

Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный
аграрный университет»

Т. Г. Молчанова

***ВОДОСНАБЖЕНИЕ
И ВОДООТВЕДЕНИЕ
С ОСНОВАМИ ГИДРАВЛИКИ***

Учебное пособие

Благовещенск
Дальневосточный ГАУ
2025

УДК 628
ББК 38.761
М75

Рецензент

*Михаил Владимирович Пищик, технический директор
ООО «Амурские коммунальные системы»*

*Рекомендовано к использованию
в учебном процессе методическим советом
факультета строительства и природообустройства
Дальневосточного государственного аграрного университета*

М75 Молчанова, Т. Г. Водоснабжение и водоотведение с основами гидравлики : учебное пособие / Т. Г. Молчанова ; Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2025. – 197 [1] с.

ISBN 978-5-9642-0659-0

Учебное пособие предназначено для организации проведения практических занятий по дисциплинам «Водоснабжение, водоотведение с основами гидравлики» и «Гидрогазодинамика». В нем содержатся теоретико-методические аспекты решения практических задач, охватывающих основные разделы указанных дисциплин: водоснабжение и водоотведение зданий; основные физические свойства жидкостей; гидростатика; гидродинамика; истечение жидкостей из отверстий и насадок; движение жидкостей в трубопроводах.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» (профиль «Промышленное гражданское строительство»), 20.03.01 «Техносферная безопасность» (профиль «Инженерная защита окружающей среды»).

УДК 628
ББК 38.761

ISBN 978-5-9642-0659-0 © Молчанова Т. Г., 2025
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Внутренний водопровод	7
1.1 Схемы внутреннего водопровода	7
1.2 Устройство вводов	8
2 Конструирование внутренней водопроводной сети	12
2.1 Прокладка трубопроводов	12
2.2 Водоразборная и запорная арматура	13
3 Расчет внутренней водопроводной сети	16
3.1 Определение расчетных расходов	16
3.2 Гидравлический расчет внутреннего водопровода	18
4 Конструирование внутренней канализации	24
4.1 Устройство внутренней канализации здания	24
4.2 Расчет системы бытовой канализации	31
4.3 Устройство внутренних водостоков	32
4.4 Конструирование и расчет дворовой канализации	34
5 Физические свойства жидкостей	37
Примеры решения задач	39
6 Гидростатика	42
6.1 Основное уравнение гидростатики	42
6.2 Свойства гидростатического давления	43
6.3 Сила давления на плоские поверхности	44
6.4 Сила давления на криволинейную поверхность, погруженную в жидкость	47
Примеры решения задач	49
7 Гидродинамика	79
7.1 Методика решения задач	79
7.2 Механическая энергия	79
7.3 Закон сохранения энергии для идеальной жидкости	82

7.4 Закон сохранения энергии для реальной жидкости	84
7.5 Закон сохранения массы	86
7.6 Гидравлические сопротивления	88
7.7 Режимы движения жидкости	96
7.8 Турбулентное движение жидкости	99
Примеры решения задач	104
8 Истечение жидкостей из отверстий и насадков	115
8.1 Классификация отверстий и их практическое применение	115
8.2 Истечение жидкости через отверстия в тонкой стенке при постоянном уровне	116
8.3 Истечение жидкости через отверстия в тонкой стенке при переменном уровне	120
8.4 Виды насадков и их применение. Истечение жидкости через насадки	124
8.5 Значения коэффициентов ϵ , φ и μ для насадков	128
Примеры решения задач	128
9 Движение жидкостей в трубопроводах	141
9.1 Классификация трубопроводов	141
9.2 Простой трубопровод	142
9.3 Сложные трубопроводы	144
9.4 Неустановившееся движение жидкости в трубопроводе	151
Примеры решения задач	158
Список рекомендуемой литературы	167
Приложение А. Контрольные задания	168
Приложение Б. Исходные данные для выполнения индивидуальных заданий по водоснабжению и водоотведению	180
Приложение В. Справочные данные для выполнения заданий по водоснабжению и водоотведению	190
Приложение Г. Справочные данные для гидравлических расчетов	194

ВВЕДЕНИЕ

«Внутренние сети водоснабжения и водоотведения зданий» выступают одной из основополагающих дисциплин при подготовке инженеров, работающих в области проектирования, строительства и эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения в городах и населенных пунктах. Внутренние сети водоснабжения и водоотведения современных зданий представляют собой комплекс инженерного оборудования холодного и горячего водоснабжения, канализации и водостоков. Этот комплекс необходим для жизненного обеспечения населения. Он определяет степень благоустройства, комфорта зданий, городов и населенных пунктов.

В стране динамично развивается промышленное и гражданское строительство, что должно привести к широкому развитию и совершенствованию производства санитарно-технического оборудования: приборов, арматуры, отдельных элементов санитарно-технических систем.

Необходимо повышение надежности и экономичности внутренних систем холодного и горячего водоснабжения, особенно гидравлической устойчивости, стабилизации напоров и экономии воды.

В предлагаемом учебном пособии изложены вопросы по устройству и проектированию внутреннего водоснабжения, водоотведения, горячего водоснабжения и внутренних водостоков зданий и объектов. Представлены рекомендации, необходимые для решения инженерных задач по созданию этих систем и подбору оборудования. Рассмотрены прогрессивные схемы систем по проектированию горячего и холодного водоснабжения зданий, методы определения расчетных расходов воды.

Целью учебного пособия выступает ознакомление студентов с основными теоретическими и практическими вопросами проектирования и эксплу-

атации систем, сооружений и установок по водоснабжению и канализации зданий, объектов и населенных пунктов; получение обучающимися знаний о законах равновесия и движения жидкостей и газов, способах применения этих законов при решении практических задач в области строительства и технологической безопасности.

Задачами учебного пособия является приобретение обучающимися теоретических и практических знаний в области водоснабжения, водоотведения; гидростатики, кинематики и динамики жидкостей и газов.

После изучения соответствующей темы студенты выполняют и представляют преподавателю на проверку контрольные задания, приведенные в приложении А. При изучении тем по водоснабжению и водоотведению необходимо выполнить индивидуальные задания, приведенные в приложении Б, и представить их на проверку преподавателю. Номер варианта задания устанавливается по двум последним цифрам номера зачетной книжки.

1 ВНУТРЕННИЙ ВОДОПРОВОД

1.1 Схемы внутреннего водопровода

Различают тупиковые, кольцевые, зонные и комбинированные схемы водоснабжения зданий. По расположению магистральных трубопроводов они бывают с нижней и верхней разводками.

Кольцевые сети применяют при недопустимости перерыва в водоснабжении здания водой в многоэтажных зданиях с противопожарным водопроводом, а также в производственных зданиях.

Комбинированные сети (тупиковые и кольцевые) применяют в крупных зданиях с большим разбросом водоразборных устройств.

Зонные сети представляют собой несколько сетей в одном здании, соединенных друг с другом, или отдельных. Сети отдельных зон могут иметь самостоятельные вводы и насосные установки. Они применяются только в зданиях повышенной этажности.

При нижней разводке магистральные трубопроводы размещают в нижней части здания, а при верхней – на чердаке или под потолком верхнего этажа.

Если в здании допускается перерыв в подаче воды и количество пожарных кранов не превышает 12, устраивается *тупиковая схема*.

При проектировании тупиковой схемы водопровод жилого здания с нижней разводкой магистрали располагают вдоль внутренних капитальных стен под потолком подвала. Особое внимание при проектировании уделяется рациональному размещению санитарно-технических устройств в здании. Санитарные узлы и водоразборную арматуру группируют поэтажно, располагая их друг над другом; трубопроводы прокладывают по кратчайшему расстоянию.

При решении планировки помещений и санитарно-бытовых узлов рациональным является линейная планировка, при которой приборы размещаются на одной монтажной стене.

1.2 Устройство вводов

Ввод – это трубопровод, соединяющий наружный водопровод с внутренним водопроводом здания. Он состоит из узла присоединения к наружной городской сети, подземного трубопровода и водомерного узла.

Узел присоединения (врезки) ввода, состоящий из тройника и задвижки (для возможности отключения ввода на ремонт), размещается в колодце (диаметром не менее 700 мм) в месте его присоединения к наружному водопроводу. Подземный трубопровод прокладывается с уклоном 0,003–0,005 в сторону наружной сети. Водомерный узел располагается внутри здания (если запроектирована система без повысительной насосной установки). Он может быть установлен на расстоянии одного метра от наружной стены в помещении подвального этажа (сухого с положительной температурой). Водомерный узел жестко крепится к стене на кронштейнах. Ось водосчетчика должна быть расположена на высоте 0,3–1 м от пола.

При проектировании тупиковой схемы внутреннего водопровода, когда допустимы перерывы в подаче воды, в водомерном узле обязательно предусматривается обводная линия, на которой устанавливается опломбированная задвижка.

В зданиях устанавливаются водомерные узлы унифицированных конструкций с крыльчатыми и турбинными водомерами (рис. 1.1).

Ввод водопровода проектируется, по возможности, по кратчайшему расстоянию к зданию.

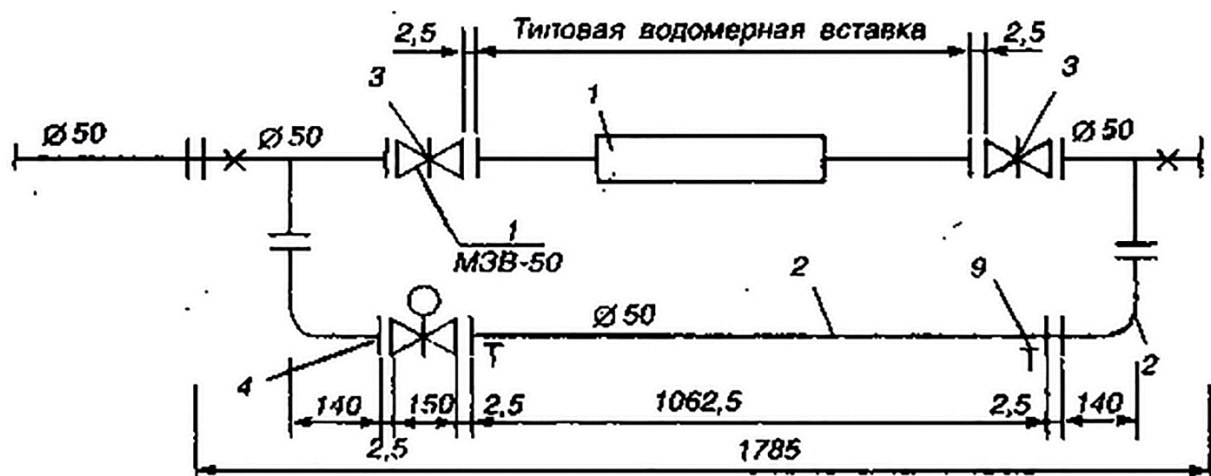
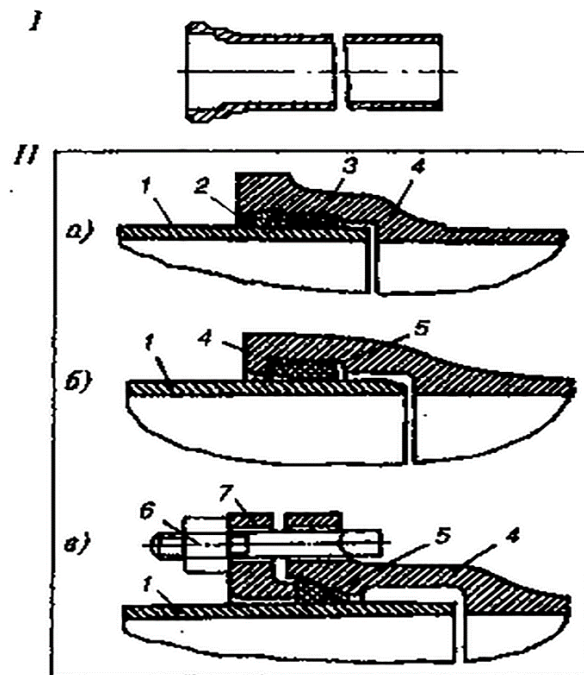


Рисунок 1.1 – Ввод водопровода

При расчетном диаметре до 65 мм ввод может быть запроектирован из стальных водогазопроводных труб, соединяемых на сварке с обязательной противокоррозионной гидроизоляцией, с применением рулонных гидроизоляционных материалов. При диаметре более 65 мм применяются чугунные раструбные трубы (рис. 1.2, а) с обязательной заделкой стыка (рис. 1.2, б). В последние годы для прокладки вводов используют пластмассовые трубы. Они долговечны и имеют достаточную механическую прочность.

Минимальную глубину заложения ввода принимают ниже глубины промерзания грунта на 0,5 м (до низа трубы). Пересечение ввода со стенами подвала следует выполнять в сухих грунтах с зазором 0,2 м между трубопроводом и строительными конструкциями с заделкой отверстия в стене водонепроницаемыми и газонепроницаемыми (в газифицированных районах) эластичными материалами. В мокрых грунтах пересечение трубы ввода со стеной подвала устраивается с помощью сальниковых уплотнений.

Расстояние по горизонтали в свету между вводами хозяйственно-питьевого водопровода и выпусками канализации или водостоков должно быть не менее 1,5 м при диаметре ввода более 200 мм.



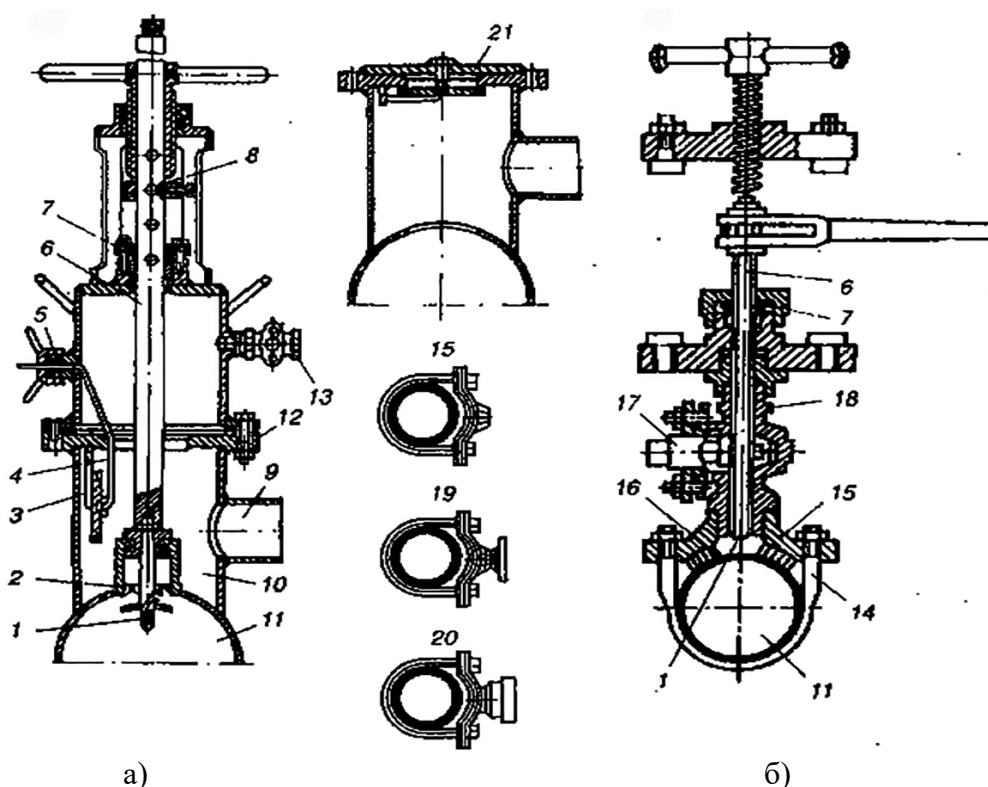
I – общий вид труб; II – заделка стыков: а) раструбное с заделкой пеньковой прядью и цементом; б) то же, с резиновым уплотнителем; в) то же, фальцевое с резиновым уплотнителем; 1 – конец трубы; 2 – цемент; 3 – пеньковая прядь; 4 – раструб; 5 – резиновый уплотнитель; 6 – болт с гайкой; 7 – нажимной фланец

Рисунок 1.2 – Соединение чугунных водопроводных труб

Два ввода и более следует предусматривать в следующих зданиях: в которых установлено двенадцать и более пожарных кранов; в жилых зданиях или группах зданий с числом квартир свыше 400; в кинотеатрах с числом мест свыше 300; в театрах и клубах со сценой независимо от числа мест; в банях с числом мест более 200; в прачечных на 2 тонны сухого белья в смену.

В ряде случаев возникает необходимость врезки трубы ввода в действующую наружную водопроводную сеть. Это можно осуществить с помощью специальных устройств (рис. 1.3).

Устройство, представленное на рисунке 1.3 (а) состоит из патрубка, камеры с сальником и краном для сброса давления воды, режущего инструмента (фрезы со сверлом). В патрубке, приваренном к трубе ввода, имеется клапан. После высверливания отверстия вал со сверлом поднимают, клапан закрывают, сбрасывают давление в верхней камере. Головку с верхней камеры снимают и приваривают клапан (заглушку).



а) фрезное приспособление, крепящееся на сварке; б) то же, с помощью седелки
1 – сверло; 2 – чашечная фреза; 3 – клапан; 4 – тросик клапана; 5 – сальник тросика;
6 – вал; 7 – сальник вала; 8 – подающее устройство; 9 – присоединяемая труба ввода;
10 – переходной патрубков; 11 – действующий трубопровод; 12 – фланец; 13 – спускной
кран; 14 – хомут; 15 – седелка резьбовая; 16 – резиновая прокладка; 17 – пробковый кран;
18 – место присоединения трубы ввода; 19 – фланцевая седелка; 20 – раструбная седелка;
21 – заглушка

Рисунок 1.3 – Приспособление для врезки вводов внутреннего водопровода в действующий стальной наружный водопровод

При необходимости высверливания в трубе отверстия (диаметром не более одной трети диаметра трубы) применяется седелка (рис. 1.3, б).

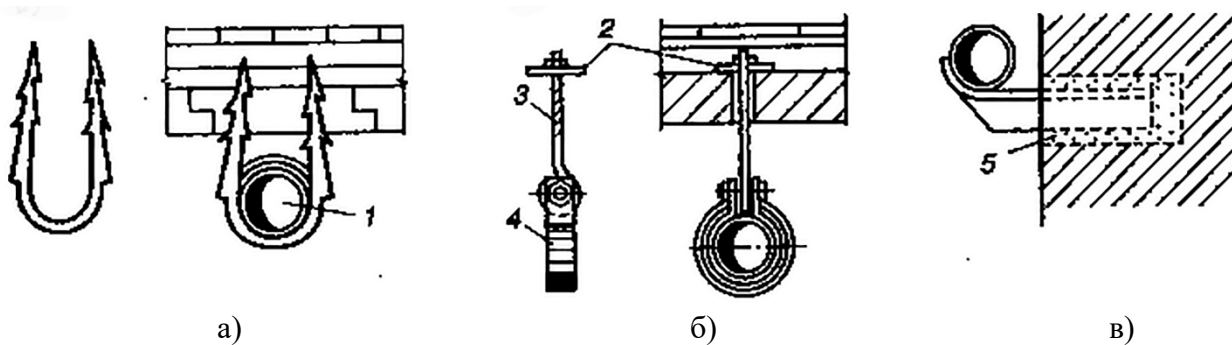
Она представляет собой чугунную фасонную деталь, которая крепится к трубе хомутом на резиновой прокладке для присоединения запорной арматуры (проходного пробкового крана). Для высверливания в трубе отверстия к запорной арматуре прикрепляется сверлильное приспособление. После высверливания отверстия приспособление снимают и присоединяют трубу ввода (позиция 18 на рисунке 1.3).

По конструкции различают резьбовые, фланцевые, раструбные седелки. Все они показаны на рисунке 1.3 (б).

2 КОНСТРУИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

2.1 Прокладка трубопроводов

При нижней разводке магистральный трубопровод прокладывают под толком подвального этажа здания (на 0,5 м от него) или технического подполья. При этом в качестве средства крепления трубопровода к строительным конструкциям могут использоваться кронштейны, подвески и др. (рис. 2.1).



а) хомут; б) подвеска; в) кронштейн

1 – труба; 2 – шайба; 3 – подвеска; 4 – хомут; 5 – крепежная пробка со спиралью

Рисунок 2.1 – Средства крепления трубопроводов

При отсутствии подвала и технического подполья магистраль может прокладываться в подпольных каналах первого этажа, иногда вместе с трубопроводами отопления, горячего водоснабжения. Она может располагаться под ними или проходить рядом с ними.

Прокладка магистральных линий в земле под полом не допускается. Подпольные каналы бывают непроходные (высотой 0,3–0,7 м), проходные (высотой 1,7–1,8 м) и полупроходные (высотой 0,8–1 м). Ширина каналов принимается от 0,3 до 1 м. Каналы выполняют из негорючих материалов. Сверху их перекрывают съемными плитами.

Уклон магистральной трубы принимается 0,003–0,005 в сторону ввода. При прокладке магистрального трубопровода, стояков, подводок к поливочным кранам следует предусматривать их тепловую изоляцию.

Стояки и подводки к водоразборным устройствам прокладывают двумя основными способами: открытой прокладкой – по колоннам, балкам, фермам, стенам; скрытой – в бороздах, каналах и панелях, санитарно-технических кабинках вместе с трубопроводами другого назначения.

Поскольку к отделке зданий предъявляются повышенные требования, предпочтение отдается скрытой прокладке трубопроводов. Борозды и каналы для трубопроводов должны быть выполнены при производстве строительных работ. Они заделываются штукатуркой по сетке или облицовкой, а в местах установки арматуры предусматриваются дверки.

В местах пересечения вертикальных трубопроводов с перекрытиями на трубы надевают гильзы из толя, листовой стали и т. д.

2.2 Водоразборная и запорная арматура

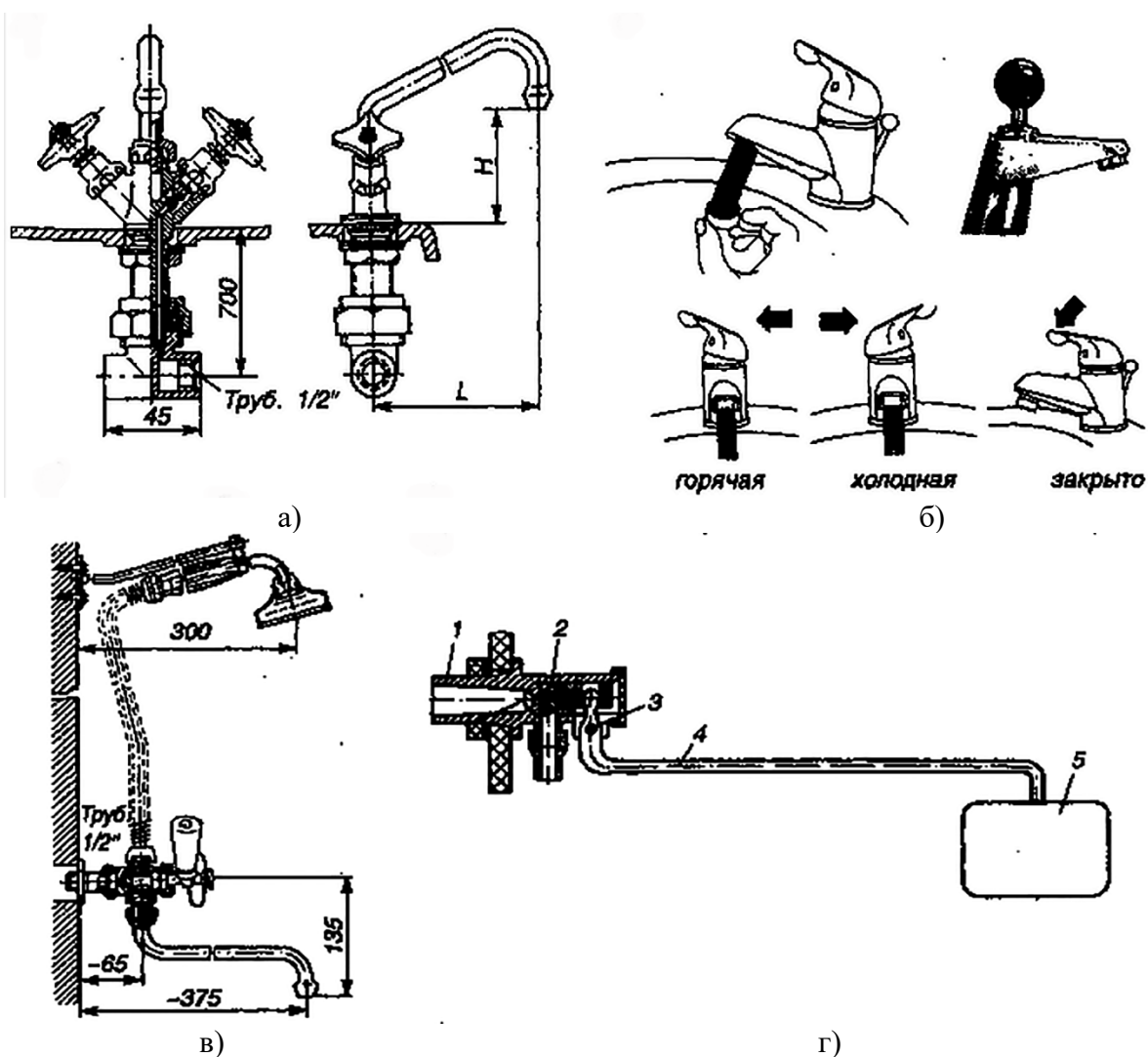
К водоразборной арматуре, устанавливаемой в здании, следует отнести туалетные краны умывальников; смесители моек ванн и умывальников; поплавковые клапаны смывных бачков унитазов (рис. 2.2).

Водоразборная арматура во многом определяет успешное функционирование всей системы водопровода здания. Поэтому на подводке водопровода в квартиру после запорного вентиля рекомендуется устанавливать грязевик с фильтром, что обеспечивает оптимальные условия для эксплуатации смесительной арматуры.

В последние годы получили распространение, вместо широко применяемых для смывных бачков поплавковых клапанов противодействия, клапаны попутного давления, которые отличаются тем, что при увеличении давления

2. Конструирование внутренней водопроводной сети

на подводке к ним возрастает и усилие их закрытия, то есть этот клапан закрывается крепче ночью, когда в поплавковых клапанах происходят утечки.



а) смеситель СМ-УМ-Ц с верхней смесительной камерой и с центральной установкой на умывальнике (елочка); б) однорукоятный смеситель типа 20575-F; в) общий для ванны и умывальника смеситель с душевой сеткой на гибком шланге; г) поплавковый клапан смывного бачка унитаза (1 – корпус; 2 – седло; 3 – ось; 4 – рычаг; 5 – поплавок)

Рисунок 2.2 – Основные виды водоразборной арматуры

На сети внутреннего водопровода устанавливается запорная арматура:

при диаметре менее 50 мм – вентили;

при диаметре более 50 мм – задвижки.

При этом запорная арматура устанавливается у основания стояков; у клапанов смывных бачков унитазов; у газовых водонагревателей; в водомерном

узле; на вводе водопровода в квартиру; у поливочных кранов; на разветвлениях магистрали.

Принимается один поливочный кран на каждые 60–70 м периметра здания. Краны располагаются в нишах наружных стен зданий на высоте 0,35 м от отмостки тротуара.

На подводке к поливочному крану от сети внутреннего водопровода устанавливают вентиль и спускной кран (пробку) для опорожнения кранов на зимний период.

3 РАСЧЕТ ВНУТРЕННЕЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

3.1 Определение расчетных расходов

Сети внутреннего водопровода рассчитываются на пропуск расчетных секундных расходов воды ко всем водоразборным устройствам в здании.

Показателем водообеспеченности сети служит подача нормативного расхода к диктующему водоразборному устройству (наиболее высоко и далеко расположенному) от ввода водопровода в здание с максимальным значением свободного напора (H_f) (приложение В). Расчет сети внутренних водопроводов производится по максимальному секундному расходу воды.

Максимальный секунднй расход воды в здании q (q^o , q^c , q) определяется по формуле (3.1):

$$q = 5 \cdot a \cdot q \quad (3.1)$$

где q – секунднй расход воды одним прибором, л/с (приложение В);
 a – коэффициент, зависящий от произведения общего числа приборов N , то есть $a = f(PN)$ (приложение В).

При отсутствии данных о расходах воды и технических характеристик санитарно-технических приборов в жилых и общественных зданиях допускается принимать значения секундного расхода воды одним прибором 0,3 л/с, а для подачи холодной воды – 0,2 л/с.

Вероятность действия водоразборных устройств (P) при наличии одинаковых потребителей в здании может быть определена по формуле (3.2):

$$P = q_{hru} \cdot U / 3600 \cdot q_o \cdot N \quad (3.2)$$

где q_{hru} – норма расхода воды потребителем в час наибольшего водопотребления, л/ч (приложение В);

U – количество жителей в здании.

Количество жителей в здании можно определить, зная санитарную норму площади на одного человека (региональный показатель), количество квартир в здании и жилую площадь квартиры.

В зданиях с одинаковыми потребителями на расчетных участках принимают значение P , определенное для всей системы водоснабжения, то есть для всех N водоразборных устройств в здании.

Расчетный суточный расход воды в здании ($\text{м}^3/\text{сут}$) может быть установлен по формуле (3.3):

$$q_U = U_i \cdot q_u / 1000 \quad (3.3)$$

где U_i – число потребителей в здании;

q_u – общая норма расхода воды одним потребителем в сутки наибольшего недовопотребления, л (приложение В).

Расчетные максимальные часовые расходы вычисляются по методике, аналогичной методике определения максимальных секундных расходов. Исходными параметрами являются часовые расходы воды водоразборной арматурой, определяемые по приложению Б.

Расчетный часовой расход определяется по формуле (3.4):

$$q_{hr} = 0,005 \cdot q_{0hr} \cdot a_{hr} \quad (3.4)$$

где a_{hr} определяется по таблицам приложения В.

При этом между величинами P и P_{hr} имеется следующее соотношение:

$$P_{hr} = \frac{3600}{q_{0hr}} \cdot P \cdot q_0 \quad (3.5)$$

При выборе водомера учитываются его гидрометрические характеристики и допустимые потери напора. Подбор водомера рекомендуется проводить, в первую очередь, на пропуск хозяйственно-питьевого расхода. Желательно, чтобы выбранный типоразмер водомера пропускал и противопожарный расход воды. Но в случае, если это невозможно, противопожарный расход пропускается, минуя счетчик, через открытую задвижку на обводной линии.

3. Расчет внутренней водопроводной сети

Тип водомера и его сопротивление (S) определяются по приложению Г.

Потери в водомере находят по формуле (3.6):

$$h_W = S \cdot q^2 \quad (3.6)$$

где q – максимальный секундный расход воды в здании на участке (ВУ–ввод) (рис. 3.1).

При этом потери в крыльчатых водомерах не должны превышать 5 м, а в турбинных – 2,5 м.

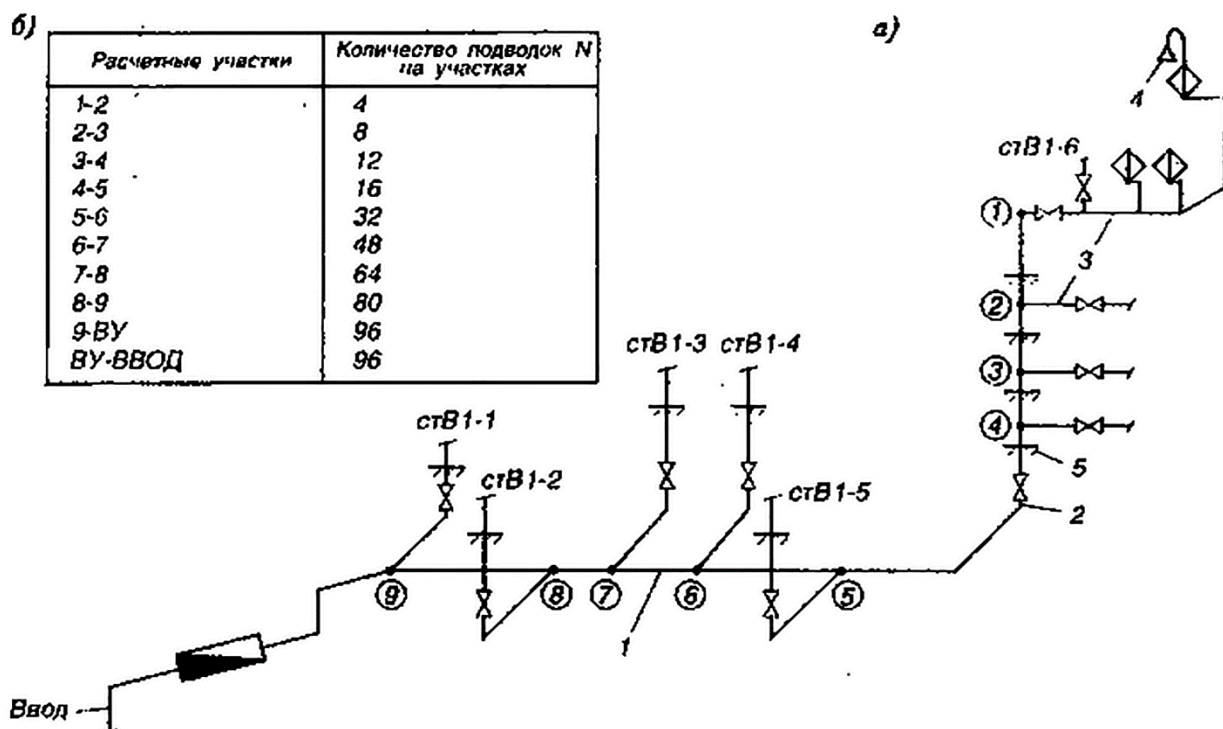
3.2 Гидравлический расчет внутреннего водопровода

Целью гидравлического расчета является *определение экономически выгодных диаметров труб для пропуска расчетных расходов воды и потерь напора от диктующего (водоразборного устройства в здании) до места присоединения ввода к наружной водопроводной сети*. Он проводится в следующей последовательности.

