{ак})_y; \text{м/с}\}$ – осреднённая за достаточно большой промежуток времени актуальная поперечная скорость. Для простоты пояснения рассматривается «плоская задача». Исходя из такой условной схемы, можно утверждать, что для установившегося движения скорость $(\bar{u}_{ак})_y$ должна быть равна нулю. Именно, руководствуясь этим положение, устанавливается «поперечное» и ортогональное к нему «продольное» направление движения жидкости (в данном месте). Любое направление, отличное от «поперечного», должно характеризоваться осреднённой скоростью (для рассматриваемого направления), не равной нулю.

224. **Скорость осреднённая местная продольная или скорость осреднённая** $\{(\bar{u}_{ак})_x \text{ или } \bar{u}, \text{ или } u; \text{м/с}\}$ – воображаемая продольная (по отношению к потоку) местная скорость (неизменная во времени для установившегося движения) величина которой (для неподвижной почки пространства, занятого турбулентным потоком), устанавливается как среднее во времени значение пульсирующей продольной актуальной скорости в рассматриваемой точке пространства. Если осреднённое движение является неустановившимся, то период осреднения должен быть мал по сравнению с продолжительностью изменения элементов осреднения движения.

225. **Скорость поперечная пульсационная или поперечная пульсационная добавка (к скорости)** $\{u'_y; \text{м/с}\}$ – разность между скоростями актуальной поперечной и осреднённой поперечной.

226. **Скорость продольная или продольная пульсационная добавка (к скорости)** $\{u'_x; \text{м/с}\}$ – разность между скоростями актуальной продольной и осреднённой продольной

227. **Скорость распространения возмущения** $\{C, \text{м/с}\}$ – скорость движения волны возмущения (абсолютная или относительная по отношению к движению жидкости).

228. Скорость распространения ударной волны (гидравлического удара) $\{C, \text{м/с}\}$ – скорость вдоль напорного потока лба волны прямого (начального) или отраженного гидравлического удара. Имеется в виду не скорость движения вещества (жидкости), а скорость распространения возмущения жидкости (степень её сжатия, обусловленная изменением величины гидромеханического давления). Указанная скорость равна скорости распространения звука в упругой среде и определяется по формуле Жуковского:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{жс} d}{E_{мп} \delta}}},$$

где $E_{жс}; E_{мп}$ – модуль упругости, соответственно, жидкости и материала стенок трубопровода, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

d – диаметр трубопровода, м;

δ – толщина стенки трубопровода, м.

229 Смоченный периметр $\{\chi, \text{м}\}$ – линия соприкосновения жидкости с твердыми стенками (со стенками русла) в данном живом сечении. Различают также смоченный периметр струи жидкости, выделенный внутри потока (то есть линию соприкосновения жидкости, относящейся к данной струе, с соседней жидкостью в данном живом сечении струи).

230. Средняя скорость $\{V; \text{м/с}\}$ – 1) скалярная величина, равная: а) при ламинарном движении – средней для данного живого сечения величине скорости среди величин всех местных скоростей, относящихся к данному живому сечению; б) при турбулентном движении – средней для данного живого сечения величине скорости среди величин всех осреднённых местных продольных скоростей, относящихся к данному живому сечению; 2) величина скорости (скаляр), с которой должны через данное живое сечение проходить все частицы жидкости, чтобы при этом расход Q для рассматриваемого живого сечения ω оказался равным действительному расходу, имеющему место при действительных скоростях, неравномерно распределённых по живому сечению (и при турбулентном движении изменяющихся ещё во времени); 3) характеристика данного живого сечения, имеющего площадь ω , представляющая собой воображаемую скорость, обеспечивающую пропуск заданного расхода Q через заданное живое сечение

$$V = \frac{Q}{\omega}.$$

Понятием средней скорости, как правило, пользуются при рассмотрении параллельно-струйного и плавно изменяющегося движений жидкости (когда живые сечения считают плоскими), а также в некоторых случаях осесимметричного движения.

231. **Статика жидкости или гидростатика** – раздел механики жидкости (гидромеханика), изучающий только равновесие жидкости (абсолютный и относительный покой).

232. **Стокс** {Ст} – единица измерения величины коэффициента кинематической вязкости, равная

$$1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}.$$

233. **Струйка элементарная** – 1) совокупность линий тока (пучок линий тока), проведенных через все точки элементарной площадки, намеченной внутри потока ортогонально к направлению движения; 2) часть движущейся жидкости, ограниченной системой линий тока, проведенных через все точки простого замкнутого контура, ограничивающего элементарную площадку, намеченного внутри пространства, занятого потоком.

234. **Сходственные точки потока** – точки, принадлежащие разным геометрически подобными потокам и расположенные одинаково относительно их границ.

Т

235. **Твёрдый весовой расход** $\{Q_m; \text{Н/с}\}$ – вес твёрдой фазы, проносимой потоком воды в единицу времени через данное живое сечение.

236. **Текучесть жидкости** – подвижность частиц жидкости, обуславливаемая неспособностью жидкости воспринимать в покоящемся состоянии даже малые касательные напряжения (в связи с чем данный объём покоящейся жидкости всегда принимает форму того сосуда, в которой он помещён).

237. **Тело давления** – объём, поперечное сечение которого изображается графиком, строящимся для цилиндрической поверхности («цилиндрической стенки»), подверженной гидростатическому давлению. Площадь, ограниченная этим графиком (состоящая иногда из отдельных частей, имеющих положительное или отрицательное значение), выражает величину вертикальной составляющей силы гидростатического давления, действующей на единицу ширины рассматриваемой цилиндрической поверхности (отмеренную вдоль её образующей).

238. **Техническая механика жидкости или техническая гидромеханика или гидравлика** – самостоятельная, сложившаяся техническая (прикладная) наука, представляющая собой механику жидкости, в которой широко используют различные допущения и упрощающие предположения, а также экспериментальные данные, причем, оперируя, как правило, теми или другими осреднёнными величинами, стремятся к оценке только главных характеристик явления; в результате получают возможность решать при помощи относительно простых приближенных методов сравнительно сложные практические задачи механики жидкости.

239. **Транзитная струя** – область (движущейся жидкости), которая характеризуется отсутствием линий тока, имеющих вид замкнутых кривых в осреднённом движении. Обычно этот термин относится только к той части потока, в пределах которой располагается водоворотная область.

240. **Транспортирующая способность безнапорного потока** $\{Q_{mp}; \text{Н/с}^{-1}\}$ – твёрдый весовой расход, который получается, если представить себе, что поток воды насытился взвешенными твердыми частицами до предела (за счет размыва руса или за счет поступающей в него твердой фазы со стороны), причем степень насыщения потока стабилизировалась. В случае однозернистых наносов величина Q_{mp} зависит от параметров потока, так и от крупности частиц грунта. В случае разнотернистых наносов величина Q_{mp} является не вполне определённой: при наличии песчаного русла, поддающегося размыву, поток может «отбирать» из числа имеющихся фракций песка (образующих русло) различные сочетания этих фракций и обогащается ими; при этом могут получаться различные величины Q_{mp} .