Зная место расположения ввода в здание, на плане подвала здания проектируется разводка сети внутреннего водопровода и строится расчетная аксонометрическая схема внутренней водопроводной сети (рис. 3.1, а). На схеме выбирается расчетный стояк (самый удаленный от ввода) и расчетное направление от диктующего устройства до места присоединения ввода к наружному водопроводу.

Аксонометрическая схема разбивается на расчетные участки так, чтобы в пределах участка не изменялся расход. Определяется количество водоразборных устройств N на расчетных участках.

Устанавливается расчетное количество жителей U в здании. Находится величина вероятности действия водоразборных устройств P по формуле (3.2).



- а) расчетная (безразмерная) аксонометрическая схема внутреннего водопровода;
 б) пример определения количества подводок водопровода N на расчетных участках
 1 – магистральный трубопровод; 2 – расчетный стояк; 3 – подводки к водоразборным устройствам; 4 – диктующее водоразборное устройство (душевая сетка смесителя ванны)

Рисунок 3.1 – Расчетная аксонометрическая схема

На каждом участке определяется произведение P и N приборов, снабжающихся водой на данном участке, а затем по полученному значению этого произведения определяется коэффициент a (приложение В).

На каждом расчетном участке вычисляется секундный расход q с использованием формулы (3.1). Определяются длины расчетных участков.

По полученному расходу по таблицам гидравлического расчета (приложение Г) выбирается диаметр d каждого расчетного участка, исходя из значения экономических скоростей движения воды (0,7–1,2 м/с).

Максимальная скорость во внутреннем водопроводе не должна превышать 3 м/с. Для каждого выбранного диаметра расчетного участка определяют потери на единицу длины – $1000i$ (для удобства обращения с малыми числами значение i увеличено в 1 000 раз) (приложение Г).

Определяются потери напора на каждом расчетном участке:

3. Расчет внутренней водопроводной сети

$$H_i = 0,001 \cdot L \cdot (1 + K) \cdot 1000i \quad (3.7)$$

где L – длина расчетного участка сети, м;

K – коэффициент, учитывающий потери на местные сопротивления в соединениях труб и арматуре; для хозяйственно-питьевых водопроводов он принимается равным 0,3.

Определяется сумма потерь напора всех участков в здании H_i от диктующего водоразборного устройства до водомерного узла (табл. 3.1). Потери на участке от водомерного узла до места присоединения ввода к наружному водопроводу (ВУ–Ввод) составляют потери на вводе. Гидравлический расчет внутренней водопроводной сети сводится в таблицу 3.1. В таблице указаны данные из примера, рассмотренного ниже.

Таблица 3.1 – Гидравлический расчет внутреннего водопровода

Номер участка	Длина участка, м	Число водоразборных устройств (N)	Вероятность действия (P)	N · P	a	Расчетный расход (q), л/с	Диаметр (D), мм	Скорость (V), м/с	Потери напора участка (H _i)	
									на единицу длины, мм	на всем участке, м
1–2	4,6	4	0,0058	0,023	0,222	0,22	15	1,19	361	1,66
2–3	2,8	8	0,0058	0,046	0,266	0,27	20	0,80	123	0,34
3–4	2,8	12	0,0058	0,070	0,304	0,30	20	0,94	155	0,43
4–5	5,2	16	0,0058	0,093	0,335	0,34	20	1,10	202	1,05
5–6	3,0	32	0,0058	0,186	0,435	0,44	25	0,83	88	0,26
6–7	3,2	48	0,0058	0,278	0,518	0,52	25	0,97	120	0,38
7–8	3,0	64	0,0058	0,371	0,588	0,59	25	1,10	150	0,45
8–9	5,8	80	0,0058	0,464	0,654	0,65	25	1,20	181	1,05
9–ВУ	5,5	96	0,0058	0,557	0,720	0,72	32	0,75	51	0,28
									<i>H_i = 5,9</i>	

Определяется величина требуемого напора в здании ($H_{\text{треб}}$):

$$H_{\text{треб}} = H_{\text{геом}} + H_i + H_{\text{ВВ}} + h_W + H_f \quad (3.8)$$

где $H_{\text{геом}}$ – геометрическая высота подачи воды в здание (формула (3.9));

H_i – сумма потерь напора на расчетных участках (формула (3.7));

$H_{\text{ВВ}}$ – потери напора на вводе;

h_W – потери напора в водомере (формула (3.6));

H_f – свободный напор в диктующем приборе (приложение В).

Геометрическая высота подачи воды в здание определяется как разность отметок изливного отверстия диктующего водоразборного устройства и отметки первого этажа над точкой присоединения ввода к наружному водопроводу. При этом применяется формула (3.9):

$$H_{geom} = \text{отм}_{1\text{-го этажа}} - \text{отм}_{\text{гор.водопр}} + h_{\text{эт}} \cdot (N_{\text{эт}} - 1) + h_{\text{прев}} \quad (3.9)$$

где $\text{отм}_{1\text{-го этажа}}$ – отметка первого этажа;

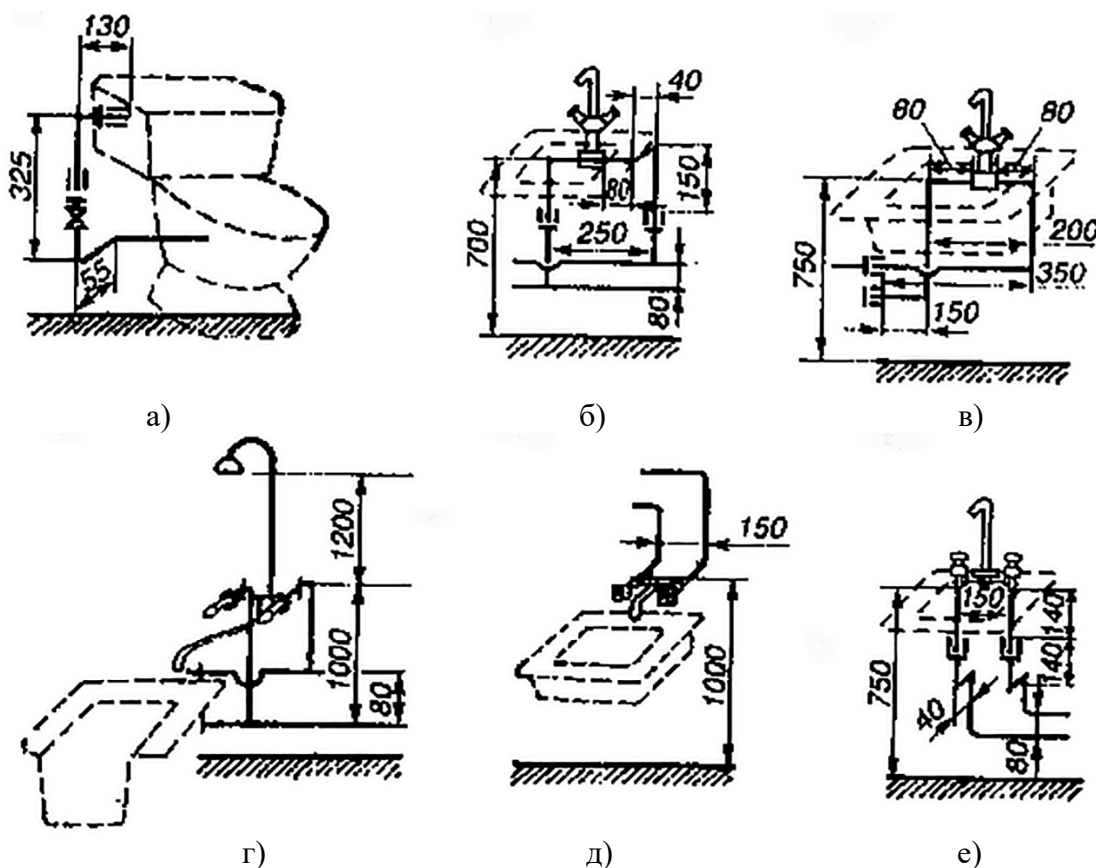
$\text{отм}_{\text{гор.водопр}}$ – отметка городского водопровода;

$h_{\text{эт}}$ – высота этажа, м;

$N_{\text{эт}}$ – количество этажей в здании;

$h_{\text{прев}}$ – высота изливного отверстия диктующего прибора, м (рис. 3.2).

На рисунке 3.2 показаны установочные размеры основных санитарно-технических приборов.



а) поплавковый клапан смывного бачка унитаза; б) центральный смеситель умывальника; в) центральный смеситель мойки; г) душевая сетка смесителя ванны; д) настенный смеситель; е) смеситель с нижней камерой смешения

Рисунок 3.2 – Установочные размеры основной водоразборной арматуры

3. Расчет внутренней водопроводной сети

Рассмотрим конкретный пример гидравлического расчета внутреннего водопровода. Для примера примем 4-этажное здание с централизованным горячим водоснабжением с числом водоразборных устройств в квартире (N), равным 4 (смеситель ванны с душевой сеткой, смесители мойки, умывальника, клапан смывного бачка унитаза). Количество жителей в здании $U = 72$ чел.; длина ввода – 15 м; высота этажа $h_{эт} = 2,8$ м; отметка 1-го этажа составляет 25,6 м; отметка городского водопровода – 22,2 м; гарантийный напор водопровода равен 30 м.

По расчетной (без масштабной) аксонометрической схеме холодного водоснабжения определяется количество водоразборных устройств на расчетных участках (рис. 3.1).

При оборудовании здания централизованным горячим водоснабжением принимаем по приложению Б:

$q_0 = 0,2$ л/с – расход холодной воды санитарно-техническим прибором;

$q_{hru} = 5,6$ л/ч (15,6 – 10) – норма расхода холодной воды в час наибольшего водопотребления для домов с ваннами, оборудованными душами, с централизованным горячим водоснабжением.

Вероятность действия водоразборных устройств по формуле (3.2) равна:

$$P = 5,6 \cdot 72/3600 \cdot 0,2 \cdot 96 = 0,00583$$

Определяем произведение NP на участке сети (ВУ-Ввод):

$$N \cdot P = 0,00583 \cdot 96 = 0,5596 = 0,56$$

где 96 – количество водоразборных устройств.

Коэффициент a определяется по приложению В.

Если вычисленное значение NP в таблице отсутствует, то значение a принимается для ближайшего большего NP . В данном случае $a = 0,717$.

Максимальный секундный расход холодной воды на этом участке, вычисленный по формуле (3.1), составит:

$$q = 5 \cdot 0,2 \cdot 0,717 = 0,72 \text{ л/с}$$

По приложению Д по расходу и скорости (скорость принимаем от 0,7 до 1,5 м/с) определяем диаметр, скорость и потери напора $1000i$.

При расходе $q = 0,72$ л/с принимаем диаметр равным 32 мм; скорость – 0,75 м/с; $1000i = 50$ мм/м.

Потери напора на участке ВУ–Ввод определяем следующим образом:

$$H_{\text{ВВ}} = 0,001 \cdot 15 \cdot 50 = 0,77 \text{ м}$$

где 15 метров соответствует длине ввода.

По аналогии определяем потери напора на расчетных участках, результаты заносим в таблицу 3.1.

Тогда сумма потерь по длине трубопровода с учетом местных сопротивлений составит:

$$H_i = 5,9 \cdot 1,3 = 7,67 \text{ м}$$

где 1,3 соответствует коэффициенту K , учитывающему потери на местные сопротивления для хозяйственно-питьевых водопроводов.

Потери в водомере определяем по формуле (3.6). Принимаем водомер крыльчатый с диаметром 32 мм, сопротивлением 1,3 м по приложению Г. В данном случае величина потерь составит:

$$h_W = 1,3 \cdot 0,72^2 = 0,67 \text{ м}$$

Геометрическая высота подачи воды в здание находится по формуле (3.9):

$$H_{\text{геом}} = 25,6 - 22,3 + 2,8 \cdot (4 - 1) + 2,2 = 13,9 \text{ м}$$

Величину свободного (рабочего) напора у диктующего устройства определяем по приложению А ($H_f = 3$ м). Высоту изливного отверстия диктующего прибора для душа принимаем по данным рисунка 3.2.

Величину требуемого напора определяем по формуле (3.8):

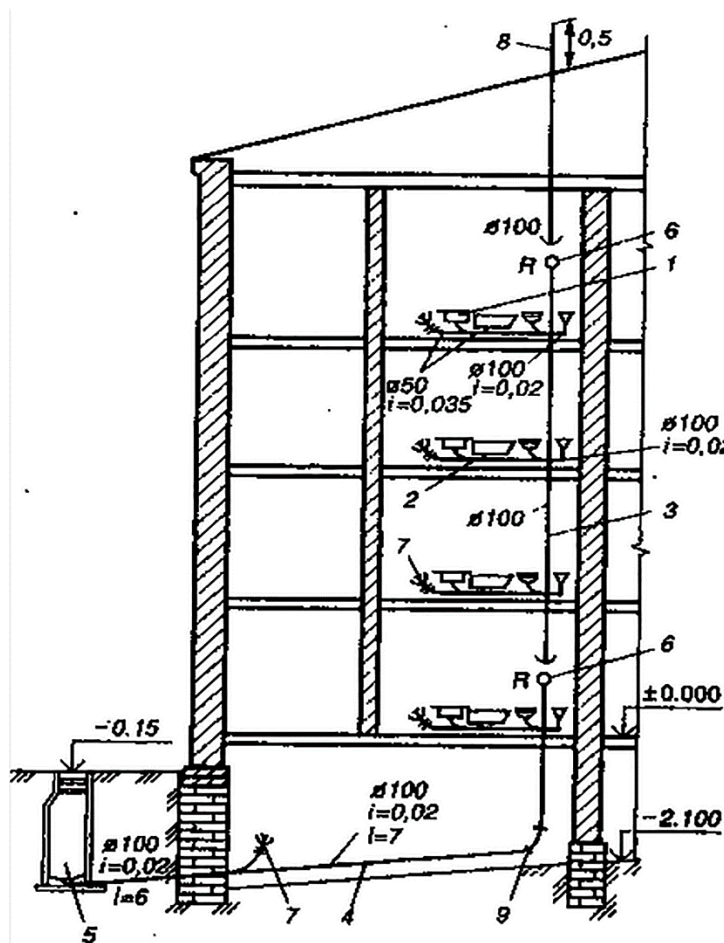
$$H_{\text{треб}} = 13,9 + 7,67 + 0,77 + 0,67 + 3,0 = 26,01 \text{ м}$$

Вывод. Так как $H_{\text{треб}} \leq H_{\text{гарант}}$, напор в городской сети является достаточным для подачи воды к диктующему прибору.

4 КОНСТРУИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КАНАЛИЗАЦИИ

4.1 Устройство внутренней канализации здания

Внутренняя канализация состоит из элементов, представленных на рисунке 4.1. Приведем описание механизма их работы.



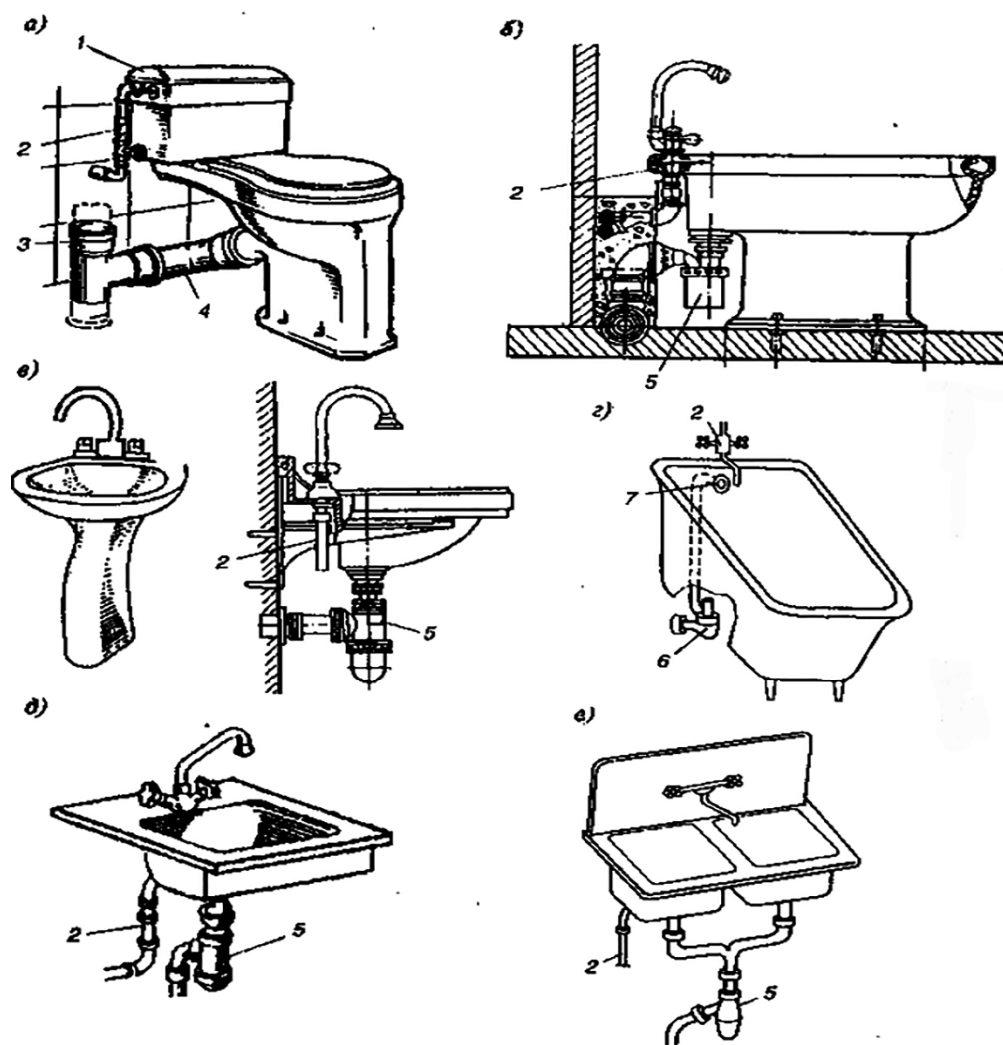
- 1 – приемники сточных вод; 2 – отводные трубопроводы; 3 – канализационный стояк;
4 – выпуск; 5 – смотровой колодец; 6 – ревизии; 7 – прочистки; 8 – вытяжная часть канализационного стояка; 9 – отвод

Рисунок 4.1 – Устройство внутренней канализации жилого дома (основные элементы)

Сточная жидкость из приемников сточных вод 1 (ванн, умывальников, моек и унитазов), расположенных в санитарных узлах квартир, по отводным

трубопроводам 2 поступает в канализационный стояк 3 (в здании их несколько), который транспортирует сточные воды в выпуск 4 (один или несколько), располагающийся в подвальном этаже здания или техническом подполье, который, в свою очередь, транспортирует сточную жидкость в колодец дворовой или внутриквартальной сети 5. В систему входят устройства для прочистки 6, 7 и вентиляции сети 8.

В жилых зданиях устанавливаются различные **модификации приемников сточных вод**: ванн, умывальников, кухонных моек, унитазов, гигиенических душ-биде отечественного и зарубежного производства (рис. 4.2).



а) унитазы; б) гигиенический душ-биде; в) умывальники; г) ванны; д), е) мойки;
1 – смывной бачок; 2 – подводка водопровода; 3 – стояк; 4 – выпуск; 5 – сифон;
6 – напольный сифон; 7 – перелив

Рисунок 4.2 – Приемники сточных вод

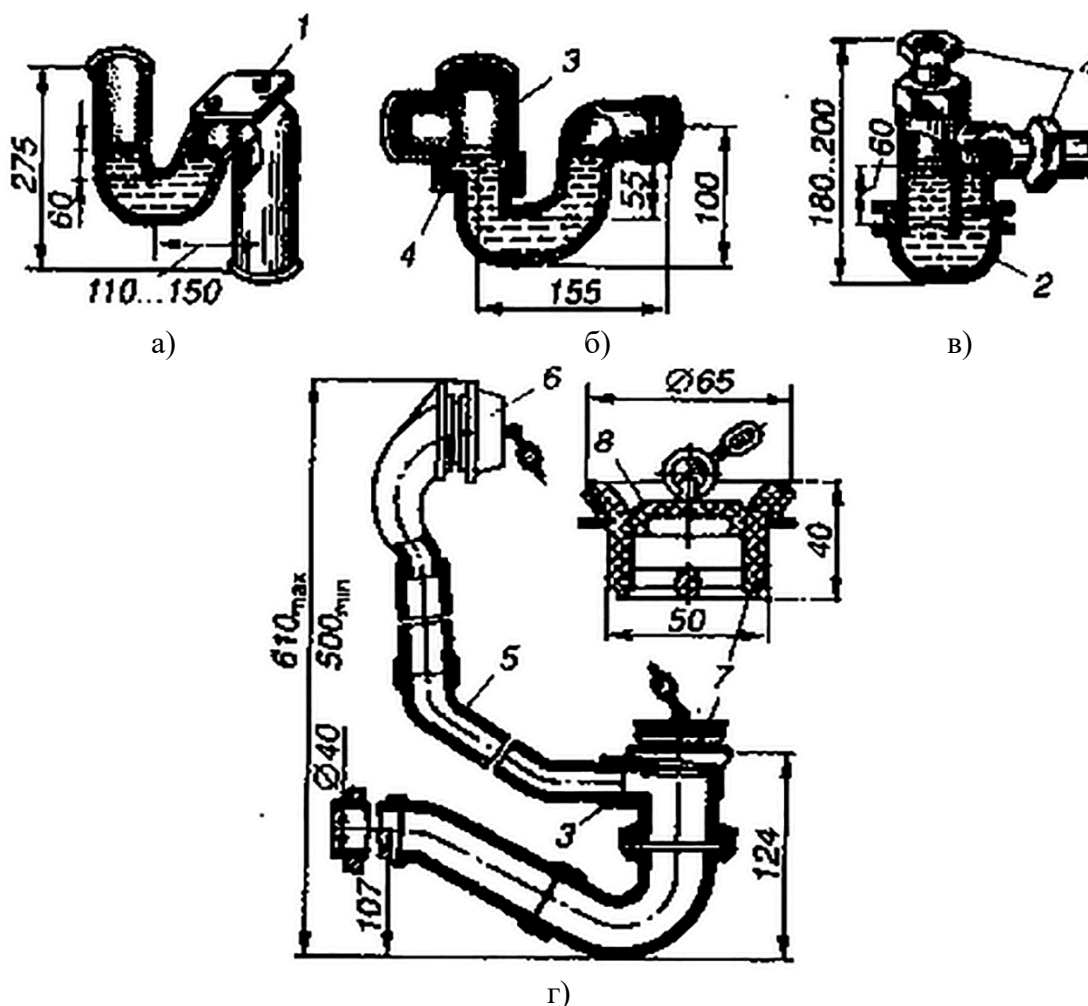
4. Конструирование внутренней канализации

Благодаря высоким санитарным качествам наиболее широко в жилых и общественных зданиях применяются *тарельчатые унитазы* с низко расположенным смывным бачком типа «Компакт». Унитаз выпускают с прямым и косым выпуском. Унитазы с косым выпуском позволяют присоединить прибор непосредственно к канализационному стояку или к отводному трубопроводу, уложенному на том же перекрытии, где установлены унитазы. Такое присоединение удобно при монтаже труб в сантехнических кабинках.

Гигиенический индивидуальный душ-биде в настоящее время также широко используется в жилых зданиях. *Умывальники* выпускают различной формы – круглые, прямоугольные и т. д. Они выполняются из керамики (фаянса, фарфора), пластмассы и оборудуются выпуском с решеткой, переливом, приставным гидрозатвором, а также водопроводной смесительной арматурой. В последние годы широко применяют умывальники на постаменте, закрывающие выпуск и трубы. *Ванны* выпускают различных форм и размеров в зависимости от требований эксплуатации, комфортности и назначения. *Мойки* для отвода хозяйственных стоков устанавливают в кухнях; их изготавливают чугунными эмалированными, пластмассовыми, стальными из нержавеющей стали на одно и два отделения.

Все приемники должны быть оборудованы **гидравлическими затворами** (сифонами), кроме тех, в конструкциях которых уже имеется гидрозатвор (например, унитазы). Гидравлический затвор представляет собой изогнутый канал или трубу, заполненную водой высотой 60 мм, надежно закрывающий выход газов после сброса стоков в канализационную сеть.

Наибольшее распространение получили гидрозатворы, представленные на рисунке 4.3; для ванн устанавливают напольный сифон с тройником для присоединения переливной трубы (рис. 4.3, г). Сифоны изготавливают из чугуна, керамики, пластмасс.



а), б) U-образные; в) бутылочный; г) напольный для ванн
с присоединением переливной трубы

1 – болт; 2 – крышка; 3 – тройник; 4 – накидная гайка; 5 – переливная труба;
6 – водопереливная решетка; 7 – выпуск

Рисунок 4.3 – Гидрозатворы

Монтажное положение элементов системы канализации и ее оборудования зависит от их типа и способа прокладки. Один из возможных вариантов монтажного положения отводных труб приведен на рисунке 4.4.

Отводные трубы от приборов могут быть проложены открыто, а также скрыто в бороздах, панелях и монтажных коридорах. Все отводные трубы прокладываются по кратчайшему расстоянию к стояку. От ванн, моек и умывальников отводные трубы прокладываются диаметром 50 мм с уклоном 0,035 к стояку, для самотечного режима движения сточных вод. От унитаза отводная труба проектируется диаметром 100 мм с уклоном 0,02.

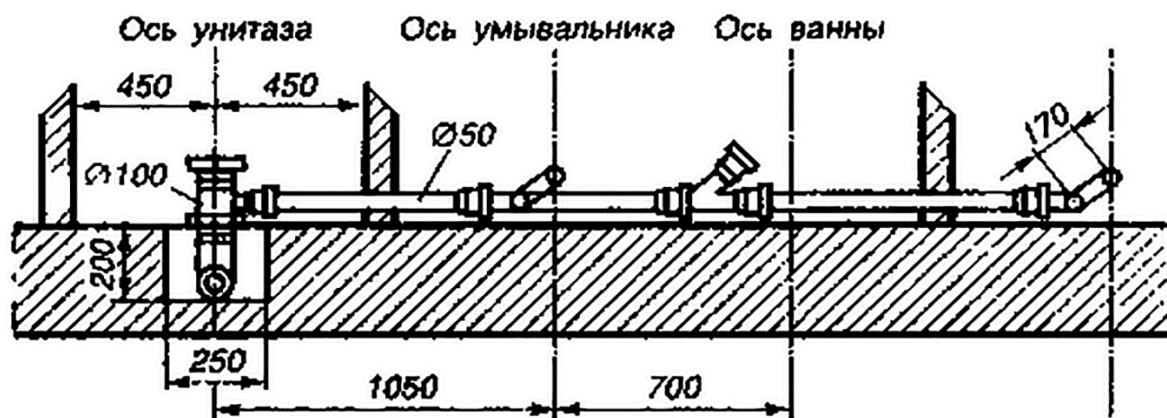
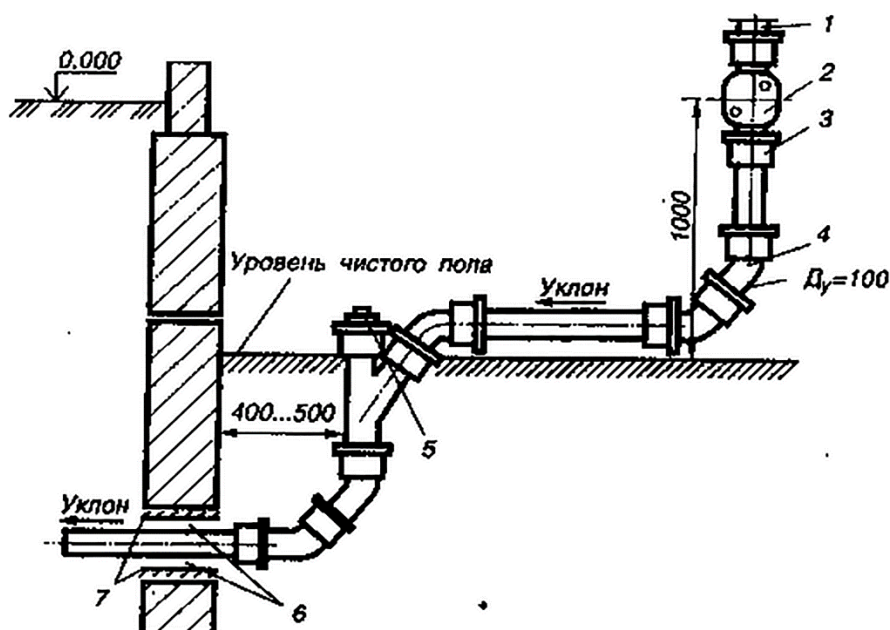


Рисунок 4.4 – Монтажное положение труб

Наибольший уклон трубопровода не должен превышать 0,15. Двустороннее присоединение отводных труб от ванн к одному стояку на одной отметке допускается только с применением косых крестовин. Размещают приемники сточных вод по этажам здания друг над другом в целях уменьшения количества стояков. К стоякам отводные трубы могут присоединяться и с помощью косых тройников. Для присоединения унитаза непосредственно к стояку используются отводы-кресты. Двухплоскостная крестовина на стояках используется для присоединения отводных линий 50 и 100 мм, расположенных в разных плоскостях.

Конструктивно диаметр канализационных стояков принимается одинаковым по всей высоте и равным наибольшему диаметру присоединяемых отводных труб. Стояки размещают либо открыто у стен и перегородок (ближе к углу), либо скрыто в монтажных шахтах кабин.

При тупиковой схеме и наличии неэксплуатируемого подвала выпуски могут быть проложены по полу подвала на столбиках или подставках с обеспечением плавных присоединений к стоякам (двумя отводами по 135 градусов) (рис. 4.5). Конструктивно диаметр выпуска можно принять по большему диаметру присоединяемых стояков. В 2-подъездных зданиях обычно проектируется два выпуска. При устройстве одного выпуска из здания, к которому присоединяются все стояки, его диаметр обязательно принимается по расчету.



- 1 – стояк; 2 – ревизия; 3 – крепление стальным крючком под раструб;
4 – отвод с углом 135 град.; 5 – пробка прочистки; 6 – забивка из смоляного каната;
7 – цементный раствор

Рисунок 4.5 – Монтаж выпуска и канализационного стояка

Для систем канализации с учетом требований прочности, коррозионной стойкости и экономии расходуемых материалов применяют при самотечном режиме чугунные, асбестоцементные, бетонные, железобетонные, пластмассовые и стеклянные трубы. Но в жилых зданиях чаще всего применяются чугунные и пластмассовые трубы из поливинилхлорида, полиэтилена высокой плотности и полипропилена. Пластмассовые трубы соединяются на сварке с помощью клея на сильных растворителях и с помощью раструбного соединения с резиновым уплотнением в виде кольца. Номенклатура фасонных частей для пластмассовых труб аналогична номенклатуре уже рассмотренных чугунных соединительных частей. Чугунные раструбные трубы монтируются так, чтобы раструбы были обращены в противоположную направлению движения сточных вод сторону. Выпуск пропускается через стену подвала, как показано на рисунке 4.5.

Минимальная глубина заложения выпуска может быть определена на уровне 0,3 м (до низа трубы). Но при этом от верха трубы до поверхности

4. Конструирование внутренней канализации

земли должно соблюдаться расстояние не менее 0,7 м, исходя из необходимости предохранения труб от механических повреждений.

Для прочистки внутренней канализационной сети применяют ревизии и прочистки.

Стояки прочищают с помощью *ревизий*, которые располагаются на стояках на высоте одного метра от пола до центра ревизии и устанавливаются на первом и последнем этажах (также одна ревизия на каждые три этажа).

Трубопроводы внутренней канализации прочищают с помощью прочисток. *Прочистки* устанавливаются: в начале участков (по движению стоков) отводных труб при числе присоединяемых приборов – три и более; на поворотах сети; на прямолинейных участках сети в зависимости от диаметра труб: при диаметре 50 мм – 8 м; при диаметре 100–150 мм – 15 м.

Внутренняя система канализации, как и наружная, работает в самотечном режиме с неполным наполнением труб. Наполнение для диаметра труб, составляющего 50–100 мм, следует принимать: $0,8 > H/D > 0,3$, а для диаметра труб более 100 мм – не более 0,6.

Скорость движения сточных вод по трубам внутренней канализации должна быть принята не менее «самоочищающей» скорости (для труб диаметром 150 мм включительно она равна более 0,7 м/с).

При движении сточных вод в трубах скапливаются газы. Для их удаления предусматривается вентиляция канализационных стояков, которая осуществляется выводом канализационного стояка выше кровли здания: при плоской – 0,3 м; при скатной – 0,5 м; при эксплуатируемой – 3 м.

Диаметр вытяжной части канализационного стояка равен диаметру его сточной части. Допускается объединение поверху вытяжных частей канализационных стояков одной секции здания (но не более шести). Выводимые выше кровли вытяжные части канализационных стояков следует размещать от открываемых окон и балконов на расстоянии не менее 4 м (по горизонтали).

Длина выпуска из здания считается от прочистки или ближайшего стояка до оси смотрового колодца и зависит от диаметра выпуска. При диаметрах трубопровода 50; 100; 150 (и выше) мм она составляет 8; 12; 15 м соответственно. При необходимости проектирования большей длины выпуска устраивается дополнительный смотровой колодец.

4.2 Расчет системы бытовой канализации

Для удаления сточных вод в проектируемом жилом доме устраивается **система бытовой канализации**, при помощи которой сточные воды отводятся в городскую канализационную сеть. Количество выпусков от здания определяется в зависимости от расположения стояков на планах этажей и подвала, а также схемы городской сети.

Принятая схема должна обеспечивать максимальную надежность эксплуатации и минимальную стоимость строительства системы.

Порядок расчета выпусков из здания следующий:

1. Определяют число приемников сточных вод N , присоединяющихся к каждому стояку и по участкам к выпуску.

2. Определяют вероятность действия установленных приемников сточных вод по формуле (3.2).

3. Определяют максимальные расходы на выпуске по формуле (4.1):

$$q^s = q^{tot} + q_o^s \quad (4.1)$$

где q^{tot} – общий расчетный расход горячей и холодной воды на участке водоотведения, л/с (рассчитывается с использованием формулы (3.1));

q_o^s – удельный нормативный расход стоков от приемника с наибольшим водоотведением, л/с (приложение В).

4. Из условия незасоряемости выбирают наполнение и скорость, соблюдая следующие требования:

1) уклон трубопровода следует принимать от 0,02 до 0,15;

4. Конструирование внутренней канализации

2) скорость движения сточных вод равна более 0,7 м/с;

3) наполнение трубопровода: $0,3 < h/d < 0,6$;

4) должна выполняться проверка: $V \cdot H/d > K$ при значении коэффициента K для чугунных труб, составляющем 0,6.

5. Диаметр канализационного выпуска определяют по таблицам (приложение Г) или номограмме.

6. По принятому диаметру, пользуясь таблицей или номограммой, уточняют значения скорости и наполнения.

7. Зная скорость, наполнение и диаметр для чугунных труб с коэффициентом шероховатости, определяют уклон труб.

4.3 Устройство внутренних водостоков

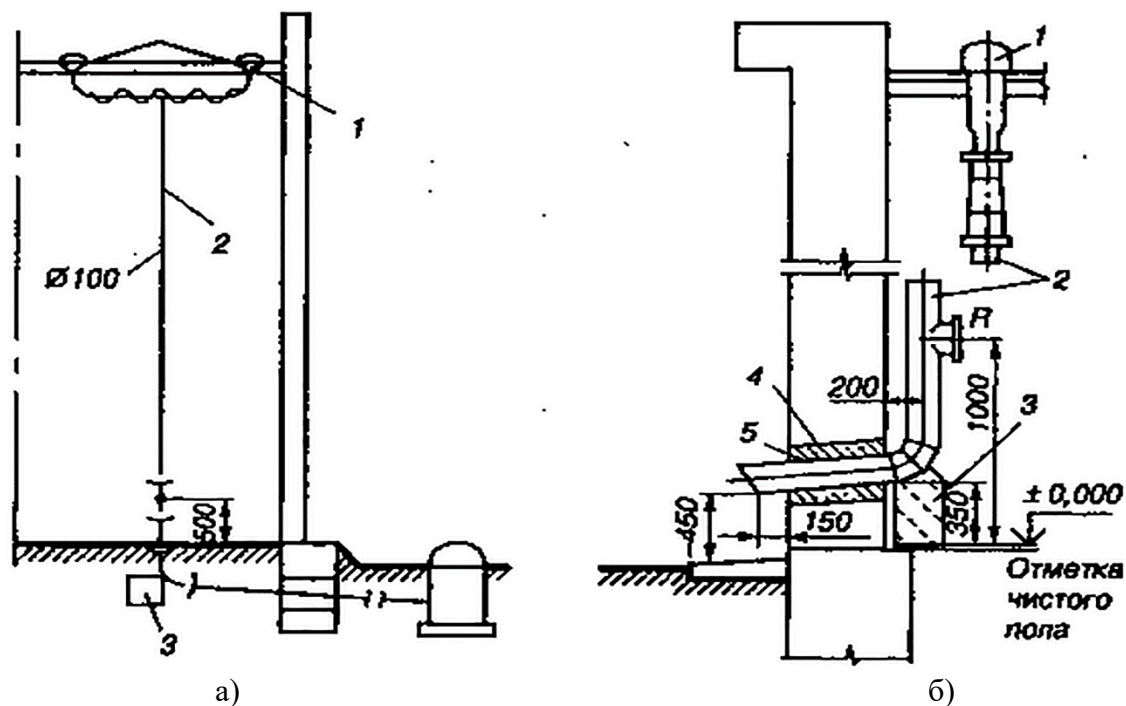
Водостоки предназначены для отвода дождевых и талых вод с крыши зданий. Они делятся на наружные и внутренние.

В современных зданиях устраиваются внутренние водостоки, отводящие воду по трубопроводам, расположенным внутри здания. Они надежны и просты в эксплуатации. Система внутренних водостоков состоит из водосборных воронок, которые соединяются со стояками непосредственно или с помощью отводных (подвесных или подпольных) трубопроводов, выпусков, устройств для прочистки и осмотра сети (прочистки, ревизии, смотровые колодцы). Водосточные воронки размещают на кровле здания. На плоских неэксплуатируемых кровлях жилых зданий устанавливают одну воронку на каждую секцию, размещая их по внутренней продольной оси здания.

Стояки монтируют из стальных, асбестоцементных и пластмассовых труб в отапливаемых помещениях у стен, перегородок или колонн, открыто или в бороздах стен, в коробах и шахтах.

Для прочистки водосточной сети также применяют ревизии и прочистки, конструкции которых аналогичны применяемым во внутренней канализационной сети. На водосточном стояке должна предусматриваться установка ревизии (1 м от пола) и над отступом (если таковой имеется). Для прочистки подпольной сети предусматривают прочистки при изменении направления сети, на прямых участках на расстоянии не более 30 м друг от друга. Ревизии устанавливаются в ревизионных колодцах.

Выпуски отводят воду от стояка или объединяющей водосточной сети на отмотку около здания или в наружные сети дождевой канализации (закрытый выпуск) (рис. 4.6). При проектировании открытого водостока в районах с низкими зимними температурами на выпуске следует предусматривать установку гидрозатвора.



а) в ливневую канализацию;
б) то же, на отмотку (при расчетной температуре воздуха до минус 5 °С);
1 – водоприемная воронка; 2 – водосточный стояк; 3 – бетонный упор; 4 – теплоизоляция;
5 – цементная штукатурка

Рисунок 4.6 – Схема выпусков внутреннего водостока здания

4.4 Конструирование и расчет дворовой канализации

Дворовая канализация проектируется в пределах границы канализования здания (красной линии) и служит для транспортировки сточных вод самотеком от канализационных выпусков здания в контрольный колодец, а затем в колодец внутриквартальной или уличной городской канализационной сети.

Выпуски из здания проектируются в сторону дворового фасада (к подъездам). На прямых и длинных участках смотровые колодцы размещают на расстоянии друг от друга: 35 м при диаметре менее 150 мм и 40–50 м при диаметре более 150 мм.

Колодцы дворовой сети выполняют из сборных железобетонных элементов диаметром одного метра. При этом минимальное расстояние от стены здания до оси смотрового колодца дворовой сети принимается 3 м в сухих грунтах и 5 м – в мокрых.

Дворовая система канализации проектируется, как правило, из керамических, асбестоцементных раструбных труб, а в просадочных и вечномёрзлых грунтах – из чугунных труб. Трубы разных диаметров в колодцах дворовой сети канализации соединяются способом «шельга в шельгу». Напомним, что при таком способе соединения труб в колодцах их верхние образующие имеют одну отметку, а отметки лотков различаются на разность диаметров этих труб. Поскольку в городском колодце уличного коллектора дворовая канализация присоединяется к уличной сети (которая значительно заглублена по сравнению с дворовой) указанным способом, чтобы не заглублять дворовую канализацию в контрольном колодце, расположенном за 1,5–2 м от красной линии со стороны здания, проектируют перепад. Перепады устраивают по бетонному водосливу высотой до 0,3 м в виде открытого лотка (открытый перепад), при большей высоте – в виде закрытого стояка с отводами того же диаметра, что и

у подводящего трубопровода. Трубы между колодцами должны иметь один общий уклон (без перегибов) и быть одного диаметра.

Уклон дворовой сети при диаметре труб 150 мм рекомендуется принимать в пределах 0,008–0,0015 в сторону уличного коллектора. Он должен обеспечивать движение расчетного расхода сточных вод со скоростью не менее самоочищающей (более 0,7 м/с) при соответствующем расчетном наполнении ($0,3 < H/D < 0,6$) для принятого диаметра труб.

Расчет дворовой сети состоит в определении способности трубопроводов на пропуск расчетных расходов сточных вод, диаметров, уклонов, скоростей движения сточных вод и наполнения в трубах. В результате расчета определяют отметки лотков труб в колодце и глубину колодцев.

Перед расчетом сети намечают расчетные участки: от диктующего колодца с минимальным заглублением к колодцу на коллекторе наружной сети.

Начальная глубина заложения колодца определяется по формуле (4.2):

$$h_k = h_{\text{пр}} - 0,3 + d_{\text{тр}} \quad (4.2)$$

где $h_{\text{пр}}$ – глубина промерзания земли, м;

$d_{\text{тр}}$ – диаметр труб, мм.

Отметка лотка дворовой канализации в месте подключения ее к уличной сети (точка КГК) выше отметки трубы (верха) городской канализации на величину $0,5d_{\text{тр}}$.

Скорость движения сточных вод принимается не менее самоочищающей (выше 0,7 м/с), то есть такая, при которой взвешенные частицы песка и ила будут протягиваться по трубам без остановки. Наполнение труб принимают от 0,3 до 0,9 с учетом перспективных подключений.

На каждом участке (между колодцами) определяют соблюдение условия незасоряемости.

Расчетные расходы сточных вод вычисляют по соответствующим формулам, а диаметры труб на расчетных участках, гидравлический уклон, скорости

4. Конструирование внутренней канализации

и наполнения в трубопроводах определяют по номограмме или таблице. Результаты расчета сводят в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Гидравлический расчет дворовой канализации

Показатели		Значения
Номер участка		
Длина участка (l), м		
Расчетный расход (q_p^s), л/с		
Диаметр (d), мм		
Скорость (v), м/с		
Наполнение (h/d)		
Уклон		
Падение отметок		
Отметки, м:		
земли	начальная	
	конечная	
верха	начальная	
	конечная	
лотка	начальная	
	конечная	
Заглубление (h_k), м		

5 ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Приведем основные физические свойства жидкостей:

1. Плотность. Плотностью ρ (кг/м³) называется масса единицы объема жидкости. Она определяется по формуле (5.1):

$$\rho = \frac{m}{W} \quad (5.1)$$

где m – масса жидкого тела, кг;
 W – объем, м³.

Плотность жидкостей уменьшается с увеличением температуры. Исключение представляет вода в диапазоне температур от нуля до 4 °С, когда ее плотность увеличивается, достигая наибольшего значения при температуре 4 °С и составляя при этом 1 000 кг/м³.

2. Удельный вес. Удельным весом жидкости называется вес единицы объема этой жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{W} \quad (5.2)$$

где G – вес жидкого тела, Н.

Для воды при температуре 4 °С удельный вес составляет 9 810 Н/м³.

Между плотностью и удельным весом существует связь:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (5.3)$$

где g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Сопротивление жидкостей изменению своего объема под действием давления и температуры характеризуется коэффициентами объемного сжатия и температурного расширения.

3. Коэффициент объемного сжатия – это относительное изменение объема жидкости при изменении давления на единицу:

5. Физические свойства жидкостей

$$\beta_w = \frac{\Delta W}{W \cdot \Delta P} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot \Delta P} \quad (5.4)$$

где ΔW – изменение объема;
 ΔP – изменение давления.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется модулем упругости жидкостей ($E_{\text{ж}}$) и находится по формуле (5.5):

$$E_{\text{ж}} = \frac{1}{\beta_w} \quad (5.5)$$

4. Коэффициент температурного расширения *выражает относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус:*

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \cdot \Delta t} \quad (5.6)$$

5. Вязкость. *Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. Вязкость проявляется только при движении жидкости и сказывается на распределении скоростей по живому сечению потока.*

Согласно гипотезе Ньютона, сила внутреннего трения F в жидкостях пропорциональна градиенту изменения скорости $\frac{du}{dy}$, площади соприкосновения слоев S , а также зависит от рода жидкости и очень незначительно зависит от давления. Она выражается формулой (5.7):

$$F = \mu \cdot S \frac{du}{dy} \quad (5.7)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости;
 S – площадь соприкасающихся слоев, м^2 ;
 du – скорость смещения слоя b относительно слоя a , м/с ;
 dy – расстояние, на котором скорость движения слоев изменилась на du , м ;
 $\frac{du}{dy}$ – градиент скорости, изменение скорости по нормали к направлению движения, с^{-1} .

В практике для характеристики вязкости жидкости чаще применяют не коэффициент динамической вязкости, а коэффициент кинематической вязкости. **Коэффициентом кинематической вязкости** называется отношение коэффициента динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.8)$$

Вязкость жидкости зависит от рода жидкости, температуры и давления.

Вязкость жидкости определяют при помощи вискозиметра Энглера и выражают в градусах Энглера ($^{\circ}E$). *Градус Энглера – это отношение времени истечения испытуемой жидкости ко времени истечения дистиллированной воды.* Для перехода от вязкости в градусах Энглера к коэффициенту кинематической вязкости применяется формула Убеллоде (5.9):

$$\nu = \left(0,0731 \cdot {}^{\circ}E - \frac{0,0631}{{}^{\circ}E} \right) 10^{-4} \quad (5.9)$$

Вязкость также определяют капиллярным вискозиметром Оствальда. Коэффициент кинематической вязкости при этом находят по формуле (5.10):

$$\nu = c \cdot T_{\text{ж}} \cdot 10^{-4} \quad (5.10)$$

где c – постоянная прибора;

$T_{\text{ж}}$ – время истечения жидкости, с.

Примеры решения задач

1. В отопительный котел поступает вода с расходом $Q = 5,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре $t_1 = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько воды будет выходить из котла, если нагрев производится до температуры $t_2 = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$?

5. Физические свойства жидкостей

Решение. Для решения этой задачи воспользуемся формулой определения коэффициента температурного расширения (5.6), который выражает относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус. Поскольку объем и расход – величины соотносительные, тогда:

$$\beta_t = \frac{\Delta Q}{Q \cdot \Delta t}; \beta_t = \frac{Q_2 - Q_1}{Q \cdot (t_2 - t_1)}$$

Следовательно, получим:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \beta_t \cdot (t_2 - t_1) \cdot Q_1 + Q_1 = \\ &= 719 \cdot 10^{-6} \cdot (90 - 70) \cdot 5,56 \cdot 10^{-6} + 5,56 \cdot 10^{-6} = 5,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} \end{aligned}$$

2. Трубопровод длиной $L = 90$ м и внутренним диаметром $d = 0,8$ м перед гидравлическим испытанием заполнен водой, находящейся под атмосферным давлением. Определите, сколько нужно добавить в трубопровод воды, чтобы давление в нем повысить до $P_2 = 2$ МПа. Температура воды $t = 20$ °С.

Решение. Для решения этой задачи воспользуемся формулой определения коэффициента объемного сжатия (5.4), который выражает относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления.

Определим первоначальный объем трубопровода:

$$W_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \cdot 90 = 45,216 \text{ м}^3$$

Коэффициент объемного сжатия воды, соответствующий значениям: $t = 20$ °С, $P_2 = 2$ МПа, составит $\beta_p = 4,95 \text{ Па}^{-1}$.

Тогда:

$$\begin{aligned} W_2 &= \beta_p \cdot (p_2 - p_1) \cdot W_1 + W_1 = \\ &= 4,95 \cdot 10^{-10} \cdot (2000 - 98,1) \cdot 45,216 + 45,216 = 45,216043 \\ \Delta W &= W_2 - W_1 = 45,216043 - 45,216 = 0,000043 \text{ м}^3 = 43 \text{ см}^3 \end{aligned}$$

3. В вертикальном цилиндрическом резервуаре диаметром $d = 4,0$ м хранится 100 тонн нефти плотностью $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ при температуре $t = 0$ °С. Определите колебания уровня в резервуаре при колебании температуры

нефти от 0 до 30 °С. Расширение резервуара не учитывать. Коэффициент температурного расширения нефти примите равным $\beta_t = 0,00072 \text{ K}^{-1}$.

Решение. Определим вес нефти $G_H = \gamma_H \cdot W$, или $G_H = g \cdot m$. При этом по условию задания масса нефти (m) составляет 100 тонн.

Тогда:

$$W_1 = \frac{G_H}{\gamma_H} = \frac{100000 \cdot 9,81}{9,81 \cdot 850} = 117,65 \text{ м}^3$$

при $d = 4,0$ м и $W_1 = 117,65 \text{ м}^3$:

$$h_{H1} = \frac{W_1 \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = \frac{117,65 \cdot 4}{3,14 \cdot 4^2} = 9,37 \text{ м}$$

Для решения задачи воспользуемся формулой определения коэффициента температурного расширения (5.6), который выражает относительное изменение объема жидкости на единицу изменения температуры. Тогда:

$$W_2 = \beta_t \cdot (t_2 - t_1) \cdot W_1 + W_1 =$$
$$0,00073 \cdot (30 - 0) \cdot 117,65 + 117,65 = 120,23 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$h_{H2} = \frac{W_2 \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = \frac{120,23 \cdot 4}{3,14 \cdot 4^2} = 9,57 \text{ м}$$

Следовательно, получим:

$$\Delta h = h_{H2} - h_{H1} = 9,57 - 9,37 = 0,2 \text{ м} = 20 \text{ см}$$

В результате, при повышении температуры до 30 °С уровень нефти поднимется на 20 см.

6 ГИДРОСТАТИКА

6.1 Основное уравнение гидростатики

Абсолютное гидростатическое давление – модуль вектора сжимающего напряжения в жидкости, а модули нормальных напряжений на всех площадках, проходящих через точку A , равны между собой и называются абсолютным гидростатическим давлением:

$$p = |\vec{p}| = \lim_{ds \rightarrow 0} \frac{|d\vec{F}|}{ds} \quad (6.1)$$

Давление – скалярная величина, имеющая размерность напряжения:

$$[p] = \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}$$

Абсолютное давление в жидкости можно вычислить по формуле (6.2), которая называется **основным уравнением гидростатики**, а также можно измерить с помощью приборов – мановакуумметров:

$$p = p_0 = \rho \cdot g \cdot h, \quad (6.2)$$

$$p_{\text{вес}} = \rho \cdot g \cdot h \quad (6.3)$$

где $p_{\text{вес}}$ – давление за счет веса жидкости (весовое давление или давление столба жидкости).

При этом давление газа p_0 передается через жидкость на глубину h по закону Паскаля.

Основное уравнение гидростатики (6.2) связывает давления на двух горизонтальных плоскостях в жидкости.

Закон Паскаля: давление p_0 , созданное на жидкость любым путем, передается во все точки объема жидкости без изменения.

Манометр измеряет избыток абсолютного давления над атмосферным ($p_{ат}$), что отражено формулой (6.4). Вакуумметр измеряет недостаток абсолютного давления до атмосферного, что показано формулой (6.5):

$$p_m = p - p_{ат}, \quad (6.4)$$

$$p_y = p_{ат} - p \quad (6.5)$$

Используя показания приборов, можно определить абсолютное давление по формулам пересчета (6.6) и (6.7):

$$p = p_{ат} + p_m, \quad (6.6)$$

$$p = p_{ат} - p_y \quad (6.7)$$

Атмосферное давление определяется по барометру. Если оно не задано, то принимается равным: $p_{ат} = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}$.

6.2 Свойства гидростатического давления

Свойствами гидростатического давления выступают:

1. Во всех точках горизонтальной площади, проведенной через однородную жидкость, давление одинаково.

2. В данной точке внутри жидкости давление по всем направлениям одинаково. Это означает, что давление в жидкости на определенном уровне можно определять и сверху, и снизу, и слева, и справа.

3. На внешней поверхности жидкости давление направлено перпендикулярно к поверхности. В противном случае на жидкость действовали бы касательные силы, и она бы двигалась.

4. При перемещении в жидкости сверху вниз давление увеличивается:

$$p_3 > p_2 > p_1 > p_0$$

Молекулы жидкости, стремясь освободиться от сжимающих напряжений, в свою очередь, оказывают силовое воздействие на окружающие поверхности

(третий закон Ньютона: действие равно противодействию). В результате и возникают силы давления на крышки.

6.3 Сила давления на плоские поверхности

Сила давления – мера взаимодействия между жидкостью и стенкой. Она появляется потому, что жидкость на практике всегда находится в деформированном (сжатом) состоянии. На нее действуют собственный вес, реакции стенок и другие сжимающие силы.

В результате деформации в жидкости появляется сжимающее напряжение, которое мы называем абсолютным давлением.

Необходимо определить силу давления жидкости на поверхность, имеющую ось симметрии и наклоненную под углом к горизонту. Форма поверхности значения не имеет. Она может быть круглой, треугольной, прямоугольной, трапецеидальной.

Абсолютное давление на поверхности контакта между жидкостью и стенкой определяет степень сжатия жидкости в окрестности точки. По третьему закону Ньютона, сжатая жидкость оказывает на поверхность такое же давление, но с противоположным знаком (аналогия со сжатой пружиной). Сумма воздействий жидкости на поверхность во всех ее точках определяет суммарное давление на поверхность (или силу давления).

Рассмотрим простейший случай, когда резервуар – открытый, и на свободную поверхность жидкости действует атмосферное давление. Атмосферное давление передается по закону Паскаля через жидкость и действует на стенку изнутри. Так как снаружи также действует атмосферное давление, то в результате оно уравновешивается и не влияет на стенку.

Таким образом, в открытом резервуаре соприкасающиеся с жидкостью поверхности находятся под воздействием только весового давления (давления столба жидкости).

Сила давления столба жидкости – это вектор. Сила давления характеризуется величиной (модулем), направлением и точкой приложения. **Направление силы всегда перпендикулярно площади стенки. Величина силы равна произведению площади стенки на давление в центре тяжести этой площади.**

Для доказательства разобьем смоченную жидкостью площадь s на площадки (рис. 6.1) величиной ds , которые ввиду малости можно считать горизонтальными. Во всех точках такой площадки давление столба жидкости можно считать одинаковым и равным $\rho \cdot g \cdot h$.

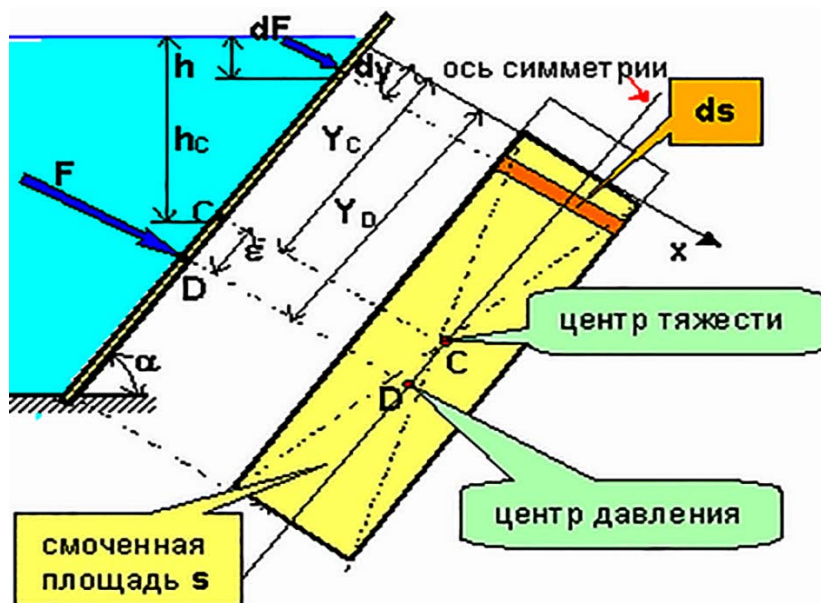


Рисунок 6.1 – Эпюра гидростатического давления на плоскую стенку

На площадку ds действует со стороны жидкости сила $dF = p \cdot s = \rho \cdot g \cdot h \cdot ds$. На всю площадь s будет действовать множество параллельных сил dF (увеличивающихся с глубиной из-за роста h).

Результирующая сила F представляет собой алгебраическую сумму составляющих сил dF :

$$F = \rho \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot y_c \cdot s = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot s$$

При этом y – расстояние от любой площадки до поверхности жидкости, отсчитываемое в плоскости стенки. Произведение yds – статический момент площади ds относительно оси x (ось x – линия пересечения поверхности жидкости с плоскостью стенки (линия уреза жидкости)). Сумма таких произведений (интеграл) для всех площадок равна статическому моменту всей площади относительно оси x .

Замечая, что $\rho \cdot g \cdot h_c$ – давление в центре тяжести стенки (в точке C), окончательно получим:

$$F = p_c \cdot s \quad (6.8)$$

Сила F пересекает площадь стенки в точке D , которая называется центром давления. Положение точки на плоскости определяется двумя координатами. Точка приложения равнодействующей силы должна быть расположена ниже центра тяжести площади стенки, поскольку с глубиной силы давления dF увеличиваются, а точка приложения равнодействующей параллельных сил всегда сдвигается к большей силе.

Теорема Вариньона. *Момент равнодействующей силы относительно произвольной точки (оси) равен сумме моментов составляющих сил относительно этой точки (оси).*

Подставляя выражение для силы F и представляя момент инерции относительно оси x как сумму момента инерции относительно центральной оси и произведения площади на квадрат расстояния между осями, получим:

$$y_D = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot I_x}{F} = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot (I_c + s \cdot l_c^2)}{\rho \cdot g \cdot h_c \cdot s} = l_c + \frac{I_c}{s \cdot y_c} \quad (6.9)$$

Расстояние от центра тяжести до точки приложения силы ($e = y_D - y_c$) определяется по формуле (6.10):

$$e = \frac{I_c}{s \cdot y_c} \quad (6.10)$$

где I_c – момент инерции площади стенки относительно горизонтальной центральной оси.

I_c – справочная величина. Например, для круга: $I_c = \pi d^4/64$.

Величина y_c равна расстоянию от центра тяжести до свободной поверхности жидкости (по оси симметрии стенки).

При определении величины силы в формулу (6.10) подставляется давление в центре тяжести (в точке C), а сама сила приложена в центре давления (в точке D).

6.4 Сила давления на криволинейную поверхность, погруженную в жидкость

Выберем внутри покоящейся жидкости криволинейную поверхность $ABCD$, которая может быть частью поверхности некоторого тела, погруженного в жидкость. Построим проекции этой поверхности на координатные плоскости.

Тогда в координатной плоскости XOZ проекцией этой поверхности будет плоская поверхность $A'B'C'D'$, в координатной плоскости YOZ – плоская поверхность $A''B''C''D''$ и в плоскости свободной поверхности жидкости (координатная плоскость XOT) – плоская поверхность $A'''B'''C'''D'''$.

На криволинейной поверхности выделим малую площадку dS , проекции которой на координатные плоскости будут соответственно dS' , dS'' и dS''' .

Сила давления на криволинейную поверхность dP будет направлена по внутренней нормали к этой поверхности и может быть представлена следующим образом. Горизонтальные составляющие могут быть определены, как силы давления на проекции малой площадки dS на соответствующие координатные плоскости:

$$dP_x = (p_0 + \rho gh)dS \cos(\overline{dP}, \overline{OX}),$$

то есть $dP_x = (p_0 + \rho gh)dS'$
и $dP_x = (p_0 + \rho gh)dS''$

Интегрируя эти уравнения, получим (как в случае с давлением на наклонную поверхность):

$$P_x = (p_0 + \rho gh_0)S',$$

$$P_y = (p_0 + \rho gh_0)S''$$

Вертикальная составляющая силы давления составит:

$$P_z = \int_s p_0 dS''' + \rho g \int_{s+1} hd S'''$$

Второй интеграл в этом равенстве представляет собой объем, образованный рассматриваемой криволинейной поверхностью $ABCD$ и ее проекцией на свободную поверхность жидкости $A'''B'''C'''D'''$ (S и S'''). Данный объем принято называть телом давления $W_{\text{тд}}$:

$$P_p = p_0 dS''' + \rho g W_{\text{тд}}$$

Следовательно, горизонтальные составляющие силы давления на криволинейную поверхность равны давлениям на вертикальные проекции этой поверхности, а вертикальная составляющая равна весу тела давления и силе внешнего давления на горизонтальную проекцию криволинейной поверхности.

Основные уравнения гидростатики широко используются на практике. Примерами могут служить простейшие гидравлические машины – гидравлический пресс, построенный по принципу сообщающихся сосудов, и гидравлический аккумулятор.

Гидравлический пресс состоит из двух цилиндров – приводного и рабочего, соединенных между собой трубопроводом, и представляет систему сообщающихся сосудов. В приводном цилиндре перемещается плунжер малого диаметра d , в рабочем цилиндре находится поршень с большим диаметром D . Связь между плунжером и рабочим поршнем осуществляется через рабочую

жидкость, заполняющую гидравлическую систему (сообщающиеся сосуды).
Усилие F через рычаг передается рабочей жидкости.

Сила давления на жидкость под плунжером P_1 передает жидкости давление p , которое, в свою очередь, передается во все точки рабочего поршня:

$$P_1 = F \frac{l_2}{l_1}; p = \frac{P_1}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

Тогда сила давления на поверхность рабочего поршня будет равна:

$$P_2 = p \frac{\pi D^2}{4}$$

Таким образом, с помощью гидравлического пресса, приложенная к концу рычага сила увеличивается в $\frac{l_2}{l_1} \left(\frac{D}{d}\right)^2$ раз.

Примеры решения задач

1. Определите величину давления P в котле и пьезометрическую высоту h_2 , если высота поднятия ртути в ртутном манометре $h_1 = 0,12$ м (рис. 6.2). Плотность ртути составляет $13\,550$ кг/м³.

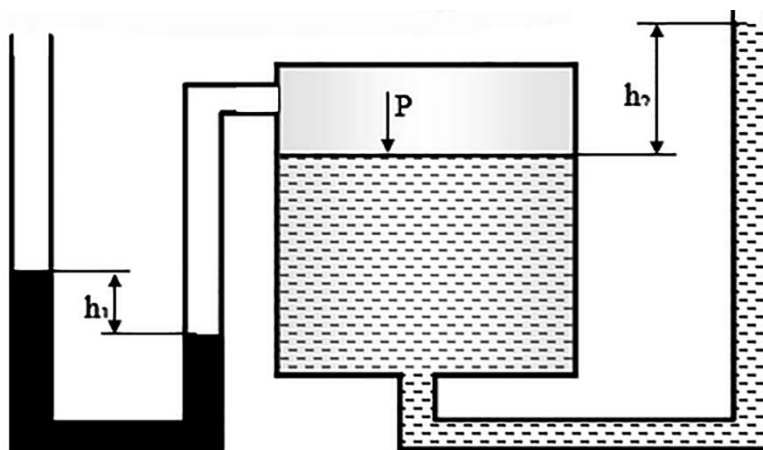


Рисунок 6.2 – Данные для решения задачи 1

Решение. Для решения задачи воспользуемся основным уравнением гидростатики:

$$P_{\text{полн}} = P_0 + \gamma \cdot h$$

При этом P_0 – давление на свободной поверхности жидкости; γ – плотность жидкости; h – высота столба.