241. **Трубка Пито** – вертикальная трубка небольшого диаметра с загнутым против течения нижним концом, погруженным в жидкость. Превышение горизонта жидкости в трубке Пито над горизонтом жидкости в трубке пьезометра дает величину, примерно равную скоростному напору. Конструктивное сочетание трубок Пито и пьезометра называют иногда прибором Пито или «комбинированной трубкой Пито». Такой прибор используют для измерения местной скорости:

$$u = \varphi \sqrt{2gh_u} ,$$

где φ – тарировочный коэффициент (учитывающий форму и условия обтекания жидкостью нижнего конца трубки Пито).

242. **Трубопровод «длинный»** - трубопровод, при расчете которого можно пренебрегать суммой местных потерь напора сравнительно с потеря-

ми напора по длине. При гидравлических расчетах местные потери напора принимаются равными 5-10% потерь напора по длине.

243. **Трубопровод замкнутый или кольцевой** – сложный трубопровод (трубопроводная сеть), боковые ответвления которого замкнуты (соединены между собой, причем образуют «кольца»)

244. **Трубопровод «короткий»** - трубопровод, при расчете которого необходимо учитывать, как потери напора по длине, так и местные потери напора (как соизмеримые).

245. **Трубопровод незамкнутый или тупиковый** – сложный трубопровод (трубопроводная сеть), боковые ответвления которого не замкнуты (не соединены).

246. **Трубопровод простой** – трубопровод, не имеющий боковых ответвлений.

247. **Трубопровод сложный или трубопровод разветвленный или трубопроводная сеть** – трубопровод, имеющий боковые ответвления.

У

248. **Удельная энергия давления** $\{(UЭ)_p; м\}$ – мера потенциальной энергии единицы веса жидкости, находящегося только в векторном поле градиентов гидромеханического давления (обусловленных весом рассматриваемой жидкости и отнесенных к единице её веса):

$$(UЭ)_p = \frac{p}{\rho g}.$$

249. **Удельная энергия потока жидкости полная** $\{(UЭ)_{пол}; м\}$ сумма полной удельной потенциальной энергии (для любой точки рассматриваемого плоского живого сечения) и удельной кинетической энергии:

$$(UЭ)_{пол} = (UЭП)_{пол} + (UЭК)_v = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}.$$

Данное понятие используется при рассмотрении равномерного и плавноизменяющегося движения.

250. **Удельная энергия элементарной струйки полная** $\{(UЭ)'_{пол}; м\}$ – сумма удельной потенциальной и удельной кинетической энергии

$$(UЭ)'_{пол} = (UЭП)_{пол} + (UЭК)_u = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g}.$$

251. **Удельная энергия кинетическая (в случае потока жидкости)** $\{(UЭК)_v; м\}$ – осреднённое значение (для данного плоского сечения) меры

кинетической энергии единицы веса жидкости, подсчитанная исходя из средней скорости V :

$$(УЭК)_V = \frac{\alpha V^2}{2g}$$

252. Удельная энергия кинетическая (в случае элементарной струйки) $\{(УЭК)_u; м\}$ – мера кинетической энергии единицы веса жидкости (находящийся в данной точке пространства, занятого жидкостью), подсчитанная исходя из соответствующей местной скорости u потока (осреднённой или актуальной для турбулентного движения):

$$(УЭК)_u = \frac{u^2}{2g}.$$

253. Удельная энергия положения $\{(УЭ)_z; м\}$ – мера потенциальной энергии единицы веса жидкости, находящейся только в векторном поле силы тяжести (относительно плоскости сравнения $0-0$)

$$(УЭ)_z = z,$$

где z – превышение рассматриваемой единицы веса жидкости над плоскостью сравнения $0-0$.

254. Удельная энергия потенциальная полная $\{(УЭП)_{пол}; м\}$ – мера потенциальной энергии единицы веса жидкости, находящейся одновременно в двух векторных потенциальных полях: в поле силы тяжести и поле градиентов гидромеханического давления (обусловленных весом рассматриваемой жидкости и отнесённой к единице её веса); удельная потенциальная энергия равна сумме удельной энергии положения и удельной энергии давления:

$$(УЭП)_{пол} = (УЭ)_z + (УЭ)_p = z + \frac{p}{\rho g}.$$

255. Удельная энергия сечения $\{Э; м\}$ – полная удельная энергия потока жидкости (без учета поверхностного атмосферного давления), подсчитанная для данного плоского живого сечения безнапорного потока в предположении, что плоскость сравнения проведена через самую нижнюю точку дна русла в рассматриваемом его вертикальном сечении

$$Э = h + \frac{\alpha V^2}{2g}.$$

256. Удельный вес жидкости $\{\gamma; Н/м^3\}$ – отношение собственного веса G некоторого объёма W жидкости к этому объёму:

$$\gamma = \frac{G}{W}.$$

Удельный вес неоднородной жидкости в точке пространства, занятого жидкостью, выражается как предел указанного отношения, написанного для элементарных величин δG и δW при стремлении элементарного объёма δW к нулю (при стягивании этого объёма в точку):

$$\gamma = \lim_{\delta W \rightarrow 0} \frac{\delta G}{\delta W}.$$

257. Уклон геометрический $\{i, 1\}$ – падение геометрического напора, приходящееся на единицу длины, отмеренную вдоль линии тока или вдоль потока:

$$i = \frac{z_1 - z_2}{l}.$$

258. Уклон гидравлический или гидравлический градиент $\{I, 1\}$ – падение полного напора, приходящееся на единицу длины, отмеренную вдоль линии тока или вдоль потока.

$$I = \frac{\left(\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2\right)}{l} = \frac{h_w}{l}.$$

Величина гидравлического уклона положительна, если напорная линия падает (опускается) по течению (что всегда имеет место при установившемся движении).

259. Уклон пьезометрический или пьезометрический градиент $\{J_p, 1\}$ – падение потенциального напора, приходящегося на единицу длины, отмеренную вдоль линии тока или вдоль потока:

$$I_p = \frac{\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2\right)}{l}.$$

Величина пьезометрического уклона считается положительной, если пьезометрическая линия $P-P$ падает (опускается) по течению. При равномерном движении пьезометрический уклон равен гидравлическому.

260. Уравнение Бернулли (или уравнение баланса удельной энергии) для неустановившегося движения потока реальной жидкости – уравнение, имеющее вид:

$$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_w + h_i.$$

261. Уравнение Бернулли (или уравнение баланса удельной энергии) для установившегося движения потока реальной жидкости – уравнение, имеющее вид:

$$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_w.$$

262. Уравнение Бернулли (или уравнение баланса удельной энергии) для элементарной струйки идеальной жидкости – уравнение, имеющее вид:

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 = const = H.$$

263. Уравнение Бернулли (или уравнение баланса удельной энергии) для элементарной струйки реальной жидкости – уравнение, имеющее вид:

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_w.$$

264. Уравнение неразрывности (или сплошности) движущейся несжимаемой жидкости в условиях отсутствия бокового притока (или оттока) жидкости;

$$\omega_1 V_1 = \omega_2 V_2 = \dots = \omega_i V_i = Q = const \text{ (вдоль потока).}$$

265. Уравнение неразрывности (или сплошности) движущейся несжимаемой жидкости в дифференциальной форме –

$$\frac{dU_x}{dx} + \frac{dU_y}{dy} + \frac{dU_z}{dz} = 0;$$

Данное уравнение относится к точкам пространства, занятого движущейся жидкостью. Частные производные, входящие в это уравнение, иногда называют «прямыми». Для сжимаемой жидкости сумма трех указанных частных производных в общем случае равна нулю.

266. Уравнения Навье-Стокса – уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости ($\rho = const$) жидкости

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \frac{du_x}{dt};$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) = \frac{du_y}{dt};$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) = \frac{du_z}{dt},$$

где x, y, z – координаты точки неподвижного пространства, в которой находится рассматриваемая единица массы движущейся жидкости;

X, Y, Z – проекции массовых сил (ускорений) на координатные оси;

ρ – плотность жидкости;

p – гидростатическое давление;

u_x, u_y, u_z – проекции вектора скорости на соответствующие оси x, y, z ;

t – время;

ν – коэффициент кинематической вязкости.

Общее решение нелинейных дифференциальных уравнений Навье-Стокса пока не найдено. Для получения решения должны быть заданы начальные и граничные условия.

266. Уравнение Ньютона для продольных касательных напряжений внутреннего трения τ (при прямолинейном движении) –

$$\tau = \mu \left| \frac{du}{dn} \right|;$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па/с;

$\left| \frac{du}{dn} \right|$ – градиент скорости по нормали, с^{-1} .

Ф

267. Фильтрация жидкости – движение жидкости в пористой среде.

268. Формула Борда –

$$h_{p,p} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g},$$

где $h_{p,p}$ – местная потеря напора, получающаяся при резком расширении потока;

V_1 и V_2 – средняя скорость, соответственно, в «первом» сечении (перед расширением) и во «втором» (за расширением). Данная формула относится только к турбулентному режиму движения реальной жидкости.

269. Формула Вейсбаха –

$$h_w = \zeta \frac{V^2}{2g},$$

где h_w – местная потеря напора любого вида;

V – средняя скорость за тем участком потока, где имеется рассматриваемая потеря напора;

ζ – коэффициент местного сопротивления, зависящий от вида местного сопротивления.

270. Формула Вейсбаха- Дарси –

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}.$$

Данная формула служит для определения потерь напора по длине для установившегося, равномерного, напорного движения в круглоцилиндрической трубе (длиной l).

271. Формула Вейсбаха- Дарси обобщенная –

$$h_l = \lambda \frac{l}{4R} \frac{V^2}{2g} = \lambda \frac{l}{D_2} \frac{V^2}{2g},$$

где λ – коэффициент гидравлического трения или коэффициент Дарси;

l – длина трубопровода (русла), м;

R – гидравлический радиус, м;

V – средняя скорость, м/с;

D_2 – гидравлический диаметр.

Данная формула служит для определения потерь напора h_l для русел, отличных от круглоцилиндрических.

272. Формула Дарси или основной закон ламинарной фильтрации

$$u = kI,$$

где u – скорость фильтрации, м/с;

k – коэффициент фильтрации,

273. Формула Торричелли –

$$V = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad \text{или} \quad V = \varphi \sqrt{2gZ_0}$$

где V – средняя скорость, м/с;

H_0 и Z_0 – разность между полным напором в «начальном» сечении потока и потенциальным напором «в рассматриваемом» сечении потока, где определяется скорость V ;

φ – коэффициент скорости, учитывающий потерю напора от «начального» сечения до «рассматриваемого» (устанавливается экспериментальным путем; часто он близок к единице; Торричелли величину φ принимал равной единице).

274. Формула Шези –

$$V = C \sqrt{RI},$$

где V – средняя скорость, м/с;

C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с;

R – гидравлический радиус, м;

I – гидравлический уклон.

Формула Шези служит для определения средней скорости V для установившегося, равномерного движения, отвечающего (при использовании обычных формул для коэффициента Шези C), как правило, квадратичной области сопротивления.

Ц

275. **Центр водоизмещения плавающего тела (при равновесии или при крене)** – центр тяжести объёма воды, вытесненного плавающим телом (ограниченного сверху плоскостью возможной грузовой ватерлинии).

276. **Центр давления** – точка пересечения линии действия силы гидростатического давления, действующего на рассматриваемую плоскую фигуру, с плоскостью, в которой размещается эта фигура.

Ч

277. **Численный масштаб длин материальной модели** $\{a_l\}$ –

$$a_l = \frac{l_m}{l_n},$$

где l_m и l_n – соответственно сходственные размеры модели и натурального потока.

278. **Число Рейнольдса** $\{Re, 1\}$ – безразмерное выражение, являющееся характеристикой потока жидкости и используемое иногда как критерий динамического подобия:

$$Re = \frac{Vl}{\nu};$$

где V – средняя скорость, м/с;

l – какой либо характерный размер живого сечения потока (в том числе гидравлический радиус R).

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

Жидкости различной физической природы, потоки которых характеризуются числами Рейнольдса одинаковой величины, являются идентичными в отношении диссипации механической энергии (потерь напора). Величины коэффициентов гидравлического трения λ для таких потоков оказываются одинаковыми (для квадратичной и докватратичной областей сопротивления указанные потоки дополнительно должны иметь ещё одинаковую относительную шероховатость).

279. **Число Рейнольдса верхнее критическое** $\{Re'_{кр}\}$ – число Рейнольдса, при котором в случае увеличения скорости ламинарный режим движения переходит в турбулентный. Величина верхнего критического числа

Рейнольдса в значительной мере зависит от условий, в которых находится поток (имеет ли место, например, возмущения потока и т.д.); в связи с этим величина $Re'_{кр}$ является несколько неопределённой.

280. **Число Рейнольдса для круглой трубы, выраженное через её диаметр $\{Re_d\}$:**

$$Re_d = 4Re_R = \frac{Vd}{\nu},$$

где V – средняя скорость, м/с;

d – диаметр трубы, м;

Re_R – число Рейнольдса для трубы, выраженное через гидравлический радиус:

$$Re_R = \frac{VR}{\nu}.$$

281. **Число Рейнольдса критическое $\{Re_{кр}\}$** – число Рейнольдса, принятое условно как критическое при гидравлических расчетах и равное для круглых трубопроводов 2320.

282. **Число Рейнольдса нижнее критическое $\{Re''_{кр}\}$** – число Рейнольдса, при котором снижение скорости движения жидкости турбулентный режим переходит в ламинарный.