Находим плотность жидкости:

$$\gamma_{\text{в}} = \rho \cdot g = 1000 \cdot 9,81 = 9,81 \text{ кН/м}^3;$$

$$\gamma_{\text{рт}} = \rho \cdot g = 13550 \cdot 9,81 = 132,925 \text{ кН/м}^3$$

Затем составим уравнение равновесия, двигаясь слева направо по трубкам прибора:

$$P_{\text{а}} + \gamma_{\text{рт}} \cdot h_1 = P$$

$$98,1 + 132,926 \cdot 0,12 = 114,05 \text{ кПа}$$

При этом $P_{\text{а}} = 98,1$ кПа – атмосферное давление.

Для определения высоты воды в пьезометре составим основное уравнение гидростатики для пьезометра:

$$P_{\text{а}} + \gamma_{\text{в}} \cdot h_2 = P$$

$$98,1 + 9,81 \cdot h_2 = 114,05 \text{ кПа}$$

$$\text{следовательно, } h_2 = \frac{P - P_{\text{а}}}{\gamma_{\text{в}}} = \frac{114,05 - 98,1}{9,81} = 1,63 \text{ м}$$

2. Резервуары А и Б частично заполнены водой и газом. Определите избыточное давление газа на поверхности воды закрытого резервуара Б, если избыточное давление на поверхности воды в закрытом резервуаре А соответствует 99 кПа. При этом разность уровней ртути в двухколенном дифференциальном манометре $h = 0,35$ м; мениск ртути в левой трубке манометра ниже уровня воды на величину $h_3 = 0,25h_1$; высота подъема ртути в правой трубке манометра $h_2 = 0,3$ м. Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено этиловым спиртом (рис. 6.3).

Решение. Составим уравнение равновесия, двигаясь слева направо по трубкам прибора (рис. 6.3). В результате, получим:

$$\gamma_{\text{в}} = 9,91 \text{ кН/м}^3 \text{ – удельный вес воды;}$$

$\gamma_{рт} = 133,4 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес ртути;

$\gamma_{спирт} = 7,75 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес спирта.

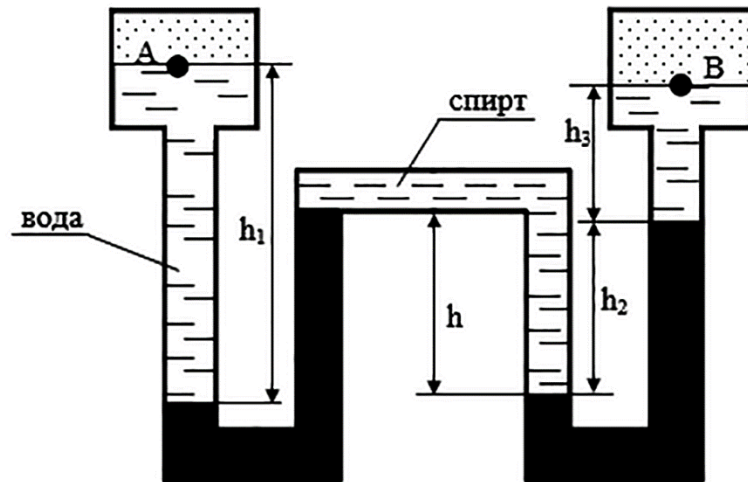


Рисунок 6.3 – Данные для решения задачи 2

3. Резервуары А и В частично заполнены водой разной плотности (соответственно равной $\rho_a = 998 \text{ кг/м}^3$, $\rho_b = 1029 \text{ кг/м}^3$) и газом, причем к резервуару А подключен баллон с газом (рис. 6.4). Высота столба ртути в трубке дифманометра $h = 0,17 \text{ м}$, а расстояние от оси резервуаров до мениска ртути находится на уровне $h_1 = 0,4 \text{ м}$, $h_2 = 0,13 \text{ м}$. Какое нужно создать давление в баллоне, чтобы получить давление $P_b = 112 \text{ кПа}$ на свободной поверхности в резервуаре В?

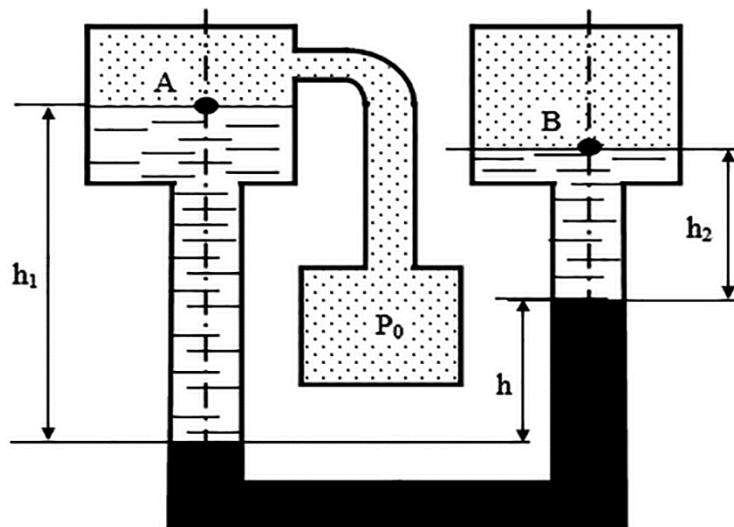


Рисунок 6.4 – Данные для решения задачи 3

Решение. Составим уравнение равновесия, двигаясь справа налево по трубкам прибора:

$$P_B + \gamma_B \cdot h_2 + \gamma_{рт} \cdot h - \gamma_B \cdot h_1 = P_a$$

При этом $\gamma_B = g \cdot \rho_B = 9,81 \cdot 998 = 9790,38 \text{ Н/м}^3$ – удельный вес воды;

$\gamma_{рт} = g \cdot \rho_{рт} = 9,81 \cdot 1029 = 10094,5 \text{ Н/м}^3$ – удельный вес ртути.

Определим абсолютное гидростатическое давление на свободной поверхности в резервуаре (P_a):

$$P_B + \gamma_B \cdot h_2 + \gamma_{рт} \cdot h - \gamma_B \cdot h_1 = 112 + 9,79 \cdot 0,13 + 10,09 \cdot 0,17 - 9,79 \cdot 0,4 = 111,07 \text{ кПа}$$

Плотность газа во много раз меньше плотности жидкости, поэтому в данной задаче ей можно пренебречь. Давление в баллоне P_0 будет равно давлению на поверхности жидкости P_a .

4. К двум резервуарам *a* и *b*, заполненным нефтью, присоединен дифференциальный ртутный манометр (рис. 6.5). Определите разность давлений в точках *a* и *b*, составив уравнение равновесия относительно плоскости равного давления. Разность показаний манометра $h = 0,28 \text{ м}$.

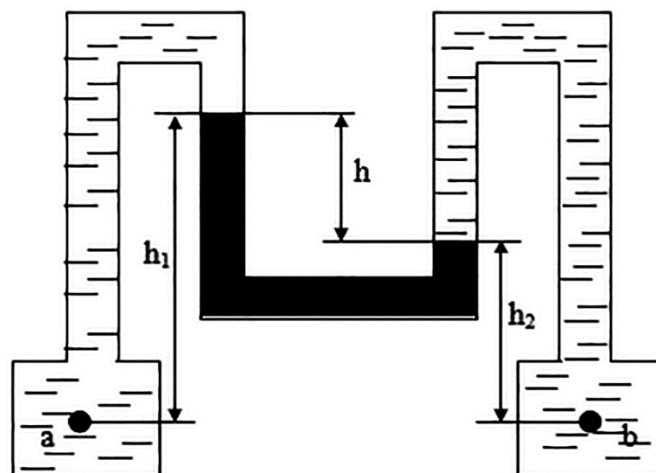


Рисунок 6.5 – Данные для решения задачи 4

Решение. Для решения этой задачи воспользуемся основным уравнением гидростатики:

$$P_{полн} = P_0 + \gamma \cdot h$$

Плотность жидкости составит:

$$\gamma_{\text{н}} = 8,83 \text{ кН/м}^3; \gamma_{\text{рт}} = 134,4 \text{ кН/м}^3$$

Далее получим уравнение равновесия, двигаясь слева направо по трубкам прибора:

$$P_a - \gamma_{\text{н}} \cdot h_1 + \gamma_{\text{рт}} \cdot h - \gamma_{\text{н}} \cdot h + \gamma_{\text{н}} \cdot (h + h_2) = P_b$$

После преобразования выражения получим:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_a - P_b = (\gamma_{\text{рт}} - \gamma_{\text{н}}) \cdot h = \\ (133,4 - 8,83) \cdot 0,28 &= 34,88 \text{ кПа} \end{aligned}$$

5. Определите приведенную пьезометрическую высоту h_x поднятия пресной воды в закрытом пьезометре (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке А), если показания открытого пьезометра составляют $h = 0,7 \text{ м}$ при атмосферном давлении. Расстояние от свободной поверхности жидкости в резервуаре до точек А и Б достигает соответственно $h_1 = 0,5 \text{ м}$, $h_2 = 0,2 \text{ м}$ (рис. 6.6).

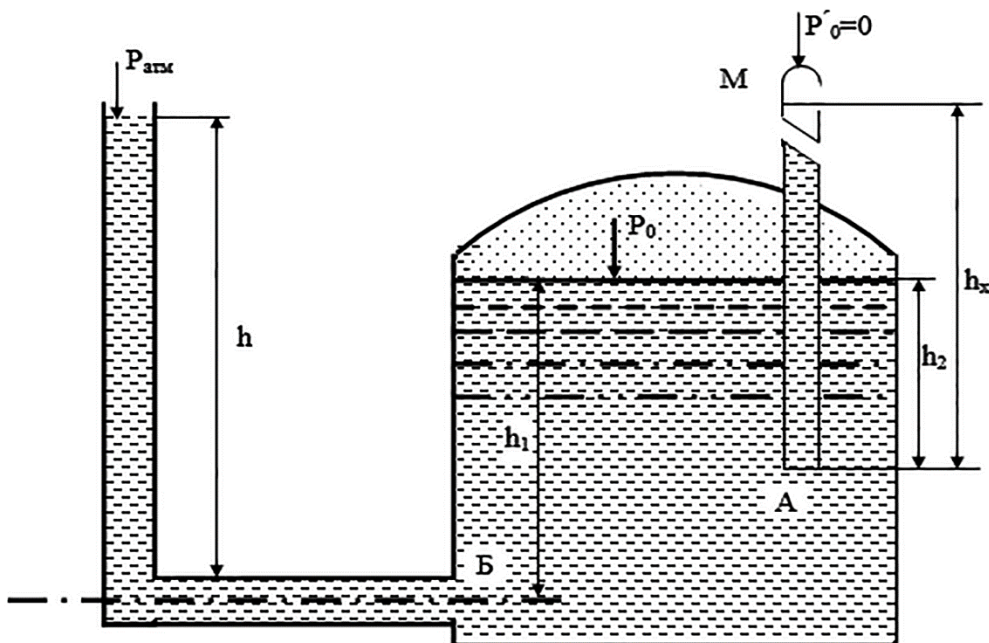


Рисунок 6.6 – Данные для решения задачи 5

Решение. Составим уравнение равновесия для точки Б:

$$P_{\text{атм}} + h \cdot \gamma_{\text{в}} = P_0 + \gamma_{\text{в}} \cdot h_1$$

6. Гидростатика

Определим абсолютное гидростатическое давление на свободной поверхности в резервуаре:

$$P_0 = P_{\text{атм}} + \gamma_{\text{в}} \cdot (h - h_1) = 98,1 + 9,81 \cdot (0,7 - 0,5) = 100,06 \text{ кПа}$$

Вычислим абсолютное гидростатическое давление в точке А:

$$P_{\text{абс}}(A) = P_0 + \gamma_{\text{в}} \cdot (h_1 - h_2) = 100,06 + (0,5 - 0,2) \cdot 9,81 = 103,0 \text{ кПа}$$

Найдем приведенную пьезометрическую высоту:

$$h_x = \frac{P_{\text{абс}}(A)}{\gamma_{\text{в}}} = \frac{103,0}{9,81} = 10,5 \text{ м}$$

6. *Закрытый резервуар снабжен дифференциальным манометром, установленным в точке В, и закрытым пьезометром. Определите приведенную пьезометрическую высоту h_x поднятия пресной воды в закрытом пьезометре (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке А), если при атмосферном давлении высота столба ртути в трубке дифференциального манометра $h = 0,3 \text{ м}$, а точка А расположена на глубине $h_1 = 0,7 \text{ м}$ от свободной поверхности (рис. 6.7).*

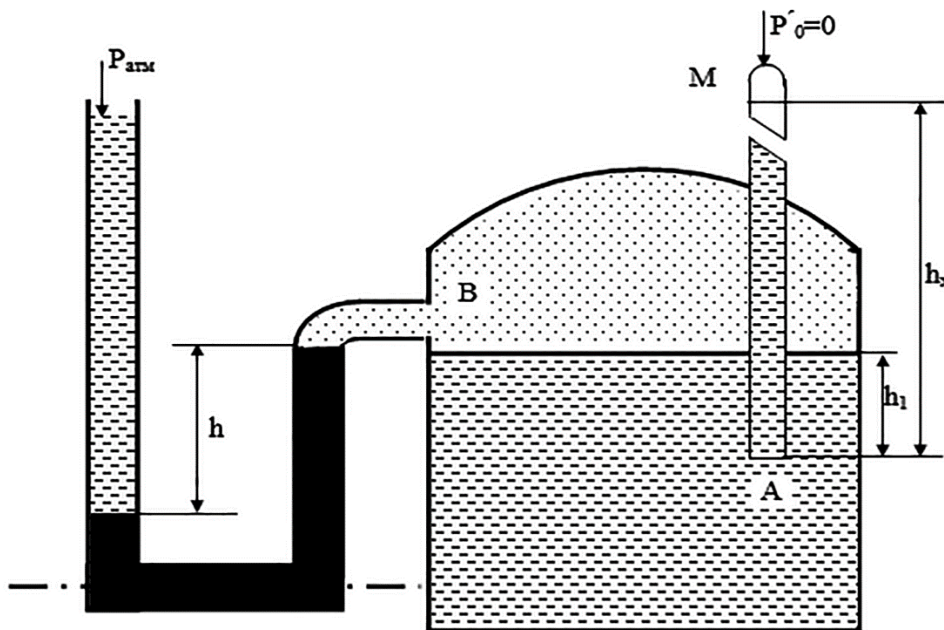


Рисунок 6.7 – Данные для решения задачи 6

Решение. Рассчитаем абсолютное гидростатическое давление в точке В:

$$P_{\text{абс}}(B) = P_{\text{ат}} - \gamma_{\text{рт}} \cdot h_1 = 98,1 - 133,4 \cdot 0,3 = 58,08 \text{ кПа}$$

Определим абсолютное гидростатическое давление в точке А:

$$P_{абс}(A) = P_0 + \gamma_B \cdot h_1 = 58,08 + 9,81 \cdot 0,7 = 64,95 \text{ кПа}$$

Найдем приведенную пьезометрическую высоту:

$$h_x = \frac{P_{абс}A}{\gamma_B} = \frac{64,95}{9,81} = 6,62 \text{ м}$$

7. Определите абсолютное гидростатическое давление в точке А закрытого резервуара с дистиллированной водой, если при атмосферном давлении высота столба ртути в трубке дифманометра $h = 0,6 \text{ м}$, а линия раздела между ртутью и водой расположена ниже точки В на величину $h_1 = 0,4 \text{ м}$; точка В выше точки А на величину $h_2 = 0,3 \text{ м}$ (рис. 6.8).

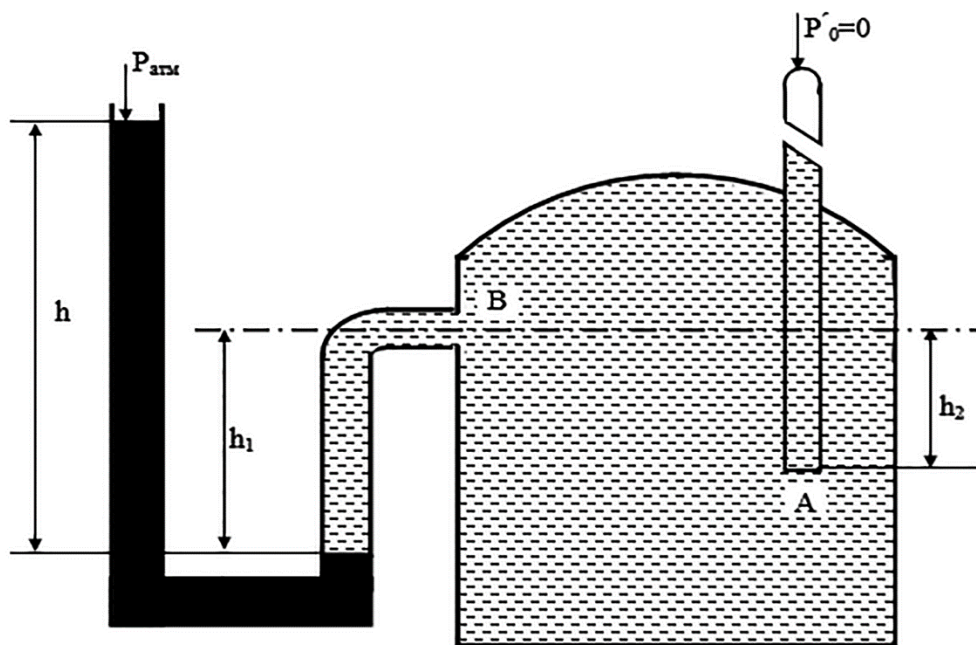


Рисунок 6.8 – Данные для решения задачи 7

Решение. Рассчитаем абсолютное гидростатическое давление в точке В:

$$P_{абс}(B) = P_{ат} + \gamma_{рт} \cdot h - \gamma_B \cdot h_1 = 98,1 - 133,4 \cdot 0,6 - 9,81 \cdot 0,4 = 174,216 \text{ кПа}$$

Определим абсолютное гидростатическое давление в точке А:

$$P_{абс}(A) = P_{абс}(B) + \gamma_B \cdot h_2 = 174,216 + 9,81 \cdot 0,3 = 177,16 \text{ кПа}$$

8. Система, состоящая из двух вертикальных цилиндров, соединенных между собой, заполнена жидкостью. В цилиндры заключены поршни диаметрами $d = 300$ мм и $D = 600$ мм. В пространстве над правым поршнем воздух при атмосферном давлении $p = 98,1$ кПа (рис. 6.9). Как изменится давление воздуха над правым поршнем, если к левому поршню приложить вертикально вниз силу, составляющую $P = 1,5$ кН? Трением пренебречь.

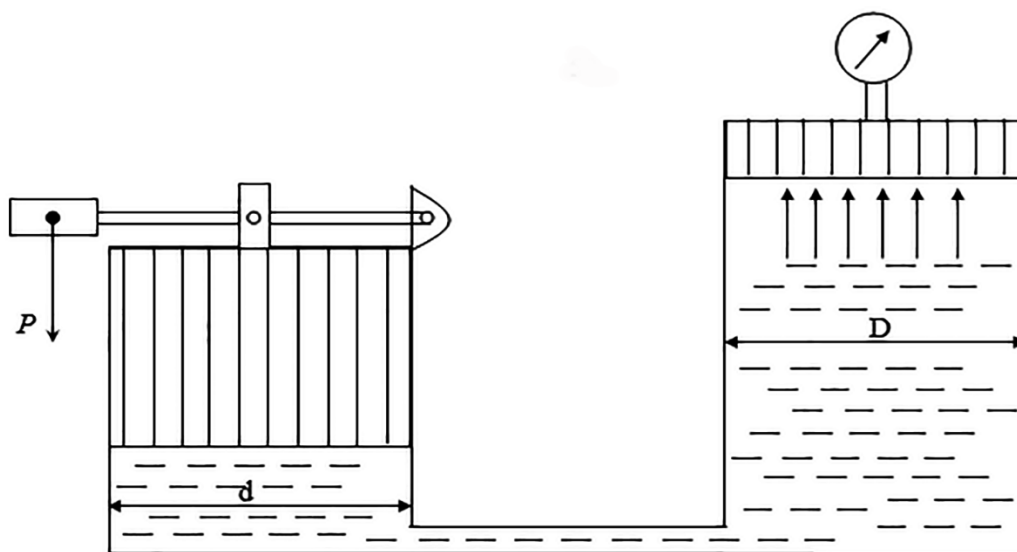


Рисунок 6.9 – Данные для решения задачи 8

Решение. Определим силу давления на днище бокового поршня, создающую избыточное добавочное гидростатическое давление:

$$p_1 = \frac{p}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{4 \cdot p}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 1,5}{3,14 \cdot 0,6^2} = 5,31 \text{ кН/м}^3$$

Это гидростатическое давление передается на малый поршень цилиндра, в результате чего полная сила давления на этот поршень будет равна:

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{5,31 \cdot 3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,375 \text{ кН/м}^3$$

Рассчитаем изменение давления воздуха над малым поршнем:

$$\Delta p = p_{\text{ат}} + P_2 = 98,1 + 0,375 = 98,48 \text{ кН/м}^3$$

9. Гидравлический пресс с диаметрами поршней $D = 340$ мм и $d = 15$ мм используется для получения виноградного сока (рис. 6.10). К малому поршню приложена сила $P = 0,245$ кН. Определите сжимающее усилие P_1 большого поршня, если КПД гидравлического пресса составляет $\eta = 0,8$.

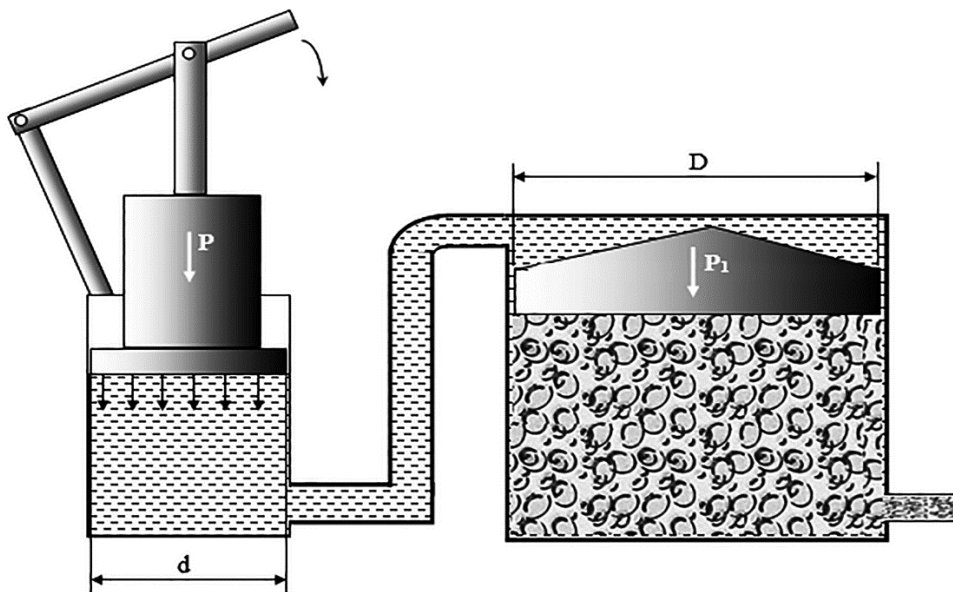


Рисунок 6.10 – Данные для решения задачи 9

Решение. Определим усилие P_1 гидравлического пресса, используемого для получения виноградного сока:

$$P_1 = P \cdot \eta \cdot \frac{\omega_1}{\omega} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \cdot P \cdot \eta = \frac{0,015^2}{0,34^2} \cdot 15 \cdot 0,8 = 0,0232 \text{ кН}$$

Гидростатическое давление, будучи направлено нормально к поверхности основания поршня, создает силу, которая будет сжимать тело, помещенное между поршнем и неподвижным горизонтальным упором. Таким образом, сила давления создает сжимающую силу.

10. Цилиндрический резервуар диаметром $D = 900$ мм и весом $G = 0,2$ кН, заполненный водой на высоту $a = 0,5$ м, висит на поршне, диаметр которого $d = 850$ мм (рис. 6.11). К поршню через блоки подвешен груз, удерживающий систему в равновесии. Определите вакуум в сосуде, обеспечивающий равновесие в цилиндре. Трением в системе пренебречь.

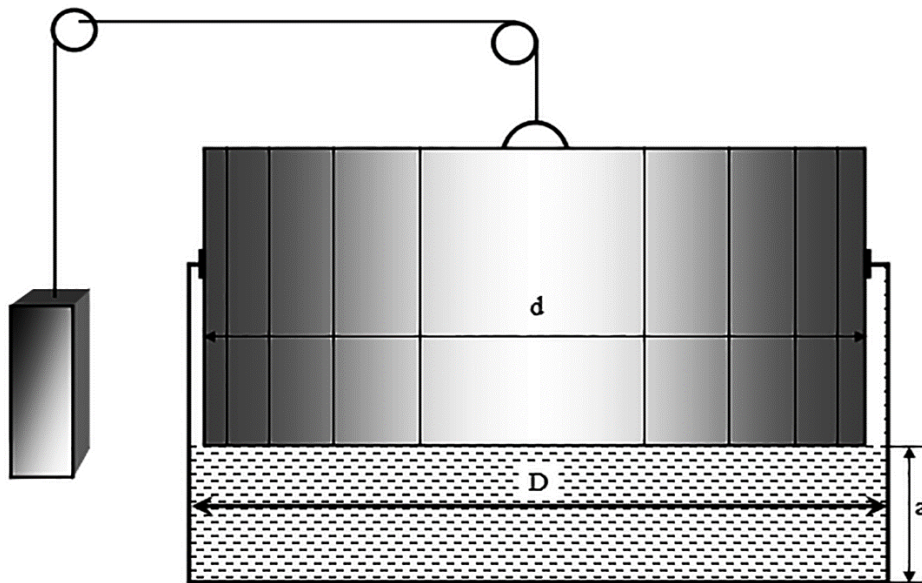


Рисунок 6.11 – Данные для решения задачи 10

Решение. Гидростатическое давление, будучи направленное нормально к поверхности плунжера, создает вакуум:

$$P = \frac{G}{S} = \frac{4 \cdot 0,2}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 0,085^2} = 0,35 \text{ кПа}$$

Давление, будучи направленное нормально к поверхности поршня, создает силу, которая пропорциональна давлению на площади D :

$$P_2 = \frac{P_1}{S_2} = \frac{4 \cdot 0,35}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 0,35}{3,14 \cdot 0,9^2} = 0,55 \text{ кПа}$$

Полное давление составит:

$$P_{\text{полн}} = P_2 + \gamma \cdot h = 0,55 + 9,81 \cdot 0,5 = 5,46 \text{ кПа}$$

Вакуумметрическое давление представляет собой разность между атмосферным и полным давлением и равно: $98,1 - 5,46 = 92,65 \text{ кПа}$.

11. В призматическом сосуде шириной $b = 1,2$ установлена перегородка, имеющая в своей нижней части форму четверти цилиндрической поверхности с радиусом $R = 0,4$ м (рис. 6.12). Определите суммарное давление воды на криволинейную часть перегородки, если глубина воды слева $H_1 = 1,6$ м, справа $H_2 = 1$ м. Найдите точку приложения равнодействующей силы давления.

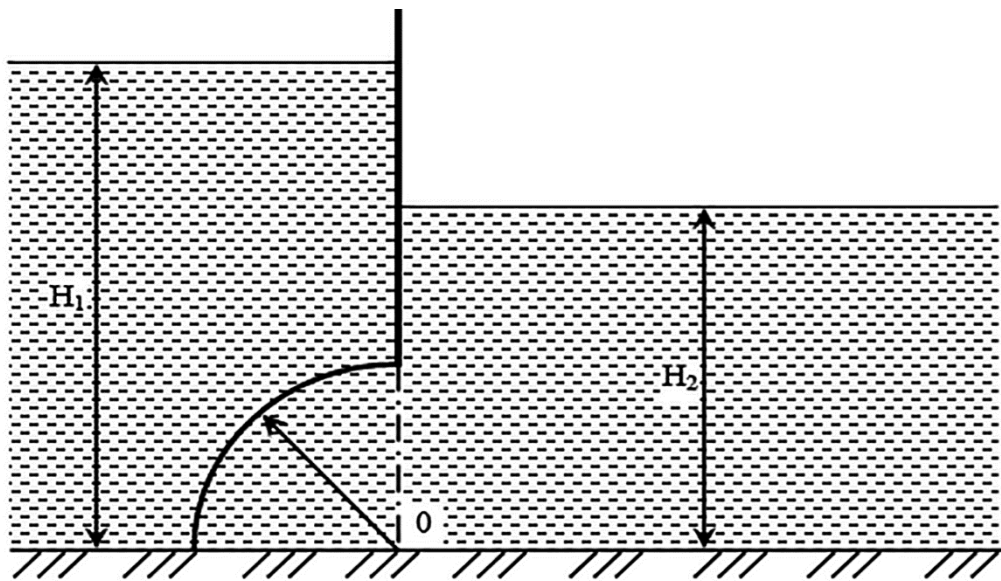


Рисунок 6.12 – Данные для решения задачи 11

Решение:

Верхний бьеф. Определяем горизонтальную составляющую силы давления воды на четверть цилиндрической перегородки:

$$P_{x1} = \gamma h'_{ц.т} \omega_{x1} = \gamma \cdot \left(H_1 - \frac{R}{2} \right) \cdot R \cdot b$$

$$P_{x1} = 9,81 \cdot \left(1,6 - \frac{0,4}{2} \right) \cdot 0,4 \cdot 1,2 = 6,59 \text{ кПа}$$

При расчете $h'_{ц.т}$ представляет глубину погружения центра тяжести вертикальной проекции в верхнем бьефе; ω_{x1} – площадь проекции криволинейной поверхности в верхнем бьефе на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси OX .

Вертикальную составляющую определим по формуле:

$$P_{z1} = \gamma W_1$$

Здесь W_1 – тело давления, ограниченное смоченной криволинейной поверхностью и ее проекцией на свободную поверхность в верхнем бьефе.

$$W_1 = \left(H_1 \cdot R - \frac{\pi R^2}{4} \right) \cdot b = \left(1,6 \cdot 0,4 - \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} \right) \cdot 1,2 = 0,62 \text{ м}^3$$

Следовательно, получим:

$$P_{z1} = 9,81 \cdot 0,62 = 6,06 \text{ кН}$$

Нижний бьеф. Определяем горизонтальную составляющую силы давления воды на четверть цилиндрической перегородки в нижнем бьефе:

$$P_{x2} = \gamma h''_{ц.т} \omega_{x2} = \gamma \cdot \left(H_2 - \frac{R}{2}\right) \cdot R \cdot b$$

$$P_{x2} = 9,81 \cdot \left(1,0 - \frac{0,4}{2}\right) \cdot 0,4 \cdot 1,2 = 3,76 \text{ кПа}$$

При расчете $h''_{ц.т}$ представляет глубину погружения центра тяжести вертикальной проекции в нижнем бьефе; ω_{x1} – площадь проекции криволинейной поверхности в нижнем бьефе на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси OX .

Вертикальную составляющую определим по формуле:

$$P_{z2} = \gamma W_2$$

Здесь W_2 – тело давления, ограниченное смоченной криволинейной поверхностью и ее проекцией на свободную поверхность в нижнем бьефе.

$$W_2 = \left(H_2 \cdot R - \frac{\pi R^2}{4}\right) \cdot b = \left(1 \cdot 0,4 - \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4}\right) \cdot 1,2 = 0,33 \text{ м}^3$$

Тогда $P_{z1} = 9,81 \cdot 0,33 = 3,23 \text{ кН}$.

Равнодействующая сил давления воды на цилиндрический затвор находится следующим образом:

$$P_x = P_{x1} - P_{x2} = 6,59 - 3,76 = 2,83 \text{ кН};$$

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} = 6,06 + 3,23 = 9,29 \text{ кН};$$

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{2,83^2 + 9,29^2} = 9,72 \text{ кН}$$

Линия действия результирующей силы давления должна проходить через точку O , так как сила нормальна к поверхности, и через точку пересечения составляющих P_x и P_z . Угол между равнодействующей и силой P_x составит:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P_z}{P_x} = \frac{9,29}{2,83} = 3,3; \theta = 73^\circ 05';$$

$$\cos \theta = \frac{P_x}{P_p} = \frac{2,83}{9,72} = 0,29; \theta = 73^{\circ}07';$$

$$\sin \theta = \frac{P_z}{P_p} = \frac{9,29}{9,72} = 0,955; \theta = 73^{\circ}2''.$$

С учетом направления осей OX и OZ получим следующие значения координат центра давления:

$$x = R \cdot \cos \theta = 0,4 \cdot 0,29 = 0,116 \text{ м};$$

$$z = R \cdot \sin \theta = 0,4 \cdot 0,955 = 0,382 \text{ м}$$

12. Для создания подпора в реке применяется плотина Шануана, представляющая собой плоский прямоугольный щит, который может вращаться вокруг горизонтальной оси O . Угол наклона щита $\alpha = 60$ град. Глубина воды перед щитом $h_1 = 3$ м, за щитом $h_2 = 1$ м (рис. 6.13). Определите положение оси вращения щита x_0 , при котором в случае увеличения верхнего уровня воды выше плотины щит опрокидывается под ее давлением.