283. **Число Струхала $\{St\}$** – безразмерное выражение, используемое при рассмотрении нестационарных процессов как критерий кинематического подобия:

$$St = \frac{lN}{V} = \frac{l}{t'V},$$

где V – средняя скорость, м/с;

l – какой либо характерный размер живого сечения потока – часто гидравлический радиус R .

N – частота колебаний

t' – например - например, период пульсации скорости.

284. **Число Фруда $\{Fr\}$** – безразмерное выражение, используемое как характеристика безнапорного потока или как критерий динамического подобия:

$$Fr = \frac{V^2}{gl},$$

где V – средняя скорость, м/с;

g – земное ускорение, м/с²;

l – какой либо характерный размер живого сечения потока – часто гидравлический радиус R .

285. **Число Эйлера** $\{Eu\}$ – безразмерное выражение, используемое в некоторых случаях как критерий динамического подобия:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho V^2},$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

V – средняя скорость, м/с;

Δp – перепад гидродинамического давления.

Ш

286. **Шероховатость русла (трубы)** – выступы шероховатости, влияющие на величину потерь напора по длине при турбулентном движении.

287. **Шероховатость стенок русла относительная** $\{\Delta, 1\}$ – безразмерная величина, равная отношению средней высоты выступов шероховатости Δ к характерному линейному размеру l поперечного сечения потока:

$$\Delta_r = \frac{\Delta}{l};$$

Величина l принимается равной, например, диаметру трубы D или глубине потока h .

288. **Шероховатость стенок русла относительная эквивалентная** $\{\Delta_r, 1\}$ – воображаемая равномерно распределённая (по поверхности стенок) относительная шероховатость, выступы которой имеют одинаковую форму и размеры. Величина Δ_r подбирается (для данного русла) таким образом, чтобы потеря напора по длине, получающаяся при этой шероховатости, оказалось равной потере напора по длине при действительной (неравномерной) шероховатости. Эквивалентную величину Δ_r (для данного русла) вычисляют по имеющимся формулам, дающим связь между Δ_r и величиной потерь напора по длине. При этом рассматривают квадратичную область сопротивления; причем величину потерь напора по длине определяют для рассматриваемого русла экспериментальным путем.. Величины Δ , найденные, исходя из величин Δ_r , определённых указанным выше способом, приводятся в справочной литературе.

Э

289. **Эжекция** – подсосывание и увлечение жидкости, которая окружает транзитную струю. Транзитная струя образована «рабочей» жидкостью, движущейся с большой скоростью.

290. **Эквивалентная длина** $\{l_3, \text{м}\}$ – длина прямого участка трубопровода, сопротивление трения по длине которого равно, по величине, рассматриваемым местным потерям напора,

$$\frac{l_3}{d} = \frac{\zeta}{\lambda}$$

где ζ – коэффициент местных сопротивлений;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления трения,

291. **Элементарная площадка** $\{\delta S, \text{м}^2\}$ – весьма малая площадка, удовлетворяющая условию: координаты z её точек отличаются друг от друга на бесконечно малую величину; это же условие в соответствующих случаях должно удовлетворяться и для координат x и y , а также для величин p и u .

292. **Элементарная трубка тока** – поверхность, образованная системой линий тока, проведенных через все точки простого замкнутого контура, ограничивающего бесконечно малую площадку, выделенную внутри потока, ортогонально к направлению движения жидкости.

293. **Эпюра гидростатического давления** – график, построенный для плоской прямоугольной фигуры «стенки» (вертикальной или наклонной) подверженной гидростатическому давлению, выражающий распределение гидростатического давления вдоль вертикального сечения стенки (в вертикальной плоскости, проведенной нормально к стенке). Каждая ордината графика, отмеренная в направлении, перпендикулярно к «стенке», представляет собой гидростатическое давление в соответствующей точке «стенки». Площадь графика даёт величину силы гидростатического давления, действующей на единицу ширины «стенки» (отмеренную нормально к плоскости графика). Намечая при построении графика ординаты, выражающие гидростатическое давление, не нормально к стенке, а по вертикальному и горизонтальному направлению, получают эпюры составляющих сил гидростатического давления на стенку (соответственно вертикальной и горизонтальной составляющих).

294. **Эпюра скоростей** – фигура (плоская или пространственная), отображающая распределение местных скоростей (осреднённых продольных при турбулентном движении) по данному плоскому живому сечению или по вертикали, проведенной внутри потока.

ПРИЛОЖЕНИЕ

**Пример оформления титульного листа
расчетно-графической работы**

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского

Кафедра технического обеспечения АПК

Расчетно-графическая работа № ____

Номер зачетной книжки № _____

Задача № ____

Выполнил: студент 3
курса, 35.03.06 – Агро-
инженерия

Проверил:

Иркутск

Приложение Б

Контрольные вопросы для подготовки к коллоквиуму по разделам гидростатики, кинематики и динамики жидкостей

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

1. Какая размерность плотности жидкости в системе «СИ»?
2. Какая размерность объемного (удельного) веса жидкости в системе «СИ»?
3. Какую размерность имеет динамическая вязкость в системе «СИ»?
4. Какую размерность имеет кинематическая вязкость в системе «СИ»?
5. Какая связь существует между динамической и кинематической вязкостью жидкости?
6. Какая физическая характеристика измеряется в пуазах?
7. Какая физическая характеристика измеряется в стоксах?
8. Как изменяется вязкость с увеличением температуры капельной жидкости?
9. Как изменяется вязкость капельной жидкости с увеличением давления?
10. Как изменяется вязкость газов с увеличением температуры?
11. Как изменяется объемный (удельный) вес капельной жидкости с увеличением температуры?
12. Какими свойствами характеризуется идеальная жидкость?
13. Определить объемный (удельный) вес жидкости, если $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$.
14. Какими приборами определяется плотность жидкости?
15. Какими приборами определяется вязкость жидкости?
16. Математическое выражение плотности жидкости?

ГИДРОСТАТИКА

1. Какая размерность давления в системе «СИ»?
2. Давление $P=1 \text{ кг/см}^2$ в системе «СИ» составит...
3. Какой из приведенных формул определяется гидростатическое давление?
4. Какой из приведенных формул определяется полное давление в жидкости, находящейся под действием силы тяжести?
5. Размерность гидростатического давления в системе «СИ»?
6. По какой формуле определяется полное давление P_0 на поверхность жидкости?
7. Что такое разрежение (вакуум)?
8. Размерность вакуумметрического давления в системе «СИ»?
9. Чему равно максимальное разрежение (вакуум)?
10. При максимальном разрежении (вакуумметрическом давлении), абсолютное давление $P_0=?$
11. Формула для определения вакуумметрической высоты?
12. Что определяет пьезометрическая высота h_p ?
13. По какой формуле определяется суммарная сила гидростатического давления на плоский шит?
14. Плоский прямоугольный шит подпирает уровень воды высотой h . На какой высоте находится точка приложения суммарной силы гидростатического давления?

15. В каком случае центр тяжести шита и точки приложения суммарной силы гидростатического давления совпадают?
16. Определить высоту давления h , если известно давление и плотность жидкости: P_m , кг/м², $\rho = 1000$ кг/м³ (решение).
17. Дано: h_1 (мм. рт. ст.), $h_2 = ?$ (м вод. ст.), $\rho_{pm} = 13600$ кг/м³ (решение).
18. Определить гидравлический радиус R открытого потока прямоугольной формы, заданного высотой h и шириной b , (решение).

ГИДРОДИНАМИКА

1. Какое движение жидкости называют напорным?
2. По какой формуле определяется гидравлический радиус?
3. Чему равен гидравлический радиус R при заданных размерах трубопровода (канала)?
4. Как определяется средняя скорость движения потока жидкости?
5. Неразрывность потока жидкости определяется выражением?
6. Кривая, ограничивающая эпюру скоростей при ламинарном режиме движения, подчиняется зависимости?
7. Как изменяется число Рейнольдса от температуры жидкости?
8. Кривая, ограничивающая эпюру скоростей при турбулентном режиме, подчиняется зависимости?
9. По какой формуле определяется число Рейнольдса Re ?
10. По какой формуле определяется число Рейнольдса Re для потока некруглого сечения?
11. Какую размерность имеет число Рейнольдса Re ?
12. Какому условию удовлетворяют гидравлически гладкие трубопроводы?
13. Какому условию удовлетворяют гидравлически шероховатые трубопроводы?
14. Коэффициент гидравлического трения λ при ламинарном режиме движения жидкости определяется по формуле?
15. Потери напора на местные сопротивления возникают:
16. По какой формуле определяются потери напора при местных сопротивлениях?
17. В области гидравлически гладких трубопроводов коэффициент гидравлического трения λ определяется по формуле:
18. В переходной (доквадратичной) области коэффициент гидравлического трения λ определяется по формуле:
19. Какая из приведенных зависимостей является формулой Шези?
20. Какая из приведенных зависимостей является формулой Дарси?
21. В формуле Дарси пропущено значение:
22. Какая из приведенных зависимостей является формулой Дарси (вторая водопроводная формула)?
23. Какое из представленных выражений является уравнением Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости?

24. Какое из представленных выражений является уравнением Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости?
 25. Какое из представленных выражений является уравнением Бернулли для потока реальной жидкости?
 26. Каким членом в уравнении Бернулли характеризуются потери напора (энергии)?
 27. Каким выражением в уравнении Бернулли характеризуется удельная кинетическая энергия?
 28. Каким выражением в уравнении Бернулли характеризуется удельная потенциальная энергия гидродинамического давления?
 29. Каким выражением в уравнении Бернулли характеризуется удельная потенциальная энергия положения центра тяжести сечения потока?
 30. Каким выражением в уравнении Бернулли характеризуется полная удельная энергия сечения потока?
 31. Каким выражением в уравнении Бернулли характеризуется полная удельная потенциальная энергия сечения потока?
 32. Как определить скорость движения потока?
 33. Каким уравнением выражается гидравлический уклон?
 34. Каким уравнением выражается пьезометрический уклон?
 35. Каким уравнением выражается геометрический (геодезический) уклон?
 36. Какое значение имеет гидравлический уклон?
 37. Какое значение имеет пьезометрический уклон?
 38. Определить гидравлический уклон, если известны $v_1, v_2, P_1, P_2, Z_1, Z_2$, длина трубопровода l , жидкость – вода, (решение)...
 39. Определить гидравлический уклон, если известны P_1, P_2 , жидкость – вода, $Z_1=Z_2$, (решение)...
 40. Определить гидравлический уклон, если известны $P_1=P_m, P_2=P_{раз}, Z_1=Z_2$, длина трубопровода l , жидкость – вода, (решение)...
- Следует помнить, что в уравнении Бернулли подставляются только полные (абсолютные) значения давления.
41. Какая связь между коэффициентами ϵ, φ, μ ? (ϵ – коэфф. сжатия струи; φ – скоростной напор; μ – коэфф. расхода).
 42. Какому условию удовлетворяет насадок?
 43. Как изменяется скорость и расход жидкости, если к отверстию в тонкой стенке приставлена трубка длиной $l = (3-5)d$?
 44. В формуле для определения расхода жидкости через насадок пропущен член?
 45. От чего зависит модуль расхода (расходная характеристика) « K »?
 46. По какой формуле определяется расход жидкости если заданы K, J ?
 47. По какой формуле определяются потери напора в трубопроводе, если заданы Q, K, l ?
 48. По какой формуле определяется давление, возникающее при гидравлическом ударе.
 49. Какие трубопроводы называются гидравлически гладкими?
 - 50.** Какие трубопроводы называются гидравлически короткими?

Приложение В

Буквенные обозначения основных величин и понятий в «Гидравлике»

№ п/п	Наименования величин и соответствующих понятий	Буквенные обозначения	Размерность	№ пункта таблицы, где повторяется данное буквенное обозначение
1	2	3	4	5
1	Вес некоторого объема жидкости	G	Н	
2	Время	t	с	
3	Высота вакуумметрическая	$h_{\text{вак}}$	м	
4	Высота геометрическая	z	м	
5	Высота капиллярного поднятия	$h_{\text{к.п.}}$	м	
6	Высота метацентрическая	h_m	м	
7	Высота приведенная, отвечающая абсолютному давлению в точке	$h_{\text{пр}}$	м	
8	Высота пьезометрическая, отвечающая избыточному давлению	h_p	м	
9	Геометрический напор на сооружении (при истечении под уровень)	Z	м	
10	Гидравлическая крупность частиц	w_0	м/с	
11	«Гидравлический диаметр»	$D_2=4R$	м	
12	Гидравлический радиус	R	м	
13	Гидравлический удар (давление гидравлического удара)	$p_{\text{уд}}$	Па	
14	Глубина потока	h	м	31
15	Глубина потока относительная	η, ξ		
16	Градиент скорости	$\frac{du}{dn}$	м/с	
17	Давление абсолютное внешнее поверхностное (на свободной поверхности)	p_0	Па	
18	Давление абсолютное (гидростатическое или гидродинамическое)	$p_{\text{абс}}$	Па	
19	Давление актуальное местное (или мгновенное)	$p_{\text{ак}}$	Па	
20	Давление атмосферное	$p_{\text{атм}}$	Па	
21	Давление вакуумметрическое (разряжения)	$p_{\text{вак}}, p_{\text{раз}}$	Па	