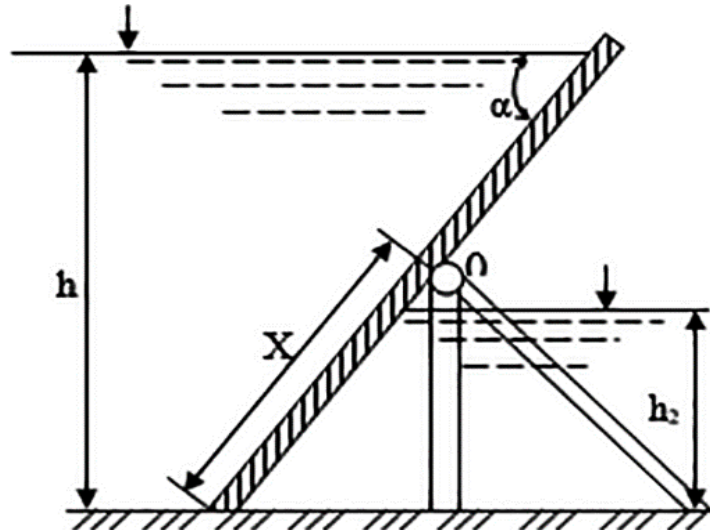


Рисунок 6.13 – Данные для решения задачи 12

Решение. Условие равновесия стенки сводится к равенству моментов сил $R \cdot h_1$ и $R \cdot h_2$, которые создаются столбами жидкости – соответственно h_1 и h_2 , и которые приложены к щиту в центрах давления с координатами $X \cdot h_1$ и $X \cdot h_2$.

Поскольку плечи сил $R \cdot h_1$ и $R \cdot h_2$ равны $(X_0 - X \cdot h_1)$ и $(X_0 - X \cdot h_2)$ соответственно, то условие равновесия моментов этих сил имеет вид:

$$R \cdot h_1 \cdot (X_0 - X \cdot h_1) = R \cdot h_2 \cdot (X_0 - X \cdot h_2)$$

По данным задачи определим значения $X \cdot h_1$ и $X \cdot h_2$, а также отношение $R \cdot h_1$ на $R \cdot h_2$, после чего найдем X_0 .

Так как атмосферное давление, действующее с обеих сторон стенки, не создает моментов, оно не включено в уравнение равновесия:

$$R \cdot h_1 = \gamma \cdot h_1 - A \cdot \frac{h_1}{2}; R \cdot h_2 = \gamma \cdot h_2 - A \cdot \frac{h_2}{2}$$

При этом $A \cdot h_1$ и $A \cdot h_2$ – площади смоченной поверхности щита, которые пропорциональны высотам столбов жидкости. Подставляя в первое уравнение выражения $R \cdot h_1$ и $R \cdot h_2$, после сокращения на $\gamma/2$, получим:

$$h_1^2 \cdot (X_0 - X \cdot h_1) = h_2^2 \cdot (X_0 - X \cdot h_2)$$

Подставив найденные значения $X \cdot h_1$ и $X \cdot h_2$ в равенство и решив полученное уравнение относительно X_0 , найдем окончательно:

$$X_0 = \frac{h_1^3 - h_2^3}{(h_1^3 - h_2^3) \cdot 3 \sin \alpha} = \frac{h_1^2 + h_1 \cdot h_2 + h_2^2}{(h_1^3 - h_2^3) \cdot 3 \sin \alpha}$$

$$X_0 = \frac{3^2 + 3 \cdot 1 + 1^2}{(3^3 - 1^3) \cdot 3 \sin 60} = 0,193 \text{ м}$$

13. Цилиндрический затвор, находящийся в прямоугольном русле, шириной $b = 4,0$ м имеет диаметр $D = 3$ м; глубина воды за затвором $H_2 = D/2$. Определите силу гидростатического давления, точку ее приложения и постройте эпюру давления.

Решение:

Верхний бьеф. Горизонтальная составляющая:

$$P_{x1} = \gamma h'_{ц.т} \omega_x = \gamma \cdot 0,5 \cdot H_1^2 \cdot b$$

$$P_{x1} = 9,81 \cdot 0,5 \cdot 3^2 \cdot 4 = 176,6 \text{ кН}$$

Здесь $h'_{ц.т}$ – глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции; ω_x – площадь проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси OX .

Вертикальная составляющая давления на затвор определяется с учетом формулы: $P_z = \gamma W$. В данной задаче P'_z – вертикальная составляющая сил давления на нижнюю четверть цилиндрического затвора; W' – объем тела давления, заключенного между нижней четвертью цилиндрической поверхности, ее проекцией на свободную поверхность и вертикальными проектирующими плоскостями. Следовательно, получим:

$$P'_{z1} = \gamma \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot b = 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 3^2}{8} \cdot 4 = 138,62 \text{ кН}$$

Нижний бьеф. Производим расчет соответствующих показателей:

$$P_{x2} = \gamma h'_{ц,т2} \omega_{x2} = \gamma \cdot 0,5 \cdot H_2^2 \cdot b$$

$$P_{x2} = 9,81 \cdot 0,5 \cdot 1,5^2 \cdot 4 = 44,145 \text{ кН}$$

$$P'_{z2} = \gamma \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{16} \cdot b = 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 3^2}{16} \cdot 4 = 69,3 \text{ кН}$$

Учитывая направление сил, определим равнодействующее горизонтальных и вертикальных сил:

$$P_x = P_{x1} - P_{x2} = 176,6 - 44,145 = 132,46 \text{ кН};$$

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} = 138,62 + 69,3 = 207,92 \text{ кН}$$

Равнодействующая сил давления воды на цилиндрический затвор находится выражением:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{132,46^2 + 207,92^2} = 246,53 \text{ кН}$$

Функции наклона силы P к горизонту составят:

$$\cos \theta = \frac{P_x}{P} = \frac{132,46}{246,53} = 0,54; \theta = 57^\circ 5'' ,$$

$$\sin \theta = \frac{P_z}{P} = \frac{207,92}{246,53} = 0,84; \theta = 57^\circ 5'' .$$

Координаты центра давления равны:

$$x = r \cdot \cos \theta = 1,5 \cdot 0,54 = 0,81 \text{ м};$$

$$z = r \cdot \sin \theta = 1,5 \cdot 0,84 = 1,26 \text{ м}$$

Определение положения сил графически показано на рисунке 6.14.

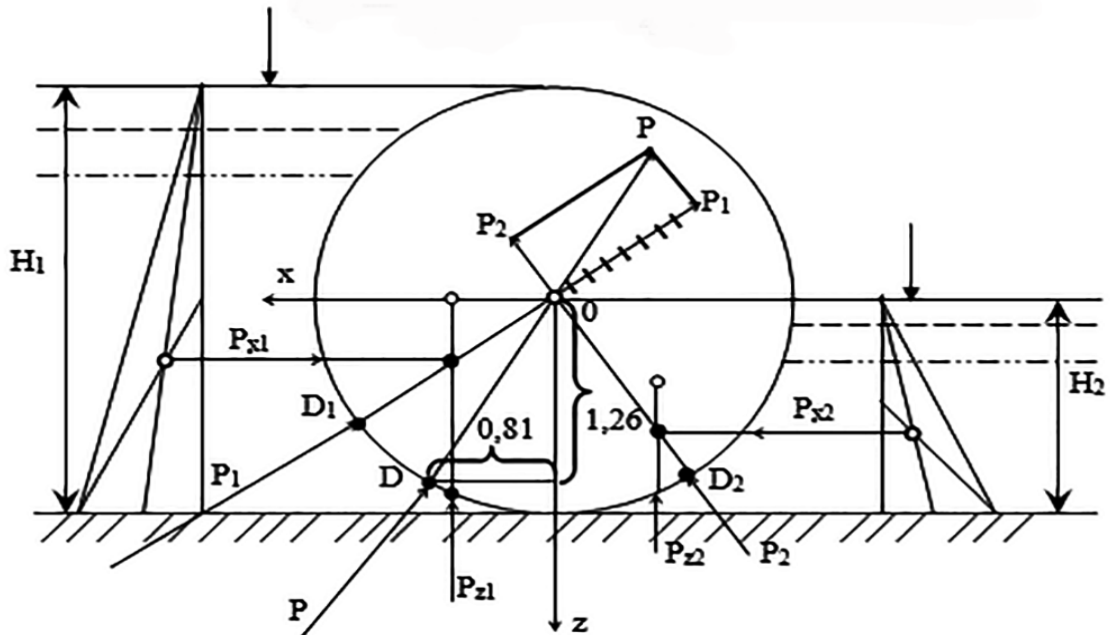


Рисунок 6.14 – Определение положения сил

14. Шлюзовое окно закрыто щитом треугольной формы шириной, составляющей $a = 2$ м. За щитом воды нет, глубина воды перед ним $h_1 = 6$ м; при этом горизонт воды перед щитом совпадает с его вершиной (рис. 6.15). Определите силу гидростатического давления, а также положение центра давления на щит.

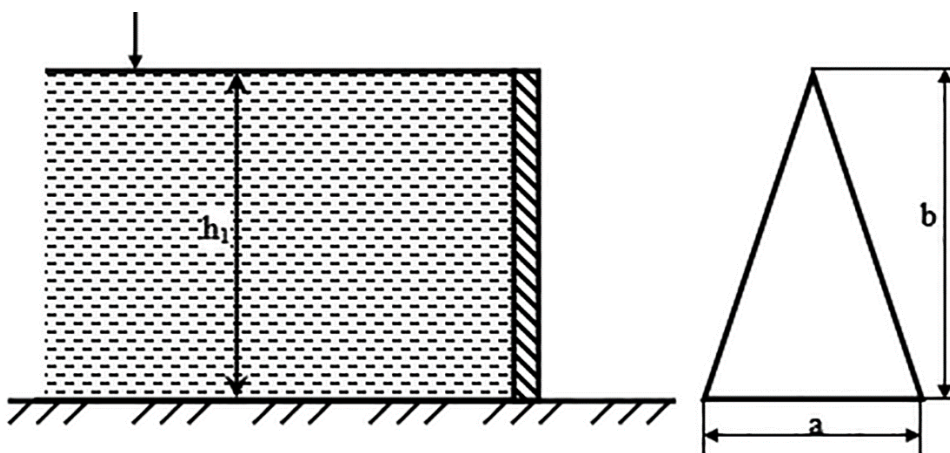


Рисунок 6.15 – Данные для решения задачи 14

Решение. Рассчитаем силу абсолютного гидростатического давления воды на затвор:

$$P_{\text{абс}} = \gamma \cdot h_c \cdot S$$

При этом γ – удельный вес воды, равный $9,81 \text{ кН/м}^3$; h_c – глубина погружения центра тяжести затвора; S – площадь смоченной части затвора.

Определим значение площади смоченной части затвора:

$$S = \frac{1}{2} \cdot a \cdot b = \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 2 = 6 \text{ м}^2$$

Подставив значения физических величин, получим:

$$P_{\text{абс}} = 9,81 \cdot 6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 6 = 235,44 \text{ кН}$$

Определим координаты центра давления:

$$l_d = \frac{2 \cdot h_1 + 3 \cdot h_1^2}{4 \cdot h_1} = \frac{2 \cdot 6 + 3 \cdot 6^2}{4 \cdot 6} = 5 \text{ м}$$

15. Для сброса излишков воды используется донный водяной выпуск, прямоугольный затвор которого имеет размеры: $a = 1,5 \text{ м}$ и $b = 3 \text{ м}$; угол наклона составляет $\alpha = 60$ град. Глубина воды от ее свободной поверхности до нижней кромки затвора $h_1 = 12 \text{ м}$ (рис. 6.16). Определите силу избыточного гидростатического давления воды на затвор водяного выпуска.

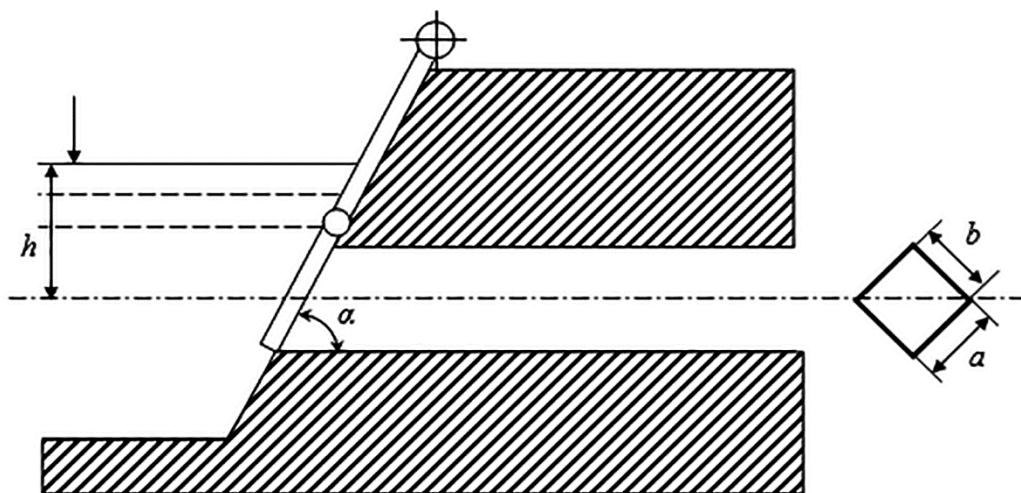


Рисунок 6.16 – Данные для решения задачи 15

Решение. Рассчитаем силу абсолютного гидростатического давления воды на затвор:

$$P_{\text{абс}} = \gamma \cdot h_c \cdot S$$

При этом γ – удельный вес воды, равный $9,81 \text{ кН/м}^3$; h_c – глубина погружения центра тяжести затвора; S – площадь смоченной части затвора.

Рассчитаем параметры h_c и S :

$$h_c = h_1 - 0,5 \cdot b \cdot \sin\alpha = 12 - 0,5 \cdot 3 \cdot \sin 60 = 10,7 \text{ м};$$

$$S = a \cdot b = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ м}^2$$

Подставив значения физических величин, получим:

$$P_{\text{абс}} = 9,81 \cdot 10,7 \cdot 4,5 = 472,4 \text{ кН}$$

16. Плоский квадратный щит шириной $b = 4 \text{ м}$ установлен с углом наклона к горизонту $\alpha = 45 \text{ град}$. Глубина воды перед щитом $h_1 = 8 \text{ м}$; за щитом $h_2 = 2 \text{ м}$. Определите силу абсолютного гидростатического давления и центр давления жидкости на щит.

Решение. Определим давление воды в верхнем бьефе:

$$P_1 = \gamma h'_{\text{ц.т1}} \omega_1$$

При этом $h'_{\text{ц.т1}}$ – расстояние до центра тяжести смоченной поверхности; ω_1 – площадь смоченной поверхности. Данные параметры определяются по формулам:

$$h'_{\text{ц.т1}} = h_1 - \frac{b \cdot \sin\alpha}{2}; \omega_1 = b^2$$

Удельный вес воды (γ) равен $9,81 \text{ кН/м}^3$. Следовательно, имеем:

$$\begin{aligned} P_1 &= \gamma \cdot \left(h_1 - \frac{b \cdot \sin\alpha}{2} \right) \cdot b^2 = \\ &= 9,81 \cdot \left(8 - \frac{4 \cdot \sin 45}{2} \right) \cdot 4^2 = 1033,71 \text{ кН} \end{aligned}$$

Определим расстояние до центра давления:

$$\begin{aligned} l_{\text{цд1}} &= \frac{Y_{y1}}{h_0 \cdot \omega_1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_1^2 + (h_1 - b \cdot \sin\alpha) \cdot h_1 + (h_1 - b \cdot \sin\alpha)^2}{(h_1 + (h_1 - b \cdot \sin\alpha)) \cdot \sin\alpha} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{8^2 + (8 - 4 \cdot \sin 45) \cdot 8 + (8 - 4 \cdot \sin 45)^2}{(8 + (8 - 4 \cdot \sin 45)) \cdot \sin 45} = 9,45 \text{ м} \end{aligned}$$

Расчеты для нижнего бьефа выглядят следующим образом:

$$P_2 = \gamma h_{ц,Т2} \omega_2;$$

$$h_{цТ2} = \frac{h_2}{2}; \quad \omega_2 = \frac{h_2}{\sin\alpha} \cdot b;$$

$$\text{следовательно, } P_2 = \gamma \cdot \frac{h_2}{2} \cdot b^2 = 9,81 \cdot \frac{2}{2} \cdot 4^2 = 156,96 \text{ кН}$$

$$l_{цд2} = \frac{Y_{y2}}{h_0 \cdot \omega_2} = \frac{\frac{b}{3} \cdot \left(\frac{h_2}{\sin\alpha}\right)^3}{\frac{h_2}{2} \cdot b \cdot \frac{h_2}{\sin\alpha}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_2}{\sin\alpha} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{0,707} = 1,89 \text{ м}$$

Определим равнодействующую силу гидростатического давления:

$$P_p = P_1 - P_2 = 1033,71 - 156,96 = 876,75 \text{ кН}$$

Для определения расстояния до равнодействующего центра давления составим уравнение моментов относительно точки 0:

$$P_p \cdot l_{цдр} = P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot \left(l_{цд2} + \left(\frac{h_2 - h_1}{\sin\alpha} \right) \right);$$

$$l_{цдр} = \frac{P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot \left(l_{цд2} + \left(\frac{h_2 - h_1}{\sin\alpha} \right) \right)}{P_p}$$

$$l_{цдр} = \frac{1033,71 \cdot 9,45 - 156,96 \cdot \left(1,89 + \left(\frac{8 - 2}{0,707} \right) \right)}{876,75} = 9,28 \text{ м}$$

17. Цистерна диаметром $D = 1,4 \text{ м}$ заполнена керосином (плотность керосина равна 800 кг/м^3) на глубину $h_1 = 0,7 \text{ м}$ (рис. 6.17). Определите силу избыточного гидростатического давления P , которую необходимо приложить для открытия крышки A цистерны, а также найдите координату точки приложения этой силы.

Решение. Горизонтальная составляющая давления P_x керосина на полушферу равна силе, определяемой давлением на вертикальную проекцию смоченной поверхности, то есть на полукруг диаметром D .

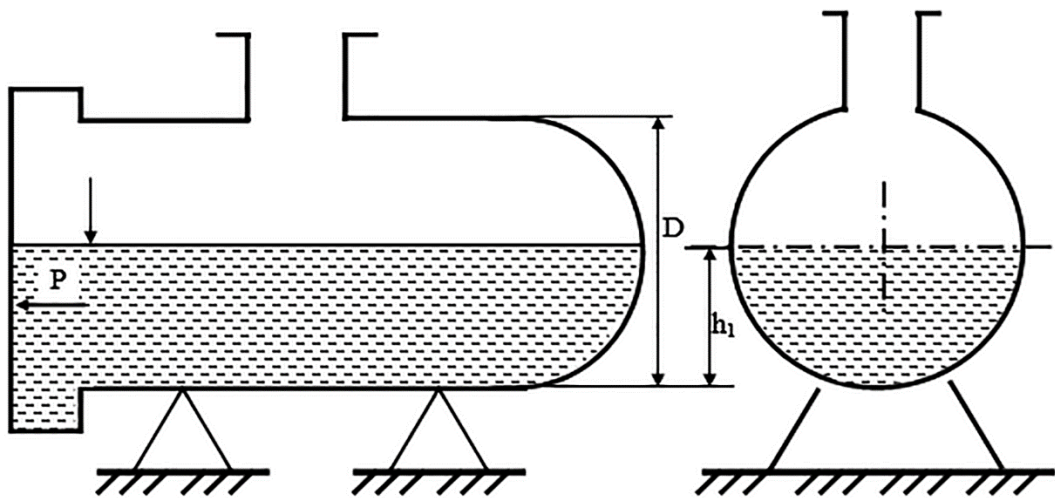


Рисунок 6.17 – Данные для решения задачи 17

Горизонтальную составляющую силы вычислим по формуле:

$$P_x = \gamma h'_{ц.т} \omega_x$$

Удельный вес керосина составляет: $\gamma = \rho \cdot g = 800 \cdot 9,81 = 7848 \text{ Н/м}^3$

$h'_{ц.т}$ – глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции; ω_x – площадь проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси OX . Определим данные параметры:

$$h'_{ц.т} = 0,22 \cdot d = 0,22 \cdot 1,4 = 0,308 \text{ м};$$

$$\omega_x = \frac{\pi \cdot d^2}{8} = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{8} = 0,769 \text{ м}^2$$

Следовательно, получим:

$$P_x = 7,85 \cdot 0,308 \cdot 0,769 = 1,86 \text{ кПа}$$

Положение горизонтальной составляющей совпадает с центром тяжести вертикальной проекции: $l_{x1} = 0,308 \text{ м}$.

18. Прямоугольный щит высотой $a = 1,9 \text{ м}$, шириной $b = 1,5 \text{ м}$, толщиной $c = 0,25 \text{ м}$, массой $m = 1,8 \text{ т}$, с углом наклона $\alpha = 70 \text{ град}$. перекрывает отверстие в теле плотины. Нижняя кромка щита находится в воде на глубине $h_1 = 9 \text{ м}$; коэффициент трения скольжения его направляющих равен $f = 0,3$ (рис. 6.18). Определите силу тяги T , необходимую для поднятия щита вверх.

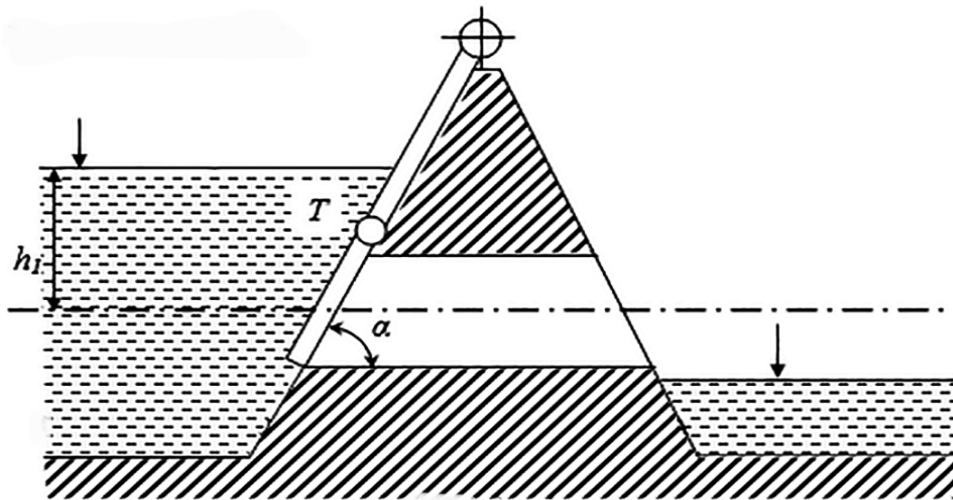


Рисунок 6.18 – Данные для решения задачи 18

Решение. Сила тяги T определяется по формуле:

$$T = G \cdot Y + P \cdot f \cdot X$$

При этом P – равнодействующая сила гидростатического давления; X – плечо силы P , равное расстоянию до центра давления; Y – плечо силы G .

Определим силу гидростатического давления:

$$P_{abc} = \gamma \cdot h_c \cdot S$$

При этом γ – удельный вес воды, равный $9,81 \text{ кН/м}^3$; h_c – глубина погружения центра тяжести затвора; S – площадь смоченной части затвора.

Значения указанных параметров составят:

$$h_c = h_1 - 0,5 \cdot b \cdot \sin \alpha = 9 - 0,5 \cdot 1,9 \cdot \sin 70 = 8,1 \text{ м};$$

$$S = a \cdot b = 1,5 \cdot 1,9 = 2,85 \text{ м}^2$$

Подставив значения физических величин, получим:

$$P_{abc} = 9,81 \cdot 8,1 \cdot 2,85 = 226,5 \text{ кН}$$

Определим расстояние до центра давления:

$$l_{цд1} = \frac{Y_{y1}}{h_0 \cdot \omega_1} = \frac{\frac{b}{3} \cdot \left(\frac{H_1}{\sin \alpha}\right)^3}{\frac{H_1}{2} \cdot b \cdot \frac{H_1}{\sin \alpha}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_1^2 + \left(h_1 - \frac{a}{\sin \alpha}\right) \cdot h_1 + \left(h_1 - \frac{a}{\sin \alpha}\right)^2}{\left(h_1 + \left(h_1 - \frac{a}{\sin \alpha}\right)\right) \cdot \sin \alpha}$$

$$l_{\text{щд1}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{9^2 + \left(9 - \frac{1,9}{\sin 70}\right) \cdot 9 + \left(9 - \frac{1,9}{\sin 70}\right)^2}{\left(9 + \left(9 - \frac{1,9}{\sin 70}\right)\right) \cdot \sin 70} = 8,5 \text{ м}$$

Сила тяги, необходимая для поднятия щита вверх, составит:

$$T = 17,66 \cdot 2,93 + 0,3 \cdot 8,5 \cdot 226,5 = 109,5 \text{ кН};$$

$$Y = \frac{h_1 - \frac{a}{2}}{\sin \alpha} \cdot \sin \beta = \frac{9 - \frac{1,9}{2}}{\sin 70} \cdot \sin 20 = 2,93 \text{ м}$$

19. Ирригационный канал перегораживается плоским квадратным щитом шириной $a = 6 \text{ м}$, весом $G = 20 \text{ кН}$, с углом наклона $\alpha = 60 \text{ град}$. Глубина воды перед щитом $h_1 = 2,2 \text{ м}$, за щитом $h_2 = 1,0 \text{ м}$ (рис. 6.19). Определите, пренебрегая трением в шарнире, начальную силу тяги T , которую необходимо приложить для поднятия щита.

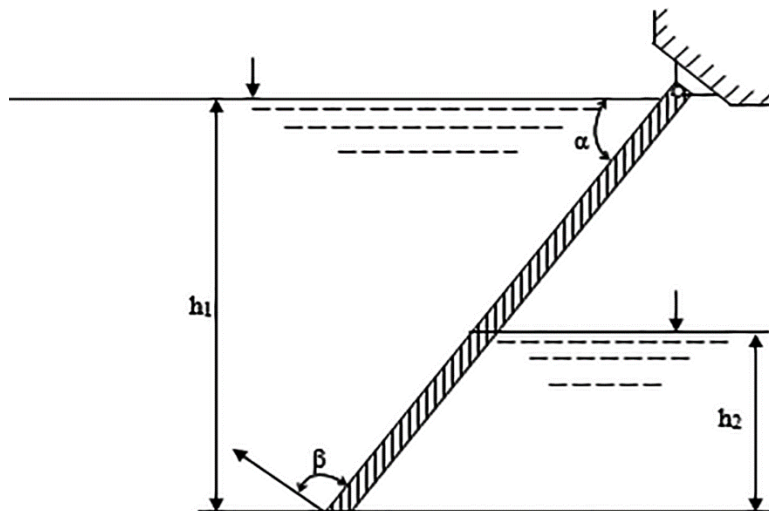


Рисунок 6.19 – Данные для решения задачи 19

Решение. Определим давление воды в верхнем бьефе:

$$P_1 = \gamma h_{\text{ц,т1}} \omega_1$$

При этом $h_{\text{ц,т1}}$ – расстояние до центра тяжести смоченной поверхности;
 ω_1 – площадь смоченной поверхности.

Удельный вес воды (γ) равен $9,81 \text{ кН/м}^3$. Следовательно, имеем:

$$h_{ц,т1} = \frac{h_1}{2}; \omega_1 = \frac{h_1}{\sin\alpha} \cdot b;$$

$$P_1 = 9,81 \cdot \frac{2,2}{2} \cdot \frac{2,2}{\sin 60} \cdot 6 = 164,5 \text{ кН}$$

Определим расстояние до центра давления:

$$l_{цд1} = \frac{Y_{y1}}{h_0 \cdot \omega_1} = \frac{\frac{b}{3} \cdot \left(\frac{h_1}{\sin\alpha}\right)^3}{\frac{h_1}{2} \cdot b \cdot \frac{h_1}{\sin\alpha}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_1}{\sin\alpha} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2,2}{0,865} = 1,7 \text{ м}$$

Произведем соответствующие расчеты для *нижнего бьефа*:

$$P_2 = \gamma h_{ц,т2} \omega_2;$$

$$h_{ц,т2} = \frac{h_2}{2}; \omega_2 = \frac{h_2}{\sin\alpha} \cdot b;$$

$$P_2 = 9,81 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sin 60} \cdot 6 = 34,02 \text{ кН};$$

$$l_{цд2} = \frac{Y_{y2}}{h_0 \cdot \omega_2} = \frac{\frac{b}{3} \cdot \left(\frac{h_2}{\sin\alpha}\right)^3}{\frac{h_2}{2} \cdot b \cdot \frac{h_2}{\sin\alpha}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_2}{\sin\alpha} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{0,865} = 0,77 \text{ м}$$

Определим равнодействующую силу гидростатического давления:

$$P_p = P_1 - P_2 = 164,5 - 34,02 = 130,48 \text{ кН}$$

Для определения расстояния до равнодействующего центра давления составим уравнение моментов относительно точки 0:

$$P_p \cdot l_{цдр} = P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot \left(l_{цд2} + \left(\frac{h_2 - h_1}{\sin\alpha} \right) \right);$$

$$l_{цдр} = \frac{P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot \left(l_{цд2} + \left(\frac{h_2 - h_1}{\sin\alpha} \right) \right)}{P_p}$$

$$l_{цдр} = \frac{164,5 \cdot 1,7 - 34,02 \cdot \left(0,77 + \left(\frac{2,2 - 1}{0,865} \right) \right)}{130,48} = 1,61 \text{ м}$$

Составим уравнение моментов:

$$\sum M_0 = N \cdot L - P_p \cdot l_{\text{цдр}} - G \cdot X = 0$$

$$\text{откуда } N = \frac{P_p \cdot l_{\text{цдр}} + G \cdot X}{L} = \frac{130,48 \cdot 1,61 + 20 \cdot 0,49}{2,54} = 86,6 \text{ кН}$$

При этом X – плечо силы G , определяется следующим образом:

$$X = \left(\frac{h_1 - h_2}{\sin \alpha} \right)^2 - (h_1 - h_2)^2 = \left(\frac{2,2 - 1}{0,865} \right)^2 - (2,2 - 1)^2 = 0,49 \text{ м}$$

L – плечо силы N , определяемое следующим образом:

$$L = \frac{h_1 \cdot \sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{2,2 \cdot \sin 90}{\sin 60} = 2,54 \text{ м}$$

20. Цилиндрический затвор диаметром $D = 3$ м установлен в прямоугольном канале, ширина которого $b = 2,5$ м. Глубина воды до затвора и после него соответственно $H_1 = 3,2$ м и $H_2 = 0$ (рис. 6.20). Определите силу гидростатического давления на затвор, точку ее приложения и направления.

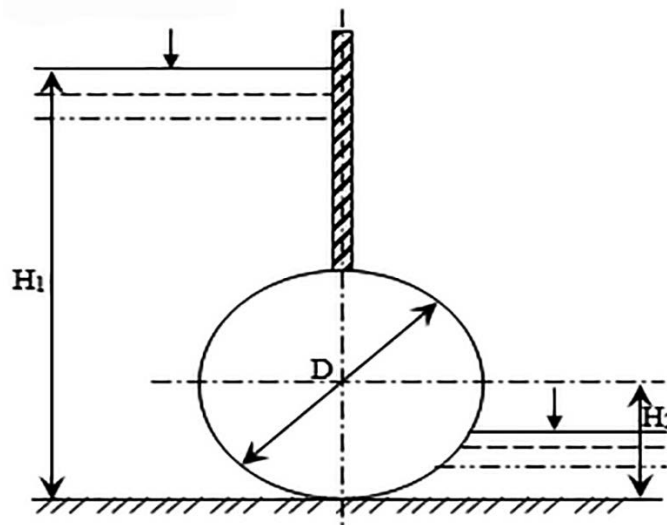


Рисунок 6.20 – Данные для решения задачи 20

Решение. Определяем горизонтальную составляющую силы давления воды на цилиндрический затвор:

$$P_x = \gamma h'_{\text{ц,т}} \omega_x; \text{ при } h'_{\text{ц,т}} = h_1 - \frac{d}{2} \text{ и } \omega_x = db$$

$$P_x = 9,81 \cdot (3,2 - 1,5) \cdot 2,3 \cdot 2,5 = 115,64 \text{ кН}$$

Эпюра, площади которой пропорциональна горизонтальная составляющая, выразится трапецией.

Проверим найденную силу с помощью эпюры:

$$P_x = Fb = \frac{1}{2}[\gamma h_1 + \gamma(h_1 - d)]db$$
$$P_x = \frac{9,81}{2}[3,2 + (3,2 - 2,3)] \cdot 2,3 \cdot 2,5 = 115,64 \text{ кН}$$

Вертикальная составляющая давления на затвор находится:

$$P_z = P'_z - P''_z = \gamma(W' - W'') = \gamma W$$

В данной формуле P'_z – вертикальная составляющая сил давления на нижнюю четверть цилиндрического затвора; P''_z – вертикальная составляющая сил давления на верхнюю четверть цилиндрического затвора; W' – объем тела давления, заключенного между нижней четвертью цилиндрической поверхности, ее проекцией на свободную поверхность и вертикальными проектирующими плоскостями; W'' – объем тела давления, заключенного между верхней четвертью цилиндрической поверхности, ее проекцией на свободную поверхность и вертикальными проектирующими плоскостями.

Так как сила P'_z направлена вверх, а сила P''_z – вниз, то результирующая этих сил P_z равна их разности и направлена в сторону большей силы, то есть вверх. Окончательный объем W , равный разности объемов ($W' - W''$), соответствует объему полуцилиндра:

$$W = \frac{\pi d^2}{4 \cdot 2} \cdot b = \frac{\pi d^2}{8} \cdot b$$

Следовательно, вертикальная составляющая сил давления на затвор составляет:

$$P_z = \gamma W = \gamma \cdot \frac{\pi d^2}{8} \cdot b; P_z = 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 2,3^2}{8} \cdot 2,5 = 50,92 \text{ кН}$$

Равнодействующая сил давления воды на цилиндрический затвор находится следующим образом:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{115,64^2 + 50,92^2} = 126,36 \text{ кН}$$

Угол между равнодействующей и силой P_x составит:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{P_z}{P_x} = \frac{50,92}{115,64} = 0,44; \theta = 23^\circ 77'$$

Расстояние от свободной поверхности до центра давления горизонтальной составляющей силы P_x равно:

$$l_D = l_{ц.т} + \frac{J_0}{\omega \cdot l_{ц.т}} = h_1 - \frac{d}{2} + \frac{bd^3}{12bd \left(h_1 - \frac{d}{2} \right)}$$

$$l_D = 3,2 - 1,15 + \frac{2,3^2}{12 \cdot (3,2 - 1,15)} = 2,27 \text{ м}$$

Центр давления вертикальной составляющей P_z лежит на вертикальной линии, проходящей через центр тяжести. Центр тяжести эпюры лежит на расстоянии $\frac{4}{3} \cdot \frac{r}{\pi} = \frac{4 \cdot 1,15}{3 \cdot 3,14} = 0,49$ м от оси.

Равнодействующая всех сил давления проходит через точку пересечения горизонтальной силы с вертикальной составляющей и центром окружности. Координаты центра давления равнодействующей относительно осей, проведенных через точку O , определяем следующим образом:

$$\frac{z}{x} = \operatorname{tg} \theta = 0,44; z = 0,44x$$

Подставляем найденное значение z в уравнение $z^2 + x^2 = r^2$:

$$(0,44x)^2 + x^2 = 1,15^2$$

$$\text{откуда } x = \pm \sqrt{\frac{1,32}{1,19}} = -1,05 \text{ м}; z = -0,44 \cdot 1,05 = 0,46 \text{ м}$$

21. Прямоугольный канал шириной $b = 2,8$ м перегораживает плоский затвор. Глубина воды в канале до затвора $H_1 = 2,5$ м, после затвора $H_2 = 0,7$ м. Определите суммарную силу давления воды на затвор, постройте эпюру гид-

ростатического давления и определите точку погружения равнодействующей силы давления. Установите усилие N , необходимое для подъема затвора, если коэффициент трения $k = 0,2$.

Решение. Определим давление воды в верхнем бьефе:

$$P_1 = \gamma h_{ц,т1} \omega_1$$

При этом $h_{ц,т1}$ – расстояние до центра тяжести смоченной поверхности; ω_1 – площадь смоченной поверхности. Удельный вес воды (γ) соответствует $9,81 \text{ кН/м}^3$. Следовательно, имеем:

$$h_{ц,т1} = \frac{H_1}{2}; \omega_1 = H_1 \cdot b;$$

$$P_1 = 9,81 \cdot \frac{2,5}{2} \cdot 2,5 \cdot 2,8 = 85,84 \text{ кН}$$

Определим расстояние до центра давления:

$$l_{цд1} = \frac{\gamma y_1}{h_0 \cdot \omega_1} = \frac{\frac{b}{3} \cdot H_1^3}{\frac{H_1}{2} \cdot b \cdot h_1}; l_{цд1} = \frac{2}{3} \cdot H_1 = \frac{2}{3} \cdot 2,5 = 1,67 \text{ м}$$

Произведем соответствующие расчеты для нижнего бьефа:

$$P_2 = \gamma h_{ц,т2} \omega_2;$$

$$h_{ц,т2} = \frac{H_2}{2}; \omega_2 = H_2 \cdot b;$$

$$P_2 = 9,81 \cdot \frac{0,7}{2} \cdot 0,7 \cdot 2,8 = 6,73 \text{ кН};$$

$$l_{цд2} = \frac{\gamma y_2}{h_0 \cdot \omega_2} = \frac{\frac{b}{3} \cdot H_2^3}{\frac{H_2}{2} \cdot b \cdot h_2}; l_{цд1} = \frac{2}{3} \cdot H_2 = \frac{2}{3} \cdot 0,7 = 0,47 \text{ м}$$

Определим равнодействующую силу гидростатического давления:

$$P_p = P_1 - P_2 = 85,84 - 6,73 = 79,11 \text{ кН}$$

Для определения расстояния до равнодействующего центра давления составим уравнение моментов относительно точки O :

$$P_p \cdot l_{цд} = P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot (l_{цд2} + (H_2 - H_1));$$

$$l_{цд} = \frac{P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot (l_{цд2} + (H_2 - H_1))}{P_p};$$

$$l_{цд} = \frac{85,84 \cdot 1,67 - 6,73 \cdot (0,47 + (2,5 - 0,7))}{79,11} = 1,62 \text{ м}$$

Определим усилие необходимое для подъема затвора:

$$N = P_p \cdot k = 79,11 \cdot 0,2 = 15,82 \text{ кН}$$

Соответствующая эпюра гидростатического давления и полученные результаты решения задачи отображены на рисунке 6.21.

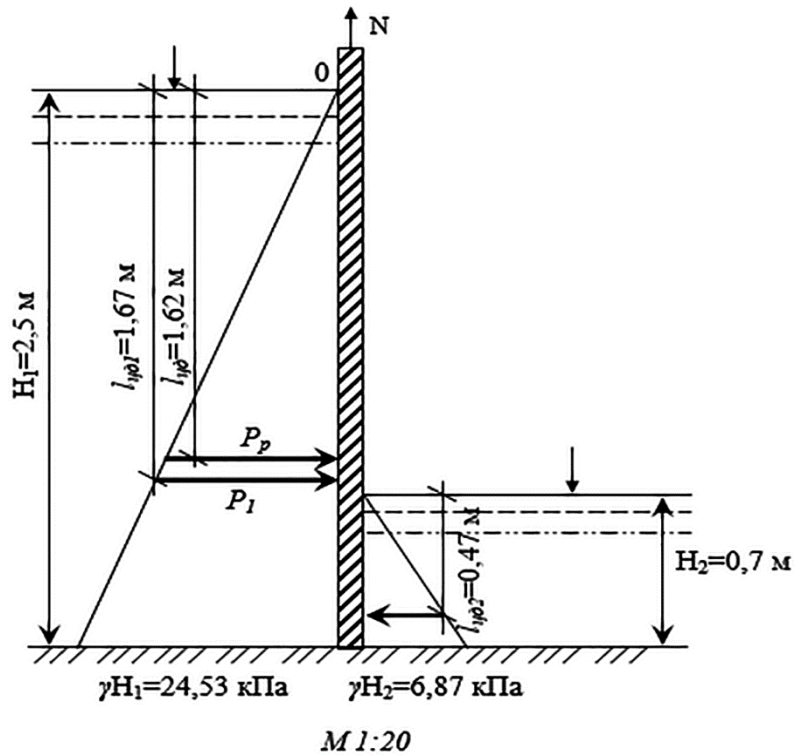


Рисунок 6.21 – Результаты решения задачи 21

22. Плоский наклонный затвор ($\alpha = 60$ град.) перегораживает прямоугольный канал шириной $b = 3,2$ м. Глубина воды до затвора $H_1 = 2,1$ м, после затвора $H_2 = 0,4$ м. Определите усилие натяжения троса, необходимое для

подъема затвора, если он имеет угол наклона $\beta = 50$ град. относительно затвора. Массу затвора не учитывайте. Постройте эпюру давления и найдите точку приложения равнодействующей силы давления.

Решение. Определим давление воды в верхнем бьефе:

$$P_1 = \gamma h_{ц,т1} \omega_1$$

При этом $h_{ц,т1}$ – расстояние до центра тяжести смоченной поверхности; ω_1 – площадь смоченной поверхности. Удельный вес воды (γ) соответствует $9,81 \text{ кН/м}^3$. Следовательно, имеем:

$$h_{ц,т1} = \frac{H_1}{2}; \omega_1 = \frac{H_1}{\sin\alpha} \cdot b;$$
$$P_1 = 9,81 \cdot \frac{2,1}{2} \cdot \frac{2,1}{\sin 60} \cdot 3,2 = 80,02 \text{ кН}$$

Определим расстояние до центра давления:

$$l_{цд1} = \frac{\gamma y_1}{h_0 \cdot \omega_1} = \frac{\frac{b}{3} \cdot \left(\frac{H_1}{\sin\alpha}\right)^3}{\frac{H_1}{2} \cdot b \cdot \frac{H_1}{\sin\alpha}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{H_1}{\sin\alpha} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2,1}{0,865} = 1,62 \text{ м}$$

Приведем соответствующие расчеты для нижнего бьефа:

$$P_2 = \gamma h_{ц,т2} \omega_2;$$
$$h_{ц,т2} = \frac{H_2}{2}; \omega_2 = \frac{H_2}{\sin\alpha} \cdot b;$$
$$P_2 = 9,81 \cdot \frac{0,4}{2} \cdot \frac{0,4}{\sin 60} \cdot 3,2 = 2,9 \text{ кН};$$

$$l_{цд2} = \frac{\gamma y_2}{h_0 \cdot \omega_2} = \frac{\frac{b}{3} \cdot \left(\frac{H_2}{\sin\alpha}\right)^3}{\frac{H_2}{2} \cdot b \cdot \frac{H_2}{\sin\alpha}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{H_2}{\sin\alpha} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,4}{0,865} = 0,31 \text{ м}$$

Определим равнодействующую силу гидростатического давления:

$$P_p = P_1 - P_2 = 80,02 - 2,9 = 77,12 \text{ кН}$$

Для определения расстояния до равнодействующего центра давления составим уравнение моментов относительно точки 0:

$$P_p \cdot l_{цд} = P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot \left(l_{цд2} + \left(\frac{H_2 - H_1}{\sin \alpha} \right) \right);$$

$$l_{цд} = \frac{P_1 \cdot l_{цд1} - P_2 \cdot \left(l_{цд2} + \left(\frac{H_2 - H_1}{\sin \alpha} \right) \right)}{P_p};$$

$$l_{цд} = \frac{80,02 \cdot 1,62 - 2,9 \cdot \left(0,31 + \left(\frac{2,1 - 0,4}{0,865} \right) \right)}{77,12} = 1,6 \text{ м}$$

Составим уравнение моментов:

$$\sum M_0 = N \cdot L - P_p \cdot l_{цдр} = 0; \text{ откуда } N = \frac{P_p \cdot l_{цдр}}{L} = \frac{77,12 \cdot 1,6}{2,37} = 52,04 \text{ кН}$$

При этом L – плечо силы N , определяемое следующим образом (рис. 6.22):

$$L = \frac{H_1 \cdot \sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{2,1 \cdot \sin 50}{\sin 60} = 1,86 \text{ м}$$

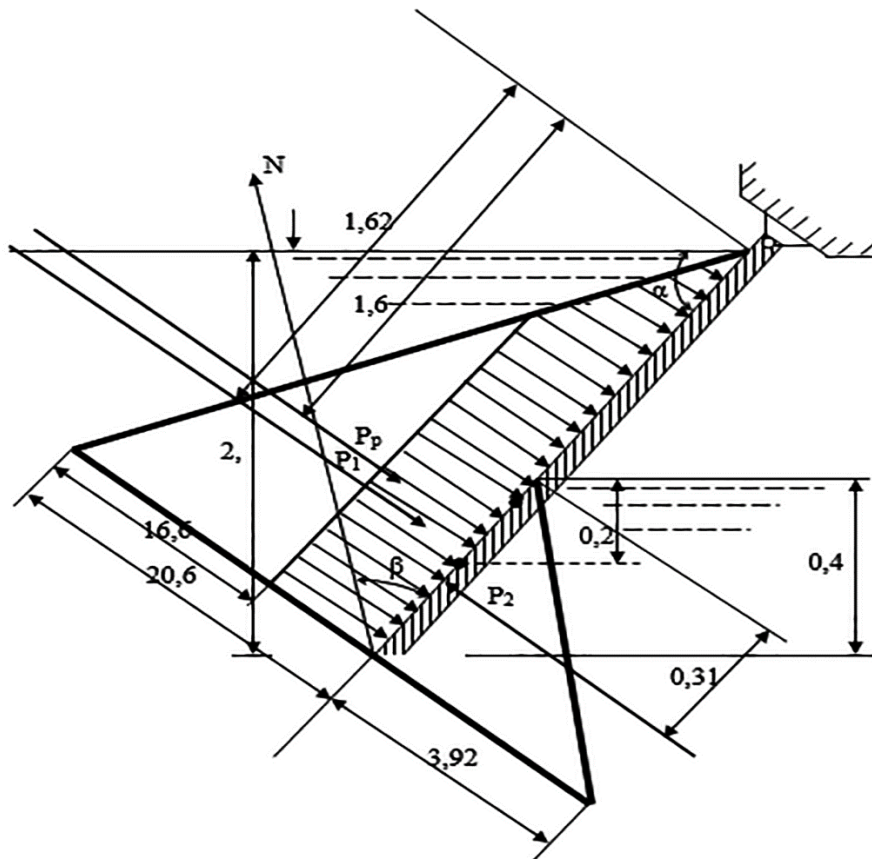


Рисунок 6.22 – Эпюра гидростатического давления воды на плоский наклонный затвор

7 ГИДРОДИНАМИКА

7.1 Методика решения задач

Методика решения всех задач гидродинамики, по существу, сводится к следующему:

1. *Записать в общем виде уравнения, выражающие законы сохранения массы и энергии при движении жидкости или газа.*
2. *Определить слагаемые этих уравнений согласно исходным данным.*
3. *Решить полученную таким образом систему уравнений относительно неизвестной величины.*

Законы сохранения – фундаментальные физические соотношения, на основании которых выводятся частные законы. В современной науке известно более десяти законов сохранения, большинство из которых относятся к ядерной физике. При решении гидродинамических задач широко используются: закон сохранения массы; закон сохранения энергии.

Эти два закона являются следствием того очевидного факта, что время и место действия не могут сами по себе изменить ход физического процесса (при одинаковых начальных условиях эксперимент будет проходить совершенно одинаково в любом месте и в любое время).

7.2 Механическая энергия

Энергия – запас работы, которую может совершить тело, изменяя свое состояние. **Работа** – скалярное произведение силы на перемещение под действием этой силы. На практике величина работы используется для характеристики механизма или технического устройства.

Энергия – это невостребованная работа, математическая абстракция; формула, по которой можно вычислить максимальную работу. В реальных условиях функционирования конкретного механизма часть энергии теряется и переходит в тепло.

Отношение полученной работы к затраченной энергии есть коэффициент полезного действия механизма.

Энергия проявляется во множестве различных форм. Она может быть определена таким способом, что при любом превращении системы полная энергия сохраняется. Однако для системы, которая не претерпевает никаких изменений, разговор об энергии беспредметен. Только при переходе из одной формы в другую или из одного места в другое представление об энергии становится очень полезным как средство для решения практических задач.

Механическая энергия подразделяется на кинетическую (E_k) и потенциальную (E_p) (7.1):

$$E = E_k + E_p \quad (7.1)$$

Кинетическая энергия – это форма энергии, связанная с механическим движением. Она численно равна работе, которая совершается при уменьшении скорости тела от величины (u) до нуля:

$$E_k = \frac{mu^2}{2} \quad (7.2)$$

Потенциальная энергия. Потенциальными называют неподвижные формы энергии, которые потенциально можно превратить в энергию движения. К таким формам относят энергию, запасенную в деформированном теле или в результате смещения тел в некотором силовом поле (электрическом, магнитном или гравитационном).

Потенциальная энергия жидкости или газа разделяется на два вида: потенциальная энергия положения; потенциальная энергия давления.

Потенциальная энергия положения. Твердое, жидкое или газообразное тело массой m занимают определенное положение в поле силы тяжести. Горизонтальная плоскость отсчета $E_{\text{полож}}$ выбирается произвольно. Это связано с тем, что нас интересуют только изменения потенциальной энергии, а не ее абсолютная величина.

При переходе тела из одного положения в другое изменение потенциальной энергии положения будет равно:

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{полож}} &= m \cdot g \cdot z_2 - m \cdot g \cdot z_1 = \\ &= m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) = m \cdot g \cdot \Delta z - \text{плоскость отсчета } 0 - 0 \\ \Delta E_{\text{полож}} &= m \cdot g \cdot (-z'_2) - m \cdot g \cdot (-z'_1) = \\ &= m \cdot g \cdot (z'_1 - z'_2) - \text{плоскость отсчета } 0' - 0'\end{aligned}$$

При этом изменение потенциальной энергии не зависит от выбора плоскости отсчета.

$E_{\text{полож}} = m \cdot g \cdot z$ – потенциальная энергия положения, численно равна работе, которую совершает сила тяжести при падении тела с высоты z . Если тело расположено выше плоскости отсчета, высота z берется со знаком плюс, если ниже – со знаком минус.

Таким образом, потенциальная энергия положения жидкости определяется с использованием формулы (7.3):

$$E_{\text{полож}} = m \cdot g \cdot z \quad (7.3)$$

Потенциальная энергия давления. Другой вид потенциальной энергии связан с деформацией тел. Для твердого тела такой вид энергии запасается в сжатой пружине, для текучих тел (жидкостей и газов) он называется потенциальной энергией давления.

Покоящаяся и движущаяся жидкости находятся в деформированном (сжатом) состоянии под действием поверхностных и массовых сил; при этом

в жидкости появляется энергия упругой деформации, пропорциональная величине напряжений сжатия (давлений) в жидкости. При расширении жидкости энергия упругой деформации превращается в работу.

Таким образом, потенциальная энергия давления жидкости определяется следующим образом (7.4):

$$E_{\text{давл}} = \frac{p \cdot m}{\rho} \quad (7.4)$$

7.3 Закон сохранения энергии для идеальной жидкости

Идеальная жидкость – жидкость без вязкости и абсолютно несжимаемая. В такой гипотетической жидкости отсутствуют силы трения и не тратится энергия на работу по их преодолению, а также плотность жидкости есть величина постоянная в любом сечении потока. Данное приближение хорошо работает при рассмотрении движения жидкости в медленных потоках или длинных трубах (до тех пор, пока не интересуются тем, что происходит у стенок) и позволяет в первом приближении решать практические задачи.

Итак, полный запас энергии объема жидкости массой m относительно нулевого уровня (плоскости сравнения 0–0) равен:

$$E = m \cdot g \cdot z + \frac{p \cdot m}{\rho} + \frac{mu^2}{2} \quad (7.5)$$

Для идеальной (невязкой) жидкости, в которой не происходит потерь энергии при движении, в произвольных сечениях 1–1 и 2–2 величины энергии должны быть равны:

$$E_1 = E_2; \\ m \cdot g \cdot z_1 + \frac{p_1 \cdot m}{\rho} + \frac{mu_1^2}{2} = m \cdot g \cdot z_2 + \frac{p_2 \cdot m}{\rho} + \frac{mu_2^2}{2} \quad (7.6)$$

Представленное уравнение (7.6) можно обозначить как закон сохранения удельных энергий.

Термин удельная энергия предполагает отношение полной энергии к некоторому количеству вещества – объемному, массовому или весовому.

Энергия, отнесенная к весу жидкости, называется напором. Напор измеряется в метрах. После деления всех членов уравнения (7.6) на вес жидкости ($G = mg$) оно принимает вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (7.7)$$

Уравнение (7.7) называется уравнением Бернулли. Оно было получено в 1738 г. швейцарским математиком и механиком Даниилом Бернулли.

При расчете гидроприводов, газо- и нефтепроводов уравнение (7.7) используют обычно в виде баланса энергий, отнесенных не к весу, а к объему протекающей жидкости ($V = m/\rho$):

$$\rho \cdot g \cdot z_1 + p_1 + \frac{\rho \cdot u_1^2}{2} = \rho \cdot g \cdot z_2 + p_2 + \frac{\rho \cdot u_2^2}{2} \quad (7.8)$$

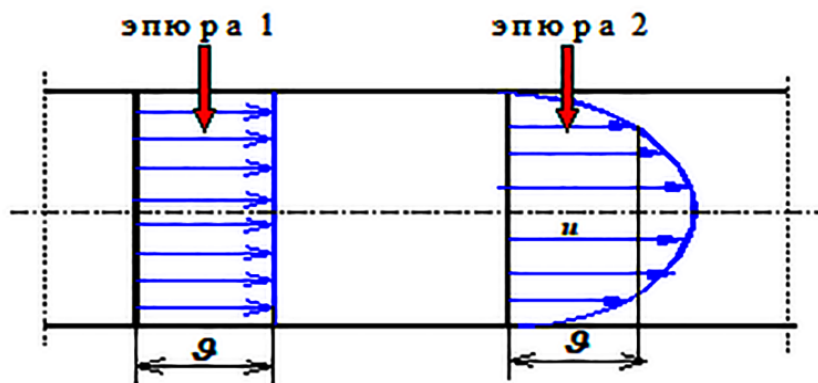
Все слагаемые уравнения (7.8) имеют размерность давления и называются соответственно: $\rho \cdot g \cdot z_1, \rho \cdot g \cdot z_2$ – весовые давления в центрах тяжести сечений 1–1 и 2–2; p_1 и p_2 – статические давления в центрах тяжести сечений 1–1 и 2–2; $\frac{\rho \cdot u_1^2}{2}$ и $\frac{\rho \cdot u_2^2}{2}$ – динамические давления в центрах тяжести сечений 1–1 и 2–2.

Статическое давление – это напряжение сжатия в жидкости, которое появляется в результате действия на жидкость сжимающих сил.

Динамическое давление – давление жидкости на преграду при ее остановке и превращении кинетической энергии в энергию давления.

7.4 Закон сохранения энергии для реальной жидкости

При переходе от идеальной жидкости к реальной необходимо учесть наличие вязкости (сил межмолекулярного взаимодействия при сдвиге) как между жидкостью и стенкой, так и между отдельными слоями жидкости. Вследствие этого, эпюра скоростей в сечении потока получается неравномерной (эпюра 2, рис. 7.1).



u – местная скорость в сечении ds элементарной струйки; ϑ – средняя скорость в сечении потока жидкости или скорость движения всех струек идеальной жидкости (эпюра 1);

$Q = \int u ds = \vartheta \cdot s$ – объемный расход в сечении s потока жидкости

Рисунок 7.1 – Эпюры скоростей в сечении потока жидкости

Определим действительную кинетическую энергию потока как сумму кинетических энергий отдельных струек:

$$E_k = \int dm \cdot \frac{u^2}{2} = \int \rho \cdot d\omega \cdot \frac{u^2}{2} = \rho \int u \cdot d\omega \cdot \frac{u^2}{2} = \rho \int d\omega \cdot \frac{u^3}{2} \quad (7.9)$$

Итак, чем больше неравномерность местных скоростей в сечении потока (больше ε), тем больше корректив кинетической энергии α .

При ламинарном режиме неравномерность местных скоростей максимальная и расчетное значение $\alpha = 2$. При турбулентном режиме вследствие перемешивания частиц скорости в сечении выравниваются и $\alpha = 1,1-1,2$. Для практических расчетов при турбулентном режиме принимается $\alpha = 1$.

Наличие вязкости приводит к появлению в потоке жидкости при ее движении сил трения, которые направлены против движения. На их преодоление затрачивается энергия жидкости.

Потерянная энергия, отнесенная к весу жидкости, называется потерями напора по длине и обозначается $h_{\text{дл}}$.

Кроме того, поток жидкости при своем движении претерпевает деформацию, которая вызывается установкой трубопроводной арматуры (краны, вентили, муфты, шайбы и др.), а также поворотами потока, внезапным расширением и сужением. Потери энергии в такого рода препятствиях называются местными и обозначаются $h_{\text{м}}$.

Тогда суммарные потери удельной энергии выражают формулой (7.10):

$$h_{1-2} = h_{\text{дл}} + h_{\text{м}} \quad (7.10)$$

С учетом вязкости и деформации потока уравнение Бернулли для реальной жидкости принимает вид выражения (7.11):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h \quad (7.11)$$

Таким образом, уравнение Бернулли представляет собой **закон сохранения энергии для движущейся жидкости**: суммарная энергия жидкости в начальном сечении (потенциальная плюс кинетическая) равна суммарной энергии жидкости в конечном сечении плюс потери энергии.

Другими словами, начальная энергия всегда равна сумме энергии, что еще осталась, и энергии, что по пути потерялась.

Если между сечениями потока 1–1 и 2–2 имеется источник энергии (например, насос), энергия жидкости в месте установки насоса скачком возрастает и закон сохранения энергии принимает вид:

$$H_{\text{нас}} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h \quad (7.12)$$

где $H_{\text{нас}}$ – удельная энергия, которую насос забирает у приводного двигателя и передает жидкости (напор насоса).

Суммарная энергия жидкости в начальном сечении (потенциальная плюс кинетическая) плюс энергия, что добавилась в насосе, равна суммарной энергии жидкости в конечном сечении (той, что осталась) плюс потери энергии.

Уравнение Бернулли в любой форме справедливо для тех сечений потока, где струйки не искривляются и не возникает сил инерции.

Необходимо учитывать следующие **правила выбора сечений**:

1) сечения выбираются всегда перпендикулярно направлению движения жидкости;

2) сечения выбираются там, где известно максимальное число слагаемых уравнения Бернулли или там, где нужно что-то определить;

3) в сечениях струйки жидкости должны быть параллельны друг другу, именно при таком условии справедливо уравнение Бернулли.

Внимание! Нельзя выбирать сечения на повороте трубы, при входе в трубу и так далее, то есть там, где скорость движения резко меняется по величине или по направлению, и струйки искривляются.

В левой части уравнения стоит энергия того сечения, от которого начинается движение.

7.5 Закон сохранения массы

Количество вещества, проходящее через поперечное сечение потока, можно измерить в единицах массы, объема или веса. Это количество зависит, очевидно, от скорости движения, величины сечения и времени наблюдения.

На пути движения от начального сечения к конечному форма поперечных сечений потока может меняться самым причудливым образом. Однако, то

массовое количество жидкости, которое прошло за время t через любое сечение, должно остаться неизменным. Это следует из **закона сохранения массы**, который определяется выражением (7.13):

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot s_1 \cdot t = \rho_2 \cdot v_2 \cdot s_2 \cdot t \quad (7.13)$$

Поскольку время можно выбирать произвольно, удобно сравнивать количества жидкости, проходящие за единицу времени (одну секунду, одну минуту, один час и т. д.).

*Количество жидкости, проходящее через сечение за единицу времени, называется **расходом**:*

1. $Q = v \cdot s$ – объемный расход.
2. Q_m – массовый расход.
3. Q_G – весовой расход.

Для жидкости плотность можно считать постоянной величиной. Это следует из закона Гука. **Закон Гука** определяет связь между напряжением и объемной деформацией при всестороннем сжатии жидкости:

$$\Delta p = -E \cdot \varepsilon \quad (7.14)$$

где E – модуль объемной упругости жидкости;
 $\varepsilon = \Delta V/V$ – относительное изменение объема;
 V – первоначальный объем.

Знак минус в формуле (7.14) показывает, что при увеличении давления объем жидкости уменьшается.

Модуль упругости стали составляет $2 \cdot 10^{11}$ Па, а модуль упругости воды $2 \cdot 10^9$ Па. Вследствие высокого модуля упругости жидкости сжимаются незначительно. Так, при повышении давления на 10 МПа, изменение объема равно:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{E}; \frac{10 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^9} = 0,5 \cdot 10^{-2} = 0,5\%$$

В этой связи чаще всего в гидравлических расчетах жидкость считают несжимаемой и плотность жидкости принимается величиной постоянной, не зависящей от давления.

Принимая $\rho = const$, вместо выражение (7.14) получим:

$$\vartheta_1 \cdot s_1 = \vartheta_2 \cdot s_2 = \dots = Q - const \quad (7.15)$$

Уравнение (7.15) выражает закон постоянства объемного расхода по длине потока.

7.6 Гидравлические сопротивления

Потери удельной энергии в потоке жидкости, безусловно, связаны с вязкостью жидкости, но сама вязкость не является единственным фактором, определяющим потери напора. Однако можно утверждать, что величина потерь напора почти всегда пропорциональна квадрату средней скорости движения жидкости. Эту гипотезу подтверждают результаты большинства опытных работ и специально поставленных экспериментов. По этой причине потери напора принято исчислять в долях от скоростного напора (удельной кинетической энергии потока):

$$h_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{v^2}{2g} \quad (7.16)$$

Потери напора принято подразделять на две категории:

1) *потери напора, распределенные вдоль всего канала, по которому перемещается жидкость (трубопровод, канал, русло реки и др.);* эти потери пропорциональны длине канала и называются потерями напора по длине ($h_{\text{дл}}$), сосредоточенными потерями напора;

2) *потери напора на локальной длине потока (достаточно малой по сравнению с протяженностью всего потока);* этот вид потерь во многом зависит

от особенностей преобразования параметров потока (скоростей, формы линий тока и др.); как правило, видов таких потерь довольно много и их расположение по длине потока зачастую далеко не закономерно; данные потери напора называют местными потерями или потерями напора на местных гидравлических сопротивлениях; этот вид потерь напора также принято исчислять в долях от скоростного напора: $h_u = \xi_u \frac{v^2}{2g}$.

Тогда полные потери напора можно представить собой как сумму всех видов потерь напора (7.17):

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{дг}} + \sum h_u \quad (7.17)$$

Оценка величины местных потерь напора практически всегда базируются на результатах экспериментов, определяющих величины коэффициентов потерь. Для вычисления потерь напора по длине имеются более или менее надежные теоретические предпосылки, позволяющие вычислять потери с помощью привычных формул.

Местные потери напора. Несмотря на многообразие видов местных гидравлических сопротивлений, их все же можно при желании сгруппировать: *потери напора в руслах при изменении размеров живого сечения; потери напора на местных гидравлических сопротивлениях, связанных с изменением направления движения жидкости; потери напора при обтекании преград.*

Внезапное расширение русла. Внезапное расширение русла чаще всего наблюдается на стыке участков трубопроводов, когда один трубопровод сочленяется с магистральным трубопроводом большего диаметра. Величина коэффициента потерь напора в данном случае определяется с достаточной точностью на теоретическом уровне. Величины средних скоростей жидкости в сечениях можно определить из условия неразрывности:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2; \text{ где } S_1 = \frac{\pi d^2}{4}, S_2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

Тогда величина потерь напора при внезапном расширении русла определится следующим способом:

$$\Delta h_{\text{вр}} = \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g};$$

$$\xi_{\text{вр}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

Таким образом, можно заключить, что *потери напора при внезапном расширении потока равны скоростному напору, соответствующему потерянной скорости*:

$$\Delta h_{\text{вр}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (7.18)$$

Плавное расширение русла (диффузор). Плавное расширение русла называется диффузором. Течение жидкости в диффузоре имеет сложный характер. Поскольку живое сечение потока постепенно увеличивается, то соответственно снижается скорость движения жидкости и увеличивается давление. Поскольку в этом случае в слоях жидкости у стенок диффузора кинетическая энергия минимальна (мала скорость), то возможна остановка жидкости и интенсивное вихреобразование.

По этой причине потери энергии напора в диффузоре будут зависеть от потерь напора на трение и потерь при расширении: $\Delta h_{\text{диф}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{вр}}$. Следовательно, величина потерь напора определяется выражением (7.19):

$$\xi_{\text{диф}} = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}\right) + k_0 \left(1 - \frac{1}{\frac{S_2}{S_1}}\right) \quad (7.19)$$

где S_1 – площадь живого сечения на входе в диффузор;
 S_2 – площадь живого сечения на выходе из диффузора;
 α – угол конусности диффузора;

$k_0 = 3,2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$ – поправочный коэффициент, зависящий от условий расширения потока в диффузоре.