1	2	3	4	5
22	Давление вакуумметрическое (разряжения) допустимое	$p_{\text{вак. доп.}}$	Па	
23	Давление вакуумметрическое (разряжения) предельное	$p_{\text{вак. пред.}}$ $p_{\text{раз. пред.}}$	Па	
24	Давление весовое	$p_{\text{вес.}}$	Па	
25	Давление гидродинамическое осредненное	\bar{p}	Па	
26	Давление гидростатическое	p	Па	
27	Давление избыточное (манометрическое)	$p_{\text{из}}, p_m$	Па	
28	Давление насыщенных паров	$P_{\text{н.п.}}$	Па	
29	Давление, отвечающее скоростному напору (скоростное давление) $\{p_v, \text{Па}\}$	p_v	Па	
30	Диаметр трубы	d	м	
31	Заглубление точки (в покоящейся жидкости)	h	м	14
32	Заглубление центра отверстия или насадка под уровень жидкости (при истечении в атмосферу)	H	м	
33	Координаты прямоугольные декартовы (ось x направлена вправо, ось y – перпендикулярно плоскости чертежа, z – вертикально вверх)	x, y, z		
34	Коэффициент динамической вязкости	μ	Па*с	
35	Коэффициент кинематической вязкости	ν	м ² /с	
36	Коэффициент гидравлического трения (сопротивления) (коэффициент Дарси)	λ		
37	Коэффициент (корректив) кинетической энергии (коэффициент Кориолиса)	α		
38	Коэффициент (корректив) количества движения (коэффициент Бусенеска)	α_0		
39	Коэффициент лобового сопротивления	c_x		
40	Коэффициент объёмного сжатия	β_p	Па ⁻¹	
41	Коэффициент полезного действия	η		
42	Коэффициент расхода отверстия или насадка	$\mu_{\text{отв}}, \mu_{\text{нас}}$		
44	Коэффициент расхода простого короткого трубопровода	μ_m		
45	Коэффициент сжатия струи (при истечении через отверстие и насадки)	ε		
46	Коэффициент скорости	φ		

1	2	3	4	5
47	Коэффициент сопротивления или коэффициент потерь напора (полный - ζ_f ; по длине - ζ_l ; местный - ζ_j и др.)	ζ		
48	Коэффициент температурного расширения	β_T	T^{-1}	
49	Коэффициент турбулентной динамической вязкости	μ_m		
50	Коэффициент турбулентной кинематической вязкости	ν_m		
51	Коэффициент фильтрации	k	м/с	
52	Коэффициент Шези	C	$M^{0,5}/c$	
53	Коэффициент шероховатости	n		
54	Линия напорная(фактическая напорная линия)	$N - N$		
55	Линия пьезометрическая	$P - P$		
56	Масса некоторого объема жидкости	$M (\delta m)$	кг	
57	Массовая сила, отнесенная к единице массы, и проекции её на оси координат	X, Y, Z	м/с	
58	Масштабы длин l , сил F , скоростей V , скоростей u	$a_l, \alpha_F, \alpha_v, \alpha_u$		
59	Модуль расхода или расходная характеристика	K	M^3/c	
60	Модуль скорости или скоростная характеристика	W	м/с	
61	Модуль объемной упругости жидкости	$E_{жс}$	Па	
62	Модуль объемной упругости материала трубопровода	E_{mp}	Па	
63	Напор геометрический	z	м	
64	Напор давления	$h_A,$	м	
68	Напор инерционный	h_i	м	
69	Напор на малом отверстии или насадке при истечении жидкости в атмосферу	H	м	
70	Напор на трубопроводе при истечении в атмосферу	H		
71	Напор полный потока	H_e	м	
72	Напор полный элементарной струйки	H'_e	м	
73	Напор потенциальный	H_A	м	
74	Напор скоростной, отвечающий скорости u	$h_u = \frac{u^2}{2g}$	м	
75	Напор скоростной, отвечающий скорости V	$h_v = \frac{\alpha v^2}{2g}$	м	

76	Напор пьезометрический	$h_{изб} = \frac{p}{\rho g}$	м	
----	------------------------	------------------------------	---	--

1	2	3	4	5
77	Напряжение внешнего трения	τ_0	Па	
78	Напряжение внутреннего трения	τ	Па	
79	Напряжение в точке	σ	Па	
80	Напряжения в точке главные (нормальные)	$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Па	
81	Напряжение в точке нормальное «к площадке действия»	σ	Па	
82	Напряжение в точке касательное «к площадке действия»	τ	Па	
83	Напряжения турбулентные касательные	τ_m	Па	
84	Начальное (предельное) напряжение сдвига	τ_0	Па	
85	Нормаль к площадке	n		
86	Объём жидкости	$W(\delta W)$	м ³	
87	Ось; координата, намеченная вдоль оси струйки (потока) по течению	s		
88	Отметка	z	м	
89	Плоскость сравнения	$O - O$		
90	Плотность жидкости (плотность распределения массы жидкости)	ρ	кг/м ³	
91	«Площадка действия» элементарная	δS	м ²	
92	Площадь живого сечения	ω	м ²	
93	Площадь, на которую действует сила	S	м ²	
94	Площадь эпюры гидростатического давления	Ω	м ²	
95	Потенциальная функция	U		
96	Потеря напора местная	h_f, h_m	м	
97	Потеря напора по длине	h_l	м	
98	Потеря напора полная	h_f, h_w	м	
99	Потеря напора полная для струйки	h'_f	м	
100	Проекции массовых сил (ускорений) на координатные оси	X, Y, Z	м/с	
101	Разность уровней жидкости перед и за отверстием или насадком	Z	м	
102	Расстояние между сечениями	S	м	
103	Расход гидросмеси	$Q_{г.с.}$	м ³ /с	
104	Расход жидкости	Q	м ³ /с	
105	Расход жидкости удельный	q	м ³ /с	
106	Расход твердой фазы	Q_m	м ³ /с	
107	Сила абсолютного гидростатического давления	$P_{абс}$	Н	
108	Сила атмосферного давления	P_a	Н	





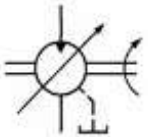
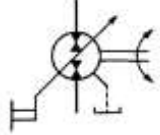
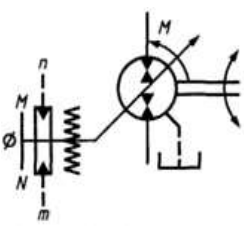