Внезапное сужение канала. При внезапном сужении канала поток жидкости отрывается от стенок входного участка и лишь затем касается стенок канала меньшего размера. В этой области потока образуются две зоны интенсивного вихреобразования (как в широком участке трубы, так и в узком), в результате чего, как и в предыдущем случае, потери напора складываются из двух составляющих (потерь на трение и при сужении).

Коэффициент потерь напора при гидравлическом сопротивлении внезапного сужения потока можно определить по эмпирической зависимости, предложенной И. Е. Идельчиком (7.20), или принять по данным таблицы 7.1:

$$\xi_{\text{вс}} = 0,5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \quad (7.20)$$

Таблица 7.1 – Установление коэффициента потерь напора при гидравлическом сопротивлении внезапного сужения потока

$\frac{S_2}{S_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80
$\xi_{\text{вс}}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10

Плавное сужение канала. Плавное сужение канала достигается с помощью конического участка, называемого конфузуром. Потери напора в конфузуре образуются практически за счет трения, так как вихреобразование в нем практически отсутствует. Коэффициент потерь напора в конфузуре можно определить по формуле (7.21):

$$\xi_{\text{лонф}} = \frac{\lambda}{8 \sin \alpha} \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) \quad (7.21)$$

При большом угле конусности (превышающем 50 градусов) коэффициент потерь напора можно установить по формуле (7.21) с внесением поправочного коэффициента $k_{пс}$.

Нормальный вход в трубу. Из резервуаров, где хранятся жидкости, вход в выкидной трубопровод осуществляется в так называемом нормальном исполнении, то есть когда осевая линия патрубка трубопровода располагается по нормали к боковой стенке резервуара. Этот вид гидравлических сопротивлений также можно отнести к сопротивлениям, связанным с изменением размеров русла; просто здесь размеры нового русла бесконечно малы по сравнению с размерами исходного русла с сечением резервуара. В этом случае внутри выкидного патрубка вытекающая из резервуара жидкость заполняет все сечение трубы не сразу, а лишь на некотором расстоянии от входа. В этой области в застойной зоне часть жидкости совершает вращательное движение и созданный таким образом вихрь порождает дополнительные гидравлические сопротивления. Коэффициент потерь напора при этом приблизительно составляет половину скоростного напора: $\xi_{вх} = 0,5$.

Выход из трубы в покоящуюся жидкость. Это обычный элемент стыковки напорной части трубопровода с резервуаром. Входной патрубок трубопровода располагается нормально к боковой стенке резервуара. Данный вид гидравлических сопротивлений также можно рассматривать как разновидность внезапного расширения потока жидкости до бесконечно большого сечения. Величина коэффициента потерь напора в большинстве случаев принимается равной одному скоростному напору.

Внезапный поворот канала. Под таким гидравлическим сопротивлением будем понимать место соединения трубопроводов одинакового диаметра, при котором осевые линии трубопроводов не совпадают, то есть составляют между собой некоторый угол α .

Этот угол называется углом поворота русла, так как здесь изменяется направление движения жидкости. Физические основы процесса преобразования кинетической энергии при повороте потока достаточно сложны и следует рассмотреть лишь результат этих процессов.

Так, при прохождении участка внезапного поворота образуется сложная форма потока с двумя зонами вихревого движения жидкости. На практике такие элементы соединения трубопроводов называют коленами. Следует отметить, что колено, как соединительный элемент, является крайне нежелательным ввиду значительных потерь напора в данном виде соединения. Величина коэффициента потерь напора будет, в первую очередь, зависеть от угла поворота русла и может быть определена по эмпирической формуле (7.22) или по данным таблицы 7.2:

$$\xi_{\text{вп}} = 0,95 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2,05 \sin^4 \frac{\alpha}{2} \quad (7.22)$$

Таблица 7.2 – Установление коэффициента потерь напора при гидравлическом сопротивлении внезапного поворота канала

α , град.	30	40	50	60	70	80	90
$\xi_{\text{вп}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10

Плавный поворот канала. Данный вид гидравлических сопротивлений можно считать более благоприятным (экономичным) с точки зрения величины потерь напора, так как в этом случае опасных зон для образования интенсивного вихревого движения жидкости практически нет. Тем не менее, под действием того, что при повороте потока возникают центробежные силы, способствующие отрыву частиц жидкости от стенки трубы, вихревые зоны все же возникают. Кроме того, при этом образуются встречные потоки жидкости, направленные от внутренней к внешней стенке трубы. Коэффициент потерь

7. Гидродинамика

напора определяется по эмпирическим формулам или по таблицам (при угле поворота русла на 90 град. и ($\frac{R}{d} > 1,0$)).

Наличие обширного набора сведений по этим вопросам объясняется тем, что колена в закругленном исполнении весьма широко применяются в строительстве трубопроводов и в различных гидравлических системах.

Задвижки. Задвижки часто используют как средство регулирования характеристик потока жидкости (расход, напор, скорость). При наличии задвижки в трубопроводе поток обтекает находящиеся в трубе плашки задвижки, наличие которых ограничивает живое сечение потока, а также приводит к возникновению вихревых потоков жидкости около плашек задвижки. Коэффициент потерь напора зависит от степени закрытия задвижки (α/d) и определяется по данным таблицы 7.3.

Таблица 7.3 – Установление коэффициента потерь напора в зависимости от степени закрытия задвижки

α/d	полное открытие	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
ξ_z	0,12	0,26	0,81	2,06	5,52	17,00	97,80

Краны. Краны также могут использоваться в качестве средств регулирования параметров потока. В этих случаях коэффициент потерь напора зависит от степени закрытия крана (угла поворота) (табл. 7.4).

Таблица 7.4 – Установление коэффициента потерь напора в зависимости от степени закрытия крана (угла поворота)

α	5	10	20	30	40	50	60	70
$\xi_{кр}$	0,05	0,29	1,56	5,47	17,30	52,60	206	486

Обратные клапаны и фильтры. Коэффициенты потерь напора в данных случаях определяются, как правило, экспериментально.

Потери напора по длине. При установившемся движении реальной жидкости основные параметры потока: величина средней скорости в живом сечении (v) и величина перепада давления (Δp) зависят от физических свойств движущейся жидкости и от размеров пространства, в котором жидкость движется. В целом физические свойства жидкости определяются через размерные величины, называемые физическими параметрами жидкости.

Можно установить взаимосвязь между всеми параметрами, от которых зависит движение жидкости. Условно эту зависимость можно записать как некоторую функцию в неявном виде:

$$f(l_1, l_2, l_3, \Delta, v, \Delta p, \rho, \mu, \sigma, K) = 0$$

При этом l_1, l_2, l_3 – линейные величины, характеризующие трехмерное пространство, Δ – линейная величина, характеризующая состояние стенок канала (шероховатость, величина выступов); v – средняя скорость движения жидкости в живом сечении потока, Δp – разность давления между начальным и конечным живыми сечениями потока (перепад давления); ρ – плотность жидкости; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; σ – поверхностное натяжение жидкости; K – модуль упругости жидкости.

Принимая во внимание зависимость:

$$h_{\text{тр}} = 2f\left(\frac{\Delta}{4R_{\Gamma}}, Fr, Re\right) \frac{l}{4R_{\Gamma}} \frac{v^2}{2g}$$

Обозначим $2f\left(\frac{\Delta}{4R_{\Gamma}}, Fr, Re\right) = \lambda$. Эту величину принято называть *коэффициентом сопротивления трения по длине* или *коэффициентом Дарси*. Для круглых труб, учитывая, что $h_{\text{тр}} = h_{\text{дл}}$, получим выражение (7.23):

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (7.23)$$

Эта формула носит название формулы Дарси-Вейсбаха и является одной из основных формул гидродинамики.

Коэффициент потерь напора по длине будет равен:

$$\xi_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \quad (7.24)$$

Запишем формулу Дарси-Вейсбаха в виде:

$$v = \sqrt{\frac{8gR_{\Gamma} h_{\text{дт}}}{\lambda L}}$$

Величину $i = \frac{h_{\text{дт}}}{L}$ называют **гидравлическим уклоном**.

Величину $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ называют **коэффициентом Шези**.

Таким образом, $v = C\sqrt{Ri}$.

Величина $\sqrt{gRi} = u_o$ имеет размерность скорости и носит название **динамической скорости жидкости**.

Тогда коэффициент трения (коэффициент Дарси) равен: $\lambda = 8 \left(\frac{u_o}{v}\right)^2$.

7.7 Режимы движения жидкости

Экспериментальное изучение движения жидкости. При проведении многочисленных экспериментов с потоками движущейся жидкости было неоднократно подмечено, что на величину гидравлических сопротивлений, кроме физических свойств самой жидкости, формы и размеров каналов, состояния их стенок, существенное влияние оказывают особенности движения частиц жидкости в потоке. Впервые теоретическое обоснование этой зависимости дал английский физик Осборн Рейнольдс. Суть его эксперимента заключалась в следующем.

В емкость достаточно большого объема была вставлена длинная (не менее 20 диаметров) стеклянная трубка. На конце этой трубки устанавливался кран

для регулирования расхода жидкости. Измерение расхода жидкости осуществлялось с помощью мерной емкости, расположенной в конце трубки. Из малого бачка с помощью тонкой изогнутой трубки по центру основной трубки вводилась подкрашенная жидкость. Ее расход также регулировался с помощью крана. Уровень жидкости в основном баке поддерживался постоянным.

Плавно меняя расход жидкости в трубке, Рейнольдс отметил, что при малых скоростях движения жидкости подкрашенная струйка жидкости текла по центру потока, не смешиваясь с остальной жидкостью потока. Однако при определенной скорости подкрашенная струйка жидкости теряла свою устойчивость и, в конечном итоге, частицы окрашенной жидкости перемешивались с остальной жидкостью. При снижении скорости движения жидкости положение восстанавливалось: хаотичное движение частиц жидкости снова становилось упорядоченным.

Рейнольдс менял длину и диаметр трубки, вязкость жидкости, количество подкрашенных струек жидкости. Он установил, что *эффект перемешивания (смена режима течения жидкости) зависит от скорости движения жидкости, ее вязкости и от диаметра трубки; причем при увеличении вязкости жидкости для смены режима течения жидкости требовалась большая скорость*. Отсюда был сделан вывод, что смена режима движения жидкости зависит от целого комплекса параметров потока, а именно определяется следующим соотношением (7.25):

$$R_e = \frac{v_d}{\nu} \quad (7.25)$$

R_e получило название **числа Рейнольдса**. Число Рейнольдса оказалось безразмерной величиной, представлявшей собой отношение сил инерции к силам вязкостного трения. Была установлена и критическая величина числа Рейнольдса, при котором происходила смена режима движения жидкости. Она оказалась равной 2 320.

Режим движения жидкости, при котором наблюдалось ее плавное, слоистое движение, был назван ламинарным (слоистым). Режим движения жидкости, сопровождавшийся хаотическим движением ее частиц в потоке, был назван турбулентным (беспорядочным). Важным оказалось то обстоятельство, что при смене режима движения существенно менялась зависимость величины гидравлических сопротивлений от скорости движения жидкости.

Средняя скорость движения жидкости в ламинарном потоке. Для определения величины средней скорости рассмотрим живое сечение потока жидкости в трубе. Затем проведем в сечении потока две concentрические окружности, отстоящие друг от друга на бесконечно малое расстояние dr . Между этими окружностями мы, таким образом, выделили малую кольцевую зону, малую часть живого сечения потока жидкости. Расход жидкости через выделенную кольцевую зону составит:

$$dQ = u dS = u \cdot 2\pi r \cdot dr$$

Расход жидкости через полное живое сечение трубы равен:

$$Q = \int_0^{r_0} u \cdot 2\pi r \cdot dr = \int_0^{r_0} \rho g \frac{i}{4\mu} (r_0^2 - r^2) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

$$Q = \rho g \frac{i \cdot 2\pi}{4\mu} \int_0^{r_0} (r_0^2 - r^2) \cdot r dr = \rho g \frac{\pi \cdot i}{8\mu} r_0^4$$

Тогда величина средней скорости в сечении определяется с использованием формулы (7.26):

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{\rho g d^2}{32\mu} i \text{ или } v = 0,5u_{\max} \quad (7.26)$$

Потери напора в ламинарном потоке жидкости. Для ламинарного потока жидкости в круглой трубе можно определить коэффициент трения через число Рейнольдса. Вычислим величину гидравлического уклона из средней скорости жидкости:

$$i = \frac{32\rho v}{gd^2} = \frac{8w}{gdR_r};$$

$$\text{отсюда } gR_r i = \frac{8w}{d} = u_o^2;$$

Тогда получим выражение (7.27):

$$\lambda = 8 \left(\frac{u_o}{v} \right)^2 = \frac{64\nu}{v} = \frac{64}{R_e} \quad (7.27)$$

Окончательно потери напора при ламинарном движении жидкости в трубе составят:

$$h_{\text{дт}} = \frac{64}{R_e} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (7.28)$$

Несколько преобразовав формулу (7.28), получим формулу Пуазейля:

$$h_{\text{дт}} = \frac{32 \cdot \nu \cdot l \cdot v}{gd^2} \quad (7.29)$$

7.8 Турбулентное движение жидкости

Структура турбулентного потока. *Отличительной особенностью турбулентного движения жидкости является хаотическое движение частиц в потоке. Однако при этом часто можно наблюдать и некоторую закономерность в таком движении.* С помощью термогидрометра – прибора, позволяющего фиксировать изменение скорости в точке замера, можно снять кривую скорости. Если выбрать интервал времени достаточной продолжительности, то окажется, что колебания скорости наблюдаются около некоторого уровня, и этот уровень сохраняется постоянным при выборе различных интервалов времени. Величина скорости в данной точке в данный момент времени носит название мгновенной скорости.

При неустановившемся турбулентном движении жидкости величины осредненных скоростей меняются во времени.

Пульсация жидкости является причиной перемешивания жидкости в потоке. Интенсивность перемешивания зависит, как известно, от числа Рейнольдса, то есть при сохранении прочих условий от скорости движения жидкости. Таким образом, в конкретном потоке жидкости (вязкость жидкости и размеры сечения определены первичными условиями) характер ее движения зависит от скорости. Для турбулентного потока это имеет решающее значение. Так, в периферийных слоях жидкости скорости всегда будут минимальными, и режим движения в этих слоях естественно будет ламинарным. Увеличение скорости до критического значения приведет к смене режима движения жидкости с ламинарного на турбулентный, то есть в реальном потоке присутствуют оба режима – как ламинарный, так и турбулентный.

Таким образом, *поток жидкости состоит из ламинарной зоны (у стенки канала) и турбулентного ядра течения (в центре) и, поскольку скорость к центру турбулентного потока нарастает интенсивно, толщина периферийного ламинарного слоя чаще всего незначительна.* Естественно, сам слой называется ламинарной пленкой, толщина которой зависит от скорости движения жидкости.

Гидравлически гладкие и шероховатые трубы. Состояние стенок трубы в значительной мере влияет на поведение жидкости в турбулентном потоке. Так, при ламинарном движении жидкость движется медленно и плавно, спокойно обтекая на своем пути незначительные препятствия. Возникающие при этом местные сопротивления настолько ничтожны, что их величиной можно пренебречь.

В турбулентном же потоке такие малые препятствия служат источником вихревого движения жидкости, что приводит к возрастанию этих малых мест-

ных гидравлических сопротивлений, которыми мы в ламинарном потоке пренебрегли. Такими малыми препятствиями на стенке трубы являются ее неровности. Абсолютная величина этих неровностей зависит от качества обработки трубы. В гидравлике данные неровности называются выступами шероховатости и обозначаются литерой Δ .

В зависимости от соотношения толщины ламинарной пленки и величины выступов шероховатости будет меняться характер движения жидкости в потоке. В случае, когда толщина ламинарной пленки велика по сравнению с величиной выступов шероховатости, выступы шероховатости погружены в ламинарную пленку и турбулентному ядру течения они недоступны (их наличие не сказывается на потоке). Такие трубы называются *гидравлически гладкими*. Когда размер выступов шероховатости превышает толщину ламинарной пленки, то она теряет свою сплошность и выступы шероховатости становятся источником многочисленных вихрей, что существенно сказывается на потоке жидкости в целом. Такие трубы называются *гидравлически шероховатыми (или просто шероховатыми)*. Естественно, существует и промежуточный вид шероховатости стенки трубы, когда выступы шероховатости становятся соизмеримыми с толщиной ламинарной пленки ($\delta \approx \Delta$).

Толщину ламинарной пленки можно оценить, исходя из эмпирического уравнения жидкости из одного слоя в другой. Они не мгновенно приобретают скорость нового слоя, а лишь через некоторое время; за это время частицы успеют углубиться в новый слой на некоторое расстояние, называемое длиной пути перемешивания:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{32,5}{2R_e\sqrt{\lambda}} \quad (7.30)$$

Распределение скоростей по сечению турбулентного потока. Наблюдения за величинами осредненных скоростей в турбулентном потоке жидко-

сти показали, что эпюра осредненных скоростей в таком потоке в значительной степени сглажена и практически скорости в разных точках живого сечения равны средней скорости. Сопоставляя эпюры скоростей турбулентного и ламинарного потоков, можно сделать вывод о практически равномерном распределении скоростей в живом сечении.

Работами Прандтля было установлено, что закон изменения касательных напряжений по сечению потока близок к логарифмическому закону:

$$du = \frac{\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}}{x \cdot r} dr \quad (7.31)$$

После интегрирования получим:

$$u = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \ln r + C$$

Последнее выражение преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\bar{u}}{u_o} = \frac{1}{x} \ln \frac{u_o r}{v} + \text{const}$$

Развивая теорию Прандтля, Никурадзе и Рейхардт предложили аналогичную зависимость для круглых труб (7.32):

$$\varphi = \frac{1}{x} \ln [x(\eta - \alpha) + 1] + \alpha \quad (7.32)$$

Потери напора на трение в турбулентном потоке жидкости. При исследовании вопроса об определении коэффициента потерь напора на трение в гидравлически гладких трубах можно прийти к мнению, что этот коэффициент целиком зависит от числа Рейнольдса. Известны эмпирические формулы для определения коэффициента трения. При этом наиболее широкое распространение получила формула Блазиуса (7.33):

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{R_e}} \quad (7.33)$$

По данным многочисленных экспериментов, формула Блазиуса подтверждается в пределах значений числа Рейнольдса от его критического значения до $1 \cdot 10^5$. Другой распространенной эмпирической формулой определения коэффициента Дарси является формула П. К. Копакова (7.34):

$$\lambda = \frac{1}{(1,81 \cdot \lg R_e - 1,5)^2} \quad (7.34)$$

Если $R_e > R_{екв}$, то область сопротивления квадратичная. В данном случае коэффициент гидравлического трения определим по формуле (7.35):

$$\lambda = \frac{8g}{c^2} \quad (7.35)$$

В обратном случае область сопротивления переходная. Коэффициент гидравлического трения определим по формуле А. Д. Альтшуля (7.36):

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{1,46\Delta}{d} + \frac{100}{R_e} \right)^{0,25} \quad (7.36)$$

При изучении движения жидкости по шероховатым трубам в области, где потери напора определяются только шероховатостью стенок труб, $\lambda = f\left(\frac{\Delta}{d}\right)$ и не зависят от скорости движения жидкости, то есть от числа Рейнольдса, экспериментами на моделях с искусственной шероховатостью, проведенных Прандтлем и Никурадзе, установлена зависимость для коэффициента Дарси (для так называемой квадратичной области течения жидкости) (7.37):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3,7d}{\Delta} = -2 \lg 0,27 \frac{\Delta}{d} \quad (7.37)$$

или $\lambda = \left(1,14 + 2 \lg \frac{d}{\Delta} \right)^{-2}$

Для труб с естественной шероховатостью справедлива формула Шифринсона, имеющая следующий вид:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0,25} \quad (7.38)$$

Еще более сложная ситуация связана с изучением движения жидкости в переходной области течения, когда величина потерь напора зависит от обоих факторов: $\lambda = f\left(R_e, \frac{\Delta}{d}\right)$. Здесь наиболее приемлемых результатов добились Кёллебрук-Уайт, предложившие зависимость (7.39):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(-\frac{2,51}{R_e\sqrt{\lambda}} + 0,27\frac{\Delta}{d}\right) \quad (7.39)$$

Несколько отличная формула получена Н. З. Френкелем:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\left(\frac{6,81}{R_e}\right)^{0,9} + 0,27\frac{\Delta}{d}\right) \quad (7.40)$$

Формула Френкеля хорошо согласуется с результатами экспериментов других авторов при отклонении в пределах 2–3 %.

Позднее А. Д. Альтшуль получил наиболее простую и удобную для расчетов формулу (7.41):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{R_e}\right)^{0,25} \quad (7.41)$$

Примеры решения задач

1. *Определите потери напора по длине при движении воды при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ в стальной трубе, диаметром $d = 250$ мм и длиной $l = 2\,500$ м, при расходе воды в ней $Q = 0,1$ м³/с. На сколько необходимо изменить диаметр трубы, чтобы потери уменьшились на 25 %?*

Решение. Потери по длине определяются по формуле:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Для определения скорости воспользуемся уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2$$

В данном случае:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 0,25^2} = 2,04 \text{ м/с}$$

Для определения гидравлического коэффициента λ определим граничные условия: $K_3 = 0,6$ мм (для новых стальных труб); кинематический коэффициент вязкости для воды при температуре 10 °С составляет 0,00000131 м²/с. Определим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}; Re = \frac{2,04 \cdot 0,25}{0,00000101} = 504509;$$

$$Re \cdot \frac{K_3}{d} = 504509 \cdot \frac{0,1}{250} = 201;$$

$$Re \cdot \frac{K_3}{d} = 201 < 500;$$

$$\text{тогда } \lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,1}{250} + \frac{68}{504509} \right)^{0,25} = 0,0167$$

Следовательно, получим:

$$h_1 = 0,0167 \cdot \frac{2500}{0,25} \cdot \frac{2,04^2}{2 \cdot 9,81} = 35,5 \text{ м}$$

Уменьшим потери по длине на 25 %, тогда они составят 26,63 м. Диаметр определим методом подбора, построив график зависимости $h = f(d)$, показанный на рисунке 7.2.

Расчет произведем в табличной форме (табл. 7.5). При h по длине, равной 26,63 м, $d = 0,257$ м. Следовательно, диаметр изменится на 0,007 м.

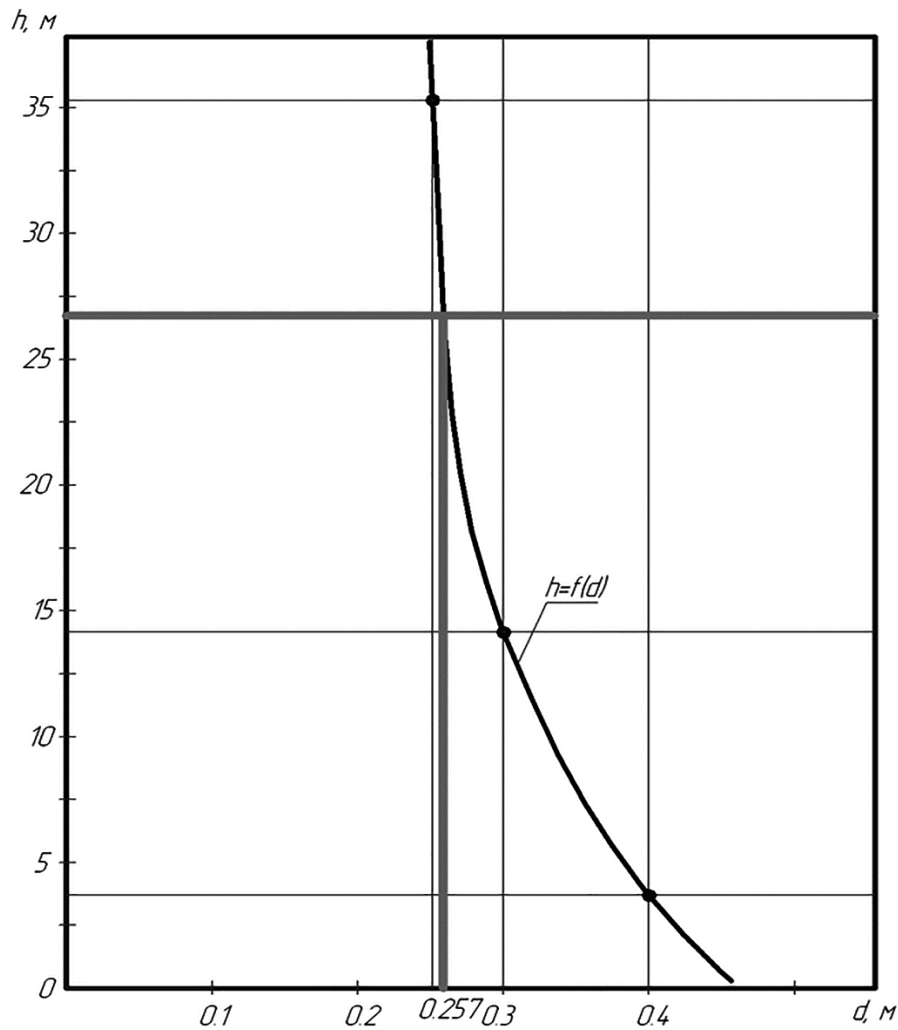


Рисунок 7.2 – График зависимости напора от диаметра

Таблица 7.5 – Результаты расчетов

d , мм	v , м/с	Re	$Re \cdot \frac{K_3}{d}$	λ	h , м
0,3	1,42	420 424	140,0	0,0164	14,06
0,4	0,80	315 318	78,8	0,0161	3,30

2. Найдите потери напора по длине трубопровода, состоящего из последовательно соединенных новых чугунных труб, имеющих следующие параметры: $l_1 = 600$ м, $d_1 = 125$ мм, $l_2 = 800$ м, $d_2 = 150$ мм. Расход воды ($t = 30$ °C) равен $Q = 0,04$ м³/с.

Решение. Потери по длине определяются по формуле:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Для определения скорости воспользуемся уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2$$

В данном случае:

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 0,125^2} = 3,26 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 0,15^2} = 2,27 \text{ м/с}$$

Для определения гидравлического коэффициента λ определим граничные условия: $K_3 = 0,4$ мм (для новых чугунных труб); кинематический коэффициент вязкости для воды при температуре 30°C составляет $0,000000803 \text{ м}^2/\text{с}$.

Определим число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}; R_{e1} = \frac{3,26 \cdot 0,125}{0,000000803} = 507471,98;$$

$$R_{e2} = \frac{2,27 \cdot 0,15}{0,000000803} = 424034,869;$$

$$R_{e1} \cdot \frac{K_3}{d_1} = 507472 \cdot \frac{0,4}{125} = 1624; R_{e2} \cdot \frac{K_3}{d_2} = 424035 \cdot \frac{0,4}{150} = 1130,8;$$

$$R_{e1} \cdot \frac{K_3}{d_1} = 1624 > 500; R_{e2} \cdot \frac{K_3}{d_2} = 1130,8 > 500;$$

$$\text{тогда } \lambda_1 = 0,11 \cdot \left(\frac{K_3}{d_1}\right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,4}{125}\right)^{0,25} = 0,026;$$

$$\lambda_2 = 0,11 \cdot \left(\frac{K_3}{d_2}\right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,4}{150}\right)^{0,25} = 0,025$$

Следовательно, получим:

$$h_1 = 0,026 \cdot \frac{600}{0,125} \cdot \frac{3,26^2}{2 \cdot 9,81} = 67,6 \text{ м}; h_2 = 0,025 \cdot \frac{800}{0,150} \cdot \frac{2,27^2}{2 \cdot 9,81} = 35,0 \text{ м}$$

$$\sum h = h_1 + h_2 = 67,6 + 35,0 = 102,62 \text{ м}$$

3. Определите диаметр железобетонного дюкера, проложенного под проезжей частью дороги для пропуска воды ($t = 20^\circ\text{C}$) с расходом $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$, если его длина $l = 100 \text{ м}$. Перепад уровней воды в проводящем и отводящем каналах $H = 1,5 \text{ м}$ (рис. 7.3). На дюкере имеются два колена с углом поворота $\alpha = 120^\circ$ и решетка на выходе. Найдите пропускную способность дюкера при том же расходе, если перепад уровней станет $H = 1,0 \text{ м}$.

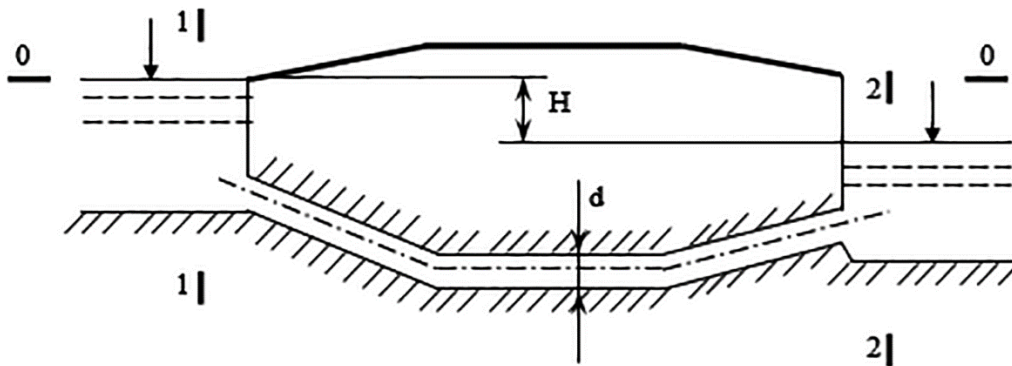


Рисунок 7.3 – Данные для решения задачи 3

Решение. Составляем уравнение Бернулли для двух живых сечений 1–1 и 2–2 относительно горизонтальной плоскости сравнения 0–0:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h;$$

$$z_1 - z_2 = H; \frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma}; \frac{\alpha v_2^2}{2g} = \frac{\alpha v_1^2}{2g} \Rightarrow 0$$

Тогда уравнение Бернулли примет вид:

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot \left(\zeta_{\text{вх}} + 2\zeta_{\text{пов}} + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right)$$

В уравнении $\zeta_{\text{вх}} = 3,0$; $\zeta_{\text{пов}} = 0,5$, при $\alpha = 120^\circ$.

В этом уравнении функцией диаметра является скорость и коэффициент гидравлического трения, зависящий при данной шероховатости от режима движения и области сопротивления.

Задача решается методом подбора. Задаем диаметр и расчет ведем до тех пор, пока вычисленный по уравнению напор не будет равен заданному значению (1,5 м).

Для труб железобетонных коэффициент шероховатости $n = 0,012$; высота выступов шероховатости $\Delta = 1$ мм; для воды при температуре 20 °С кинематический коэффициент вязкости составляет $0,0000101$ м²/с. Скорость определим, воспользовавшись уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2;$$

$$\text{тогда } v_1 = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d^2}$$

Площадь поперечного сечения равна:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$$

Определим режим движения:

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}; R_{e_{кв}} = 21,6 \cdot c \cdot \frac{d}{\Delta}$$

При этом $c = 1/n \cdot R^{1/6}$ – коэффициент Шези; $R = d/4$ – гидравлический радиус.

Если $R_e > R_{e_{кв}}$, то область сопротивления квадратичная. В данном случае коэффициент гидравлического трения определим по формуле:

$$\lambda = \frac{8g}{c^2}$$

Если $R_e < R_{e_{кв}}$, то область сопротивления переходная; коэффициент гидравлического трения определим по формуле А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{1,46\Delta}{d} + \frac{100}{R_e} \right)^{0,25}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot \left(\zeta_{вх} + 2\zeta_{пов} + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right); 1,5 = \frac{v^2}{2g} \cdot \left(4 + \lambda \cdot \frac{100}{d} \right)$$

7. Гидродинамика

Расчет сведем в таблицу 7.6. Построим график зависимости $H = f(d)$, откуда находим значение d , равное 1,46 мм.