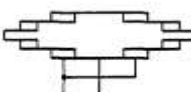

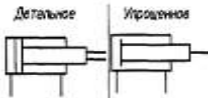

109	Сила весового давления	P_v	Н	
110	Сила взвешивающая или сила Архимеда	P_z	Н	
1	2	3	4	5
111	Сила внешнего давления (на свободную поверхность)	P_0	Н	
112	Сила внешнего (наружного) трения	T_0	Н	
113	Сила внутреннего трения	T	Н	
114	Сила давления (гидростатического, гидродинамического, гидромеханического)	P	Н	
115	Сила избыточного (манометрического) давления	$P_{изб},$ $P_{ман}$	Н	
116	Сила инерции жидкости (отнесенная к единице массы)	$I = -\frac{du}{dt}$	Н	
117	Сила лобового сопротивления	R_x	Н	
118	Силы массовые	F	Н	
119	Силы объёмные	F	Н	
120	Силы поверхностные	P	Н	
121	Скорость актуальная или местная мгновенная	$u_{ак}$	м/с	
122	Скорость актуальная: продольная поперечная	$(u_{ак})_x$ $(u_{ак})_y$	м/с	
123	Скорость вращения	Ω	с ⁻¹	
125	Скорость динамическая или скорость трения	v_T	м/с	
126	Скорость критическая: верхняя нижняя	v'_k v''_k	м/с	
127	Скорость максимальная допустимая	$v_{макс}$	м/с	
128	Скорость минимальная допустимая	$v_{мин}$	м/с	
129	Скорость местная	u	м/с	
130	Скорость подхода (к сооружению или отверстию)	v_o	м/с	
131	Скорость пульсационная	u'	м/с	
132	Скорость распространения возмущения (гидравлического удара или волн перемещения)	C	м/с	
133	Скорость средняя	V	м/с	
134	Скорость фильтрации	u	м/с	
135	Смоченный периметр	χ	м	
136	Твердый весовой расход	Q_m	Н/с	
137	Температура в: градусах Цельсия Кельвин	t K		
138	Толщина стенки трубопровода	δ	м	
139	Транспортирующая способность безнапор-	$Q_{тр}$	Н/с ⁻¹	

	НОГО ПОТОКА			
--	-------------	--	--	--


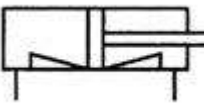
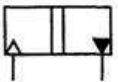
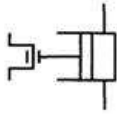

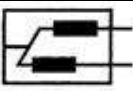
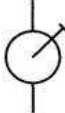
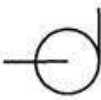

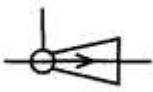
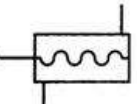
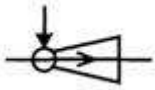

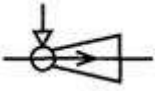



1	2	3	4	5
140	Удельная энергия сечения потока кинетическая	$UЭК$		
142	Удельная энергия сечения потока потенциальная	$UЭП$		
143	Удельная энергия сечения потока	$Э$	м	
144	Удельный вес жидкости	γ	Н/м ³	
145	Уклон геометрический	i		
146	Уклон гидравлический	I		
147	Уклон пьезометрический	I_p		
149	Уклон свободной поверхности потока	$i_{нов}$		
150	Ускорение свободного падения	g	м/с ²	
151	Число Рейнольдса	Re		
152	Число Рейнольдса критическое	$Re_{кр}$		
153	Число Струхали	St		
154	Число Фруда	Fr		
155	Число Эйлера	Eu		
156	Шероховатость стенок русла абсолютная (высота выступов шероховатости)	Δ	м	
157	Шероховатость стенок русла относительная	Δ_r	м	
158	Шероховатость стенок русла относительная осреднённая	$\Delta_{оср}$	м	
159	Ширина русла	b	м	

**Условные графические обозначения гидравлических
и пневматических машин (по ГОСТ 2.782 – 96)**

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
1. Насос нерегулируемый: -с нереверсивным потоком		7. Поворотный гидродвигатель	
	-с реверсивным потоком		8. Компрессор
2. Насос регулируемый: -с нереверсивным потоком		9. Пневмомотор нерегулируемый: -с нереверсивным потоком	
	-с реверсивным потоком		-с реверсивным потоком
-с реверсивным потоком		10. Пневмомотор регулируемый: -с нереверсивным потоком	
3. Насос регулируемый с ручным управлением и одним направлением вращения		-с реверсивным потоком	
4. Насос, регулируемый по давлению, с одним направлением вращения, регулируемой пружиной и дренажом (см. приложения А и Б)		11. Поворотный пневмодвигатель	
	5. Насос-дозатор		12. Насос-мотор нерегулируемый: -с одним и тем же направлением потока
6. Насос многоотводный (например, трехотводный регулируемый насос с одним заглушенным отводом)	<i>Детальное</i> 	-с реверсивным направлением потока	
	<i>Упрощенное</i> 	-с любым направлением потока	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
13. Гидромотор нерегулируемый: -с нереверсивным потоком		17. Насос-мотор регулируемый: -с одним и тем же направлением потока	
-с реверсивным потоком		-с реверсивным направлением потока	
14. Гидромотор регулируемый: -с нереверсивным потоком, с неопределенным механизмом управления, наружным дренажом, одним направлением вращения и двумя концами вала		-с любым направлением потока, с ручным управлением, наружным дренажом и двумя направлениями вращения	
15. Насос-мотор регулируемый, с двумя направлениями вращения, пружинным центрированием нуля рабочего объема, наружным управлением и дренажом (сигнал n вызывает перемещение в направлении N) (см. приложения А и Б)		-телескопический с односторонним выдвижением, гидравлический	
16. Объемная гидропередача: -с нерегулируемым насосом и мотором, с одним направлением потока и одним направлением вращения		-телескопический с двухсторонним выдвижением	
-с регулируемым насосом, с реверсивным потоком, с двумя направлениями вращения с изменяемой скоростью		18. Цилиндр дифференциальный (отношение площадей поршня со стороны штоковой и не штоковой полостей имеет первостепенное значение)	
		19. Цилиндр двухстороннего действия с подводом рабочей среды через шток: -с односторонним штоком	
		-с двухсторонним штоком	






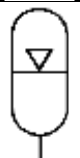
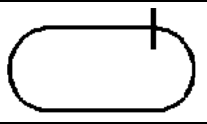

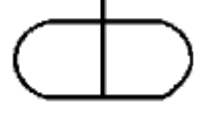
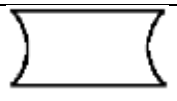


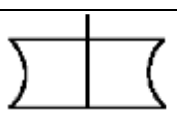
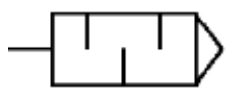
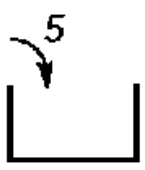
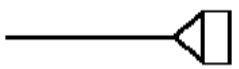
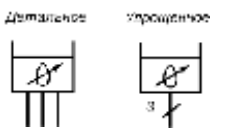
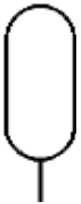

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
с нерегулируемым насосом и одним направлением вращения		24. Цилиндр двухстороннего действия с постоянным торможением в конце хода: -со стороны поршня	
20. Цилиндр одностороннего действия: -поршневой без указания способа возврата штока, пневматический		-с двух сторон	
-поршневой с возвратом штока пружиной, пневматический		25. Цилиндр двухстороннего действия с регулируемым торможением в конце хода: -со стороны поршня	
-поршневой с выдвиганием штока пружиной, гидравлический		-с двух сторон и соотношением площадей 2:1	
-плунжерный		Примечание – При необходимости отношение кольцевой площади поршня к площади поршня (соотношение площадей) может быть дано над обозначением поршня	
-телескопический с односторонним выдвиганием, пневматический			
-телескопический с двухсторонним выдвиганием		26. Поступательный преобразователь: -с одним видом рабочей среды	
21. Цилиндр двухстороннего действия: -с односторонним штоком, гидравлический		-с двумя видами рабочей среды	
-с двухсторонним штоком, пневматический		27. Вращательный преобразователь: -с одним видом рабочей среды	
22. Цилиндр двухкамерный двухстороннего действия			
23. Цилиндр мембранный: -одностороннего действия		-с двумя видами рабочей среды	

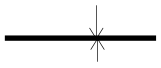
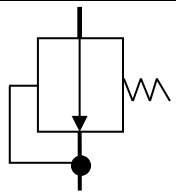

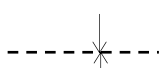

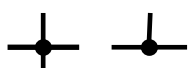


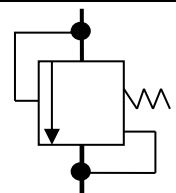


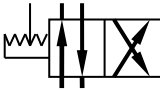


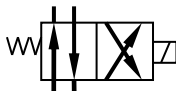
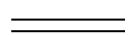
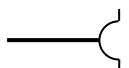
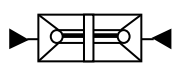


Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
-двухстороннего действия		34. Цилиндр с встроенными механическими замками	
28. Пневмогидравлический вытеснитель с разделителем: -поступательный		35. Насос кривошипный	
-вращательный		36. Насос аксиально-поршневой	
29. Насос ручной		37. Насос лопастной центробежный	
30. Насос шестеренный		38. Насос струйный: -общее обозначение	
31. Насос винтовой		-с жидкостным внешним потоком	
32. Насос пластинчатый		-с газовым внешним потоком	
33. Насос радиально-поршневой		39. Вентилятор: -центробежный	
		-осевой	


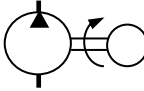

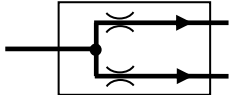
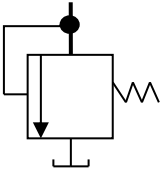
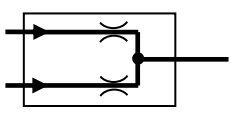
Приложение Д

Обозначения условные графические. Кондиционеры рабочей среды, емкости гидравлические и пневматические (в соответствии с ГОСТ)

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
1 Конденсатор рабочей среды: - общее обозначение		- увлажнитель	
- фильтр		- подогреватель	
- с магнитным сепаратором		- охладитель без указания линий подвода и отвода охлаждающей среды	
- с индикатором загрязненности		- охладитель с указанием линий подвода и отвода охлаждающей среды	
- влагоотделитель с ручным отводом конденсата		- охладитель и подогреватель	
с автоматическим отводом конденсата		- конденсатоотводчик	
- фильтр-влагоотделитель с ручным отводом конденсата		2 Гидробак и смазочный бак: под атмосферным давлением: - общее обозначение	
- воздухоосушитель		- со сливным трубопроводом выше уровня рабочей жидкости	
- маслораспылитель		- со сливным трубопроводом ниже уровня рабочей жидкости	
- блок подготовки рабочего газа		- со сливным трубопроводом ниже уровня рабочей жидкости с воздушным фильтром	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
- с мешалкой		- грузовой гидравлический	
- с механическим поджимом смазочного материала		- пружинный гидравлический	
с давлением выше атмосферного: - общее обозначение		- пневмогидравлический	
- со сливным трубопроводом выше уровня рабочей жидкости		4 Вспомогательный газовый баллон (изображается только вертикально)	
- со сливным трубопроводом ниже уровня рабочей жидкости			
с давлением ниже атмосферного: - общее обозначение			
- со сливным трубопроводом выше уровня рабочей жидкости		5 Ресивер	
- со сливным трубопроводом ниже уровня рабочей жидкости		6 Пневмоглушитель	
Примечание - При необходимости указания объема заправки бака, дм ³ (л), следует применять приведенное обозначение (например, бак с объемом заправки 5 дм ³).		7 Заливная горловина, воронка, заправочный штуцер и т.п.	
		8 Безнапорная емкостная масленка (например, регулируемая трехходовая масленка)	
3 Аккумулятор гидравлический или пневматический (изображается только вертикально) - гидравлический (без указания принципа действия)		9 Напорная емкостная масленка: - пневматическая	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Линия всасывания, напора, слива		Клапан редукционный	
Линия управления			
Дренажная линия		Дроссель нерегулируемый	
Соединение линий		Дроссель регулируемый	
Несоединяющиеся линии		Золотник напорный	
Трубопровод гибкий			
Направление потока жидкости		Распределитель четырехлинейный двухпозиционный с ручным управлением	
Направление потока воздуха (газа)			
Удаление воздуха из гидросети		Распределитель четырехлинейный двухпозиционный с управлением от электромагнита и пружинным возвратом	
Механическая связь			
Заборник воздуха из атмосферы		Гидрозамок двусторонний	
Запорное устройство		Насос шестеренный	

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Клапан обратный		Насос постоянной подачи с приводом от электромотора	
Манометр		Делитель потока гидравлический	
Клапан предохранительный		Сумматор потока гидравлический	

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа № 1 «Измерение вакуумметрического давления»	4
Лабораторная работа № 2 «Измерение избыточного давления с помощью различных приборов»	8
Лабораторная работа № 3 «Истечение жидкости через отверстия и насадки»	14
Лабораторная работа № 4 «Определение режимов движения жидкости и коэффициента гидравлических сопротивлений трения λ »	22
Лабораторная работа №5 «Геометрическая, энергетическая и механическая сущность уравнения Бернулли»	29
Номера задач расчетно-графических работ №1, 2	35
ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РГР	36
РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1	36
Раздел 1. Приборы для измерения давления	36
Раздел 2. Гидравлические машины	43
Раздел 3. Давление на плоскую стенку	48
РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА №2	54
Раздел 4. Длинные трубопроводы. Параллельное и последовательное соединения труб. Сифонный трубопровод. Гидравлический удар	54
Раздел 5. Местные сопротивления. Истечение жидкости через отверстия и насадки ..	69
Список рекомендуемой литературы	80
ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ ГИДРАВЛИКИ	81
А	81
Б	81
В	81
Г	83
Д	86
Ж	93
З	95
И	95
К	96
Л	101
М	102
Н	105

О.....	107
П.....	109
Р.....	111
С.....	112
Т.....	118
У.....	120
Ф.....	124
Ц.....	126
Ч.....	126
Ш.....	128
Э.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ	130

Ф.А. Васильев, С.Н. Ильин, В.В. Пальвинский

ГИДРАВЛИКА

Лабораторный практикум

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать 30.04.2018 г.

Тираж 100 экз.

Издательство Иркутского государственного

Аграрного университета

664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,

пос. Молодежный