Таблица 7.6 – Результаты расчетов

d , м	ω , м ²	v , м/с	Re	c , м ^{0,5} /с	$R_{екв}$	Область сопротивления	λ	H , м
1,0	0,785	5,10	5 045 091	66,14	1 428 661	квадратичная	0,0180	7,68
1,2	1,130	3,53	4 204 242	68,18	1 767 288	квадратичная	0,0170	3,50
1,4	1,540	2,60	3 603 636	67,00	2 026 080	квадратичная	0,0175	1,80
1,6	2,000	1,99	3 153 182	71,53	2 472 133	квадратичная	0,0150	1,02

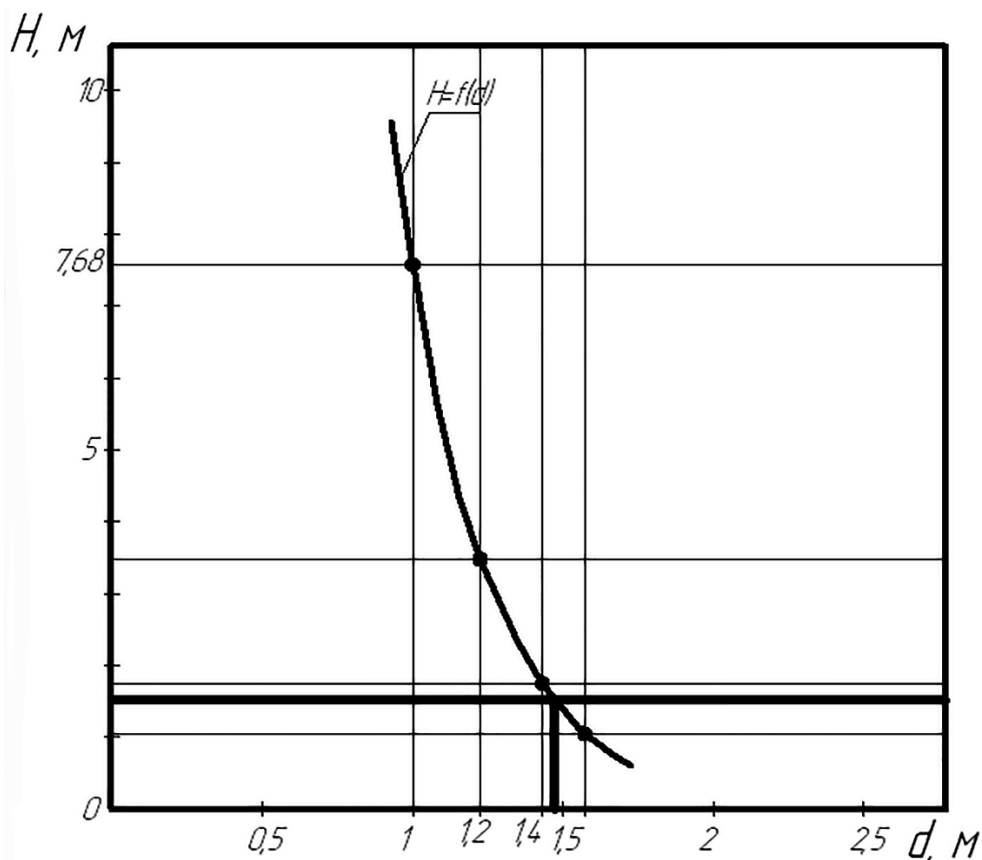


Рисунок 7.4 – График зависимости напора от диаметра

4. Вода при температуре $t = 10$ °C и $Q = 0,12$ л/с вытекает по трубе из резервуара в атмосферу (рис. 7.5). Определите диаметр трубы в случае перехода ламинарного режима движения в турбулентный. Вычислите напор H , который необходим для движения воды ($t = 40$ °C) в трубе полученного диаметра с Re , равным $1,3 \cdot 10^5$. Гидравлическими потерями пренебречь.

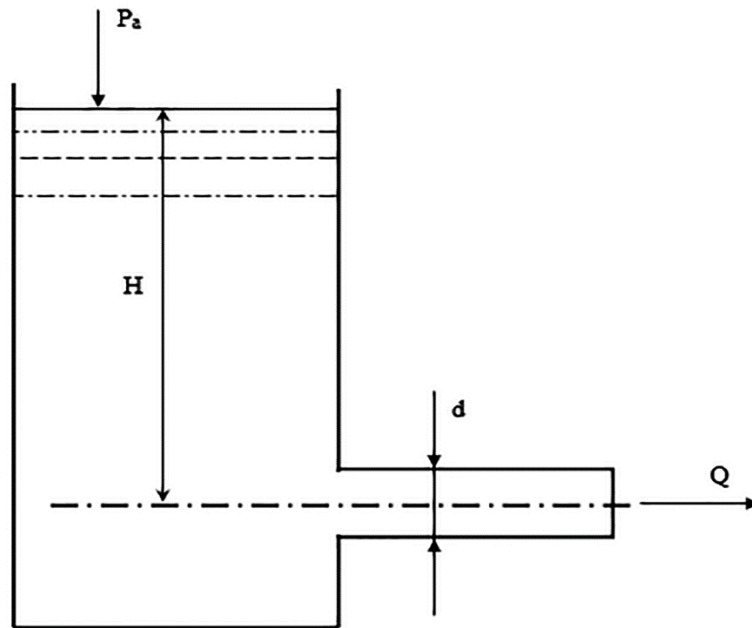


Рисунок 7.5 – Данные для решения задачи 4

Решение. Составляем уравнение Бернулли для двух живых сечений: 1–1 по уровню воды в баке и 2–2 на выходе из трубы, относительно горизонтальной плоскости сравнения 0–0 по центру сечения трубы:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h;$$

$$z_1 = H; z_2 = 0; \frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma}; \frac{\alpha v_1^2}{2g} \Rightarrow 0$$

Тогда уравнение Бернулли примет вид:

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} \right)$$

При переходе от ламинарного к турбулентному режиму движения число Рейнольдса будет равно 2 320, кинематический коэффициент вязкости составит $\nu = 0,00000131 \text{ м}^2/\text{с}$ для воды с температурой 10 °С.

Скорость определим, воспользовавшись уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2$$

Площадь поперечного сечения равна:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$$

Определим режим движения:

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d^2 \cdot \nu} = \frac{4 \cdot Q}{\nu \cdot 3,14 \cdot d}$$

$$d = \frac{4 \cdot Q}{R_e \cdot 3,14 \cdot \nu}; d = \frac{4 \cdot 0,00012}{2320 \cdot 3,14 \cdot 0,00000131} = 0,0503 \text{ м}$$

При движении воды с температурой 40 °С, кинематический коэффициент вязкости равен $\nu = 0,000000659 \text{ м}^2/\text{с}$; $R_e = 130000$. Определим область сопротивления:

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}; v = \frac{R_e \cdot \nu}{d} = \frac{130000 \cdot 0,000000659}{0,0503} = 1,703 \text{ м/с}$$

Поскольку гидравлическими потерями пренебрегаем, получаем следующую величину напора:

$$H = \frac{v^2}{2g} = \frac{1,703^2}{2 \cdot 9,81} = 0,148 \text{ м}$$

5. Вода при температуре 10 °С из водоема при помощи сифонного бетонного трубопровода диаметром $d = 350 \text{ мм}$, длиной $l_1 = 25 \text{ м}$ и $l_2 = 145 \text{ м}$ сбрасывается в отводящий канал. Высота расположения наивысшей точки сечения сифона над уровнем воды в водоеме $h = 3,4 \text{ м}$; на входе в трубопровод установлена сетка; по длине сифона имеются два колена с $\alpha = 100 \text{ град.}$ и задвижка (рис. 7.6). Определите, какой должна быть разность уровней в водоеме и канале H , чтобы обеспечить расход $Q = 0,24 \text{ м}^3/\text{с}$? Вычислите абсолютное давление в наивысшей точке сифона.

Решение. Составляем уравнение Бернулли для двух живых сечений: 1–1 и 2–2 относительно горизонтальной плоскости сравнения 0–0:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h;$$

$$z_1 = H; z_2 = 0; \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma}; \frac{\alpha v_2^2}{2g} = \frac{\alpha v_1^2}{2g} \Rightarrow 0$$

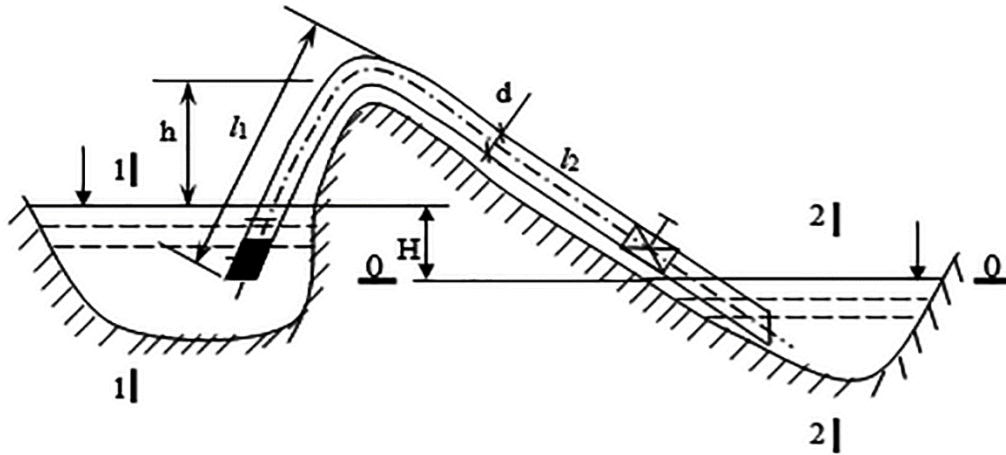


Рисунок 7.6 – Данные для решения задачи 5

Тогда уравнение Бернулли примет вид:

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot (\zeta_{\text{сет}} + 2\zeta_{\text{кол}} + \zeta_{\text{зад}} + \zeta_{\text{вых}} + \lambda \cdot \frac{l}{d})$$

В приведенном уравнении:

$$\zeta_{\text{сет}} = 3,0; \zeta_{\text{кол}} = 0,9 \text{ при } \alpha = 100^\circ; \zeta_{\text{зад}} = 0,15; \zeta_{\text{вых}} = 1,0$$

Эквивалентная шероховатость равна 1,3 мм; $\nu = 0,00000131 \text{ м}^2/\text{с}$ для воды при температуре 10 °С.

Скорость определим, воспользовавшись уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2$$

тогда $v_1 = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,24}{3,14 \cdot 0,35^2} = 2,5 \text{ м/с}$

Площадь поперечного сечения равна:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$$

Определим режим движения:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 0,35}{0,00000131} = 666810;$$

$$Re \cdot \frac{K_3}{d} = 666810 \cdot \frac{1,3}{350} = 2476,7 > 500;$$

$$\text{тогда } \lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_3}{d}\right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{1,3}{350}\right)^{0,25} = 0,033;$$

$$H = \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} \cdot \left(3,0 + 2 \cdot 0,9 + 0,15 + 1,0 + 0,033 \cdot \frac{170}{0,35}\right) = 7,0 \text{ м}$$

Определим вакуум в наивысшей точке сифона, для чего составим уравнение Бернулли относительно сечения 1–1 (по уровню воды в верхнем бьефе); а также сечению 2–2 (по наивысшей точке сифона), относительно горизонтальной плоскости сравнения 0–0 (по уровню воды):

$$z_1 = 0; z_2 = h; \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma}; \frac{\alpha v_1^2}{2g} \Rightarrow 0$$

Уравнение Бернулли примет вид:

$$\frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + h + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h;$$

$$\frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + h + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} =$$

$$= h + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \left(h + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \left(\alpha + \zeta_{\text{сет}} + \zeta_{\text{кол}} + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right) \right) = \sum h;$$

$$3,4 + \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} \cdot \left(1,05 + 3 + 0,9 + 0,033 \cdot \frac{25}{0,35} \right) = 5,73 \text{ м};$$

$$\frac{P_{\text{атм}}}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_{\text{вак}}}{\gamma}; P_{\text{вак}} = 9,81 \cdot 5,73 = 56,2 \text{ кПа}$$

8 ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

8.1 Классификация отверстий и их практическое применение

Вопрос истечения жидкости через отверстия является одним из узловых моментов гидравлики. Ученые и инженеры изучали его, начиная с XVII в. Уравнение Д. Бернулли впервые было выведено при решении одной из задач на истечение жидкости из отверстия. При расчетах диафрагм, дырчатых смесителей; наполнении и опорожнении резервуаров, бассейнов, водохранилищ, шлюзовых камер и других емкостей решаются задачи на истечение жидкостей через отверстия. При решении таких задач определяют скорости и расходы жидкостей.

Экспериментально установлено, что при истечении жидкости из отверстий происходит сжатие струи, то есть уменьшение ее поперечного сечения. Форма сжатой струи зависит от формы и размеров отверстия, толщины стенок, а также от расположения отверстия относительно свободной поверхности; стенок и дна сосуда, из которого вытекает жидкость. Сжатие струи происходит вследствие того, что частицы жидкости подходят к отверстию с разных сторон и по инерции движутся в отверстии по сходящимся траекториям.

Параллельное течение струй в отверстии возможно только в том случае, когда толщина стенок сосуда близка к размерам отверстия, а стенки отверстия имеют плавные очертания, с расширением внутрь сосуда. При этом отверстие превращается в коноидальный осадок.

Отверстия классифицируют следующим образом:

1. По размеру:

1) *малые отверстия*, при условиях $d < \frac{1}{10} \cdot H(z)$ или $a < \frac{1}{10} H(z)$, где d – диаметр круглого отверстия; H – напор; z – разность напоров при затопленном отверстии;

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

2) *большие отверстия*, при условиях $d > \frac{1}{10} \cdot H(z)$ или $a > \frac{1}{10} H(z)$.

2. **По толщине стенки, в которой сделано отверстие:**

1) *отверстия в тонкой стенке*, при условиях $t < 3d$ или $t < 3a$, где t – толщина стенки;

2) *отверстия в толстой стенке*, при условиях $t > 3d$ или $t > 3a$.

3. **По форме различают круглые, квадратные, прямоугольные, треугольные и другие отверстия.**

8.2 Истечение жидкости через отверстия в тонкой стенке при постоянном уровне

Выведем формулы скорости и расхода жидкости при истечении через малое отверстие. Пусть жидкость вытекает из большого резервуара через малое отверстие в его дне или стенке (рис. 8.1).

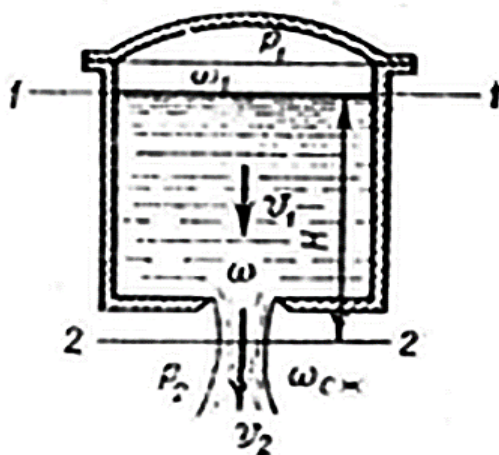


Рисунок 8.1 – Истечение при постоянном напоре

Опытами установлено, что сжатое сечение струи находится от внутренней поверхности резервуара на расстоянии около половины диаметра отверстия. Эта величина обычно бывает мала сравнительно с напором H в резервуаре, и можно считать, что центр отверстия и центр сжатого сечения струи находятся на одинаковой высоте, тем более при отверстии в боковой стенке.

Высоту уровня жидкости в резервуаре H над центром отверстия называют **напором**. В общем случае давление p_1 в резервуаре отличается от давления p_2 геометрическим напором в пространстве, куда истекает жидкость.

Проведем плоскость сравнения 2–2 через центр сжатого сечения струи. Уравнение Д. Бернулли применить к сечению отверстия нельзя, так как струйки в последнем сходятся под большими углами, и движение жидкости в нем не плавно изменяющееся.

Запишем уравнение Д. Бернулли для сечений 1–1 и 2–2:

$$H + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \zeta_{\text{отв}} \frac{v_2^2}{2g} \quad (8.1)$$

где v_1 – скорость подхода жидкости к отверстию в резервуаре;

v_2 – средняя скорость течения в сжатом сечении;

$\zeta_{\text{отв}}$ – коэффициент местного сопротивления при истечении через отверстие.

Перенесем наружное давление p_2 в левую часть и обозначим соответствующую величину в выражении (8.2):

$$H + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = H_0 \quad (8.2)$$

Данная величина называется **напором истечения**.

В правой части уравнения (8.1) вынесем за скобки v_2 . В результате, уравнение Д. Бернулли сведется к следующему выражению:

$$H_0 = \frac{v_2^2}{2g} (\alpha_2 + \zeta_{\text{отв}});$$
$$\text{откуда } v = \sqrt{\frac{2gH_0}{\alpha_2 + \zeta_{\text{отв}}}}$$

Обозначим величину (φ) в выражении (8.3):

$$\frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \zeta_{\text{отв}}}} \varphi \quad (8.3)$$

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

Ее называют **коэффициентом скорости**. С учетом введенного обозначения получим формулу (8.4):

$$v_2 = \varphi \sqrt{2gH_0} \quad (8.4)$$

Так как коэффициент Кориолиса $\alpha_2 \geq 1$, а коэффициент местных потерь напора в отверстии $\zeta_{\text{отв}} > 0$, то $\varphi < 1$.

По опытным данным $\varphi = 0,97 - 0,98$, а $\alpha_2 \cong 1$. Отсюда:

$$\zeta_{\text{отв}} = \frac{1}{\varphi^2} - 1 = \frac{1}{0,97^2} - 1 = 0,06$$

Для идеальной жидкости $\zeta_{\text{отв}} = 0$ и $\varphi = 1$. Тогда получаем:

$$v_2 = \sqrt{2gH_0} \quad (8.5)$$

Это уравнение называется *формулой Торричелли*. Оно показывает, что скорость в начале вытекающей струи равна скорости свободного падения тела, упавшего с высоты H_0 .

Когда поперечное сечение резервуара много больше площади живого сечения отверстия, а скорость жидкости в резервуаре незначительна (к примеру, меньше 0,1 м/с), то скоростным напором $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ можно пренебречь. В случае, когда давления снаружи и в резервуаре одинаковы $p_1 = p_2$, то весь напор истечения сводится к геометрическому напору, то есть $H_0 = H$. Это обычно встречается при расчете истечения из открытых резервуаров в атмосферу.

Расход жидкости определится как произведение скорости истечения на площадь сжатого сечения струи (8.6):

$$Q = v_2 \omega_{\text{сж}} = \varphi \varepsilon \omega \sqrt{2gH_0} \quad (8.6)$$

где $\varepsilon = \omega_{\text{сж}}/\omega$ – коэффициент сжатия струи, равный отношению площади сжатого сечения ($\omega_{\text{сж}}$) к площади отверстия (ω).

Величину $\varphi \varepsilon$ обозначают через μ и называют **коэффициентом расхода**.

Таким образом, расход жидкости, вытекающей через отверстие, определяют по формуле (8.7):

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0} \quad (8.7)$$

При точных измерениях размеров сжатого сечения струи установлено, что при совершенном сжатии струи $\varepsilon = 0,62 - 0,64$. В данном случае коэффициент расхода $\mu = 0,60 - 0,62$. В общем же случае коэффициент $\mu = \varphi\varepsilon$ зависит от условий сжатия.

При истечении не в газовую среду, а в смежный резервуар с той же жидкостью (что принято называть истечением «под уровень»), то есть когда отверстие затоплено с обеих сторон, в качестве геометрического напора H принимают разность уровней жидкости в резервуарах. Числовые значения коэффициентов φ , ε и μ остаются при этом практически теми же.

В случае круглого отверстия, расположенного на значительном расстоянии от стенок, струя сжимается со всех сторон одинаково, и в сжатом сечении имеет также форму круга. При этом сжатое сечение находится от кромок отверстия на расстоянии около половины диаметра отверстия ($0,5d$).

Величина коэффициента сжатия зависит от относительных размеров отверстия и от положения его относительно стенок резервуара и поверхности жидкости. В зависимости от расположения отверстия различают следующие виды сжатия:

- 1) полное сжатие со всех сторон;
 - 2) неполное, когда сжатия нет с одной или нескольких сторон;
- Полное сжатие подразделяют на совершенное и несовершенное.*

Форма сечения струи жидкости при истечении претерпевает изменения. Эти изменения называются **инверсией**. Инверсия происходит вследствие того, что скорости подхода к отверстию в разных точках его периметра различны и

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

вследствие сил поверхностного натяжения. При несовершенном сжатии коэффициент расхода μ_1 вычисляют по формуле (8.8) для круглых отверстий и формуле (8.9) для прямоугольных отверстий:

$$\mu_1 = \mu(1 + \delta), \quad (8.8)$$

$$\mu_1 = \mu(1 + \delta_1) \quad (8.9)$$

где μ – значение коэффициента расхода при совершенном сжатии;

δ и δ_1 – поправочные коэффициенты, зависящие от отношения площади сечения отверстий ω к площади сечения сосуда ω_1 .

При неполном сжатии коэффициент расхода вычисляют по уравнению (8.10) для круглых отверстий и уравнению (8.11) для прямоугольных отверстий:

$$\mu_1 = \mu(1 + 0,152 \cdot P_1/P), \quad (8.10)$$

$$\mu_1 = \mu(1 + 0,128 \cdot P_1/P) \quad (8.11)$$

где μ – коэффициент расхода при полном сжатии;

P_1 – часть периметра, на котором нет сжатия;

P – полный периметр отверстия.

При расчете больших отверстий значения коэффициентов расхода, рекомендованных Н. Н. Павловским, приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Значения коэффициентов расхода для больших отверстий

Виды отверстий и характер сжатия струи	Коэффициент расхода μ
Большие отверстия с несовершенным, но всесторонним сжатием	0,70
Большие отверстия с умеренным боковым сжатием, без сжатия по дну	0,80
Средние отверстия (шириной до 2 м) с весьма слабым боковым сжатием, без сжатия по дну	0,90
Большие отверстия (шириной 5–6 м) с весьма слабым боковым сжатием, без сжатия по дну	0,95

8.3 Истечение жидкости через отверстия в тонкой стенке при переменном уровне

Истечение жидкости при переменном уровне встречается при опорожнении и наполнении резервуаров, цистерн, шлюзовых камер, бассейнов и других

емкостей. Обычно в этом случае необходимо определить время опорожнения или наполнения емкости.

Рассмотрим случай опорожнения резервуара через донное отверстие в атмосферу (рис. 8.2). Пусть резервуар призматического сечения и имеет площадь Ω . Очевидно, движение жидкости будет неустановившимся, так как уровень с течением времени опускается, что вызывает постоянное уменьшение расхода. Выберем какой-то момент времени, в который уровень жидкости в резервуаре равен y . За бесконечно малый промежуток времени dt уровень жидкости уменьшится на величину dy (за этот промежуток времени движение можно считать установившимся).

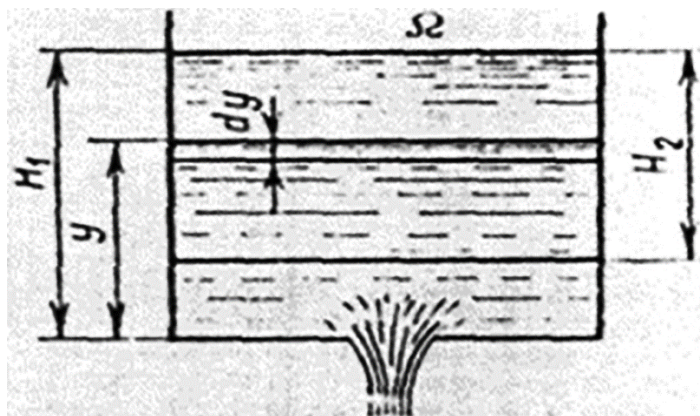


Рисунок 8.2 – Опорожнение резервуара через донное отверстие в атмосферу

За соответствующее время вытечет объем жидкости, равный:

$$dW = Qdt, \quad (8.12)$$

$$\text{или } dW = \mu\omega\sqrt{2gy}dt \quad (8.13)$$

Выражая тот же объем жидкости через размеры резервуара, имеем:

$$dW = -\Omega dy \quad (8.14)$$

Знак минус поставлен потому, что dy величина отрицательная (снижение уровня), а объем должен быть величиной положительной.

Приравнивая правые части уравнений (8.13) и (8.14), получим:

$$-\Omega dy = \mu\omega\sqrt{2gy}dt$$

Откуда имеет место выражение (8.15):

$$dt = -\frac{\Omega dy}{\mu\omega\sqrt{2gy}} \quad (8.15)$$

Интегрируя полученное выражение, найдем *время истечения*:

$$t = \int_{H_1}^{H_2} -\frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \frac{dy}{\sqrt{y}} \quad (8.16)$$

Вынося постоянные величины выражения (8.16) за знак интеграла, имеем:

$$t = -\frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dy}{\sqrt{y}};$$

$$t = -\frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \frac{H_2}{H_1} 2\sqrt{y} = -\frac{2\Omega(\sqrt{H_2} - \sqrt{H_1})}{\mu\omega\sqrt{2g}}$$

Итак, *время понижения уровня от H_1 до H_2* составит:

$$t = \frac{2\Omega(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (8.17)$$

Время полного опорожнения ($H_2 = 0$) определяется выражением (8.18):

$$t = \frac{2\Omega(\sqrt{H_1})}{\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (8.18)$$

Рассмотрим случай истечения под уровень (рис. 8.3). Пусть разность уравнений жидкости в резервуарах соответствует y , площади поперечного сечения резервуаров соответственно Ω_1 и Ω_2 . Определим время выравнивания уровней при истечении жидкости через отверстие в тонкой стенке.

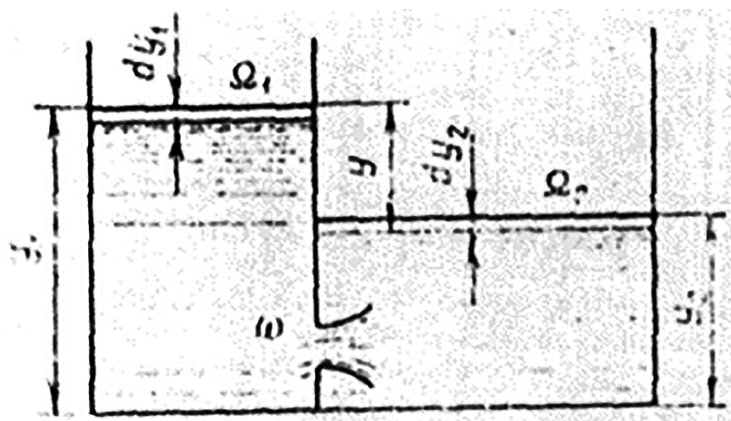


Рисунок 8.3 – Пример случая истечения под уровень

За бесконечно малый промежуток времени из первого резервуара вытечет объем жидкости $dW = -\Omega_1 \cdot dy_1$. Во втором резервуаре прибудет тот же объем, равный $dW = \Omega_2 \cdot dy_2$. В то же время $dW = \mu\omega\sqrt{2gy}dt$.

Из чертежа имеем $y = y_1 - y_2$ или $dy = dy_1 - dy_2$. Но $-\Omega_1 dy_1 = \Omega_2 dy_2$, откуда $dy_2 = -\frac{\Omega_1}{\Omega_2} dy_1$.

Подставим полученное таким образом значение dy_2 :

$$dy = dy_1 - dy_2;$$

$$dy = dy_1 - \left(-\frac{\Omega_1}{\Omega_2} dy_1\right) = dy_1 \left(1 + \frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) = dy_1 \left(\frac{\Omega_1 + \Omega_2}{\Omega_2}\right)$$

имеем $dy_1 = dy \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2}\right)$

Подставим полученное значение dy_1 :

$$dW = -\Omega_1 \cdot dy_1;$$

$$dW = -\frac{\Omega_1 \Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2} dy$$

Приравняем правые части полученного уравнения и $dW = \mu\omega\sqrt{2gy}dt$:

$$-\frac{\Omega_1 \Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2} dy = \mu\omega\sqrt{2gy}dt$$

Разделим переменные и интегрируем:

$$\int_0^t dt = -\frac{2\Omega_1\Omega_2}{(\Omega_1 + \Omega_2)\mu\omega\sqrt{2g}} \cdot \int_z^0 \frac{dy}{\sqrt{y}}$$

Таким образом, получим формулу времени выравнивания уровней:

$$t = -\frac{2\Omega_1\Omega_2\sqrt{y}}{(\Omega_1 + \Omega_2)\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (8.19)$$

В частном случае при $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$, формула (8.19) принимает вид:

$$t = \frac{\Omega\sqrt{y}}{\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (8.20)$$

8.4 Виды насадков и их применение.

Истечение жидкости через насадки

Насадкой называется отрезок трубы, длина которого в несколько раз больше внутреннего диаметра.

Рассмотрим случай, когда к отверстию в стенке резервуара присоединен насадок диаметром d , равным диаметру отверстия.

Наиболее распространенные **виды насадок**, применяемые на практике: *цилиндрический внешний; цилиндрический внутренний; конический расходящийся; конический сходящийся; коноидально-расходящийся; коноидальный.*

Цилиндрические насадки встречаются в виде деталей гидравлических систем машин и сооружений. Конические сходящиеся и коноидальные насадки применяют для увеличения скорости и дальности полета струи воды (пожарные брандспойты, стволы гидромониторов, форсунки, сопла и др.).

Конические расходящиеся насадки применяют для уменьшения скорости и увеличения расхода жидкости и давления на выходе во всасывающих трубах турбин и др.

В эжекторах и инжекторах также имеются конические насадки, как основной рабочий орган. Водопропускные трубы под насыпями дорог (с точки зрения гидравлики) также представляют собой насадки.

Рассмотрим истечение через внешний цилиндрический насадок. Струя жидкости при входе в насадок сжимается, а потом расширяется и заполняет все сечение. Из насадка струя вытекает полным сечением, поэтому коэффициент сжатия, отнесенный к выходному сечению, равен единице, а коэффициент расхода определяется следующим образом:

$$\mu = \varepsilon\varphi = \varphi$$

Составим уравнение Д. Бернулли для сечений 1–1 и 2–2:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_{1-2}$$

В данном уравнении h_{1-2} – потери напора.

Для истечения из открытого резервуара в атмосферу (аналогично истечению через отверстие) уравнение Д. Бернулли приводится к выражению (8.21):

$$H = \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (8.21)$$

Потери напора в насадке складываются из потерь на входе и на расширении сжатой струи внутри насадка (незначительными потерями в резервуаре и потерями по длине насадка можно пренебречь). Таким образом, получаем:

$$h_{1-2} = \zeta \frac{v_{сж}^2}{2g} + \frac{(v_{сж} - v_2)^2}{2g} \quad (8.22)$$

По уравнению неразрывности можем записать:

$$v_{сж}\omega_{сж} = v_2\omega_2$$

Следовательно, получим выражение (8.23):

$$v_{сж} = (\omega_2/\omega_{сж})v_2 = v_2/\varepsilon \quad (8.23)$$

Подставляя значение $v_{сж}$ в уравнение (8.23), имеем:

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

$$h_{1-2} = \zeta \frac{v_2^2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \frac{v_2^2}{2g} \left(\frac{\zeta}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon^2} - \frac{2}{\varepsilon} + 1 \right) = \zeta_c \frac{v_2^2}{2g} \quad (8.24)$$

В выражении (8.24) выделим обозначение:

$$\zeta_c = \frac{\zeta}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon^2} - \frac{2}{\varepsilon} + 1 \quad (8.25)$$

Полученное значение потерь напора подставим в уравнение (8.25):

$$H = \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_c \frac{v_2^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} (1 + \zeta_c)$$

Следовательно, скорость истечения составит:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}} \sqrt{2gH} \quad (8.26)$$

Вводим обозначение:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}} = \varphi_H$$

Таким образом, получим уравнение (8.27) для скорости:

$$v_2 = \varphi_H \sqrt{2gH} \quad (8.27)$$

Определим расход жидкости:

$$Q = v_2 \omega_2 = \varphi_H \omega_2 \sqrt{2gH}$$

Но для насадка $\mu_H = \varphi_H$ и расход жидкости находится по формуле (8.28):

$$Q = \mu_H \omega_H \sqrt{2gH} \quad (8.28)$$

где μ_H – коэффициент расхода насадка;

ω_H – площадь живого сечения насадка.

Таким образом, уравнения для определения скорости и расхода жидкости через насадок имеют тот же вид, что и для отверстия, но другие значения коэффициентов. Для коэффициента сжатия струи (при больших значениях Re и $\zeta \approx 0$) можно приближенно принять $\varepsilon = 0,64$, тогда $\mu = \varphi_H = 0,84$.

Фактически происходят и потери по длине, поэтому для истечения воды в обычных условиях можно принимать $\mu = \varphi_H = 0,82$.

Сравнивая коэффициенты расхода и скорости для насадка и отверстия в тонкой стенке, устанавливаем, что насадок увеличивает расход и уменьшает скорость истечения.

Характерной особенностью насадка является то, что давление в сжатом сечении меньше атмосферного. Это положение доказывается уравнением Бернулли, составленным для сжатого и выходного сечений.

Во внутренних цилиндрических насадках сжатие струи на входе больше, чем у внешних, поэтому значения коэффициентов расхода и скорости меньше. Опытами найдены коэффициенты для воды $\mu = \varphi = 0,71$.

В наружных конических сходящихся насадках сжатие и расширение струи на входе меньше, чем в наружных цилиндрических, но появляется внешнее сжатие на выходе из насадки. Поэтому коэффициенты ζ , φ и μ зависят от угла конусности. С увеличением угла конусности до 13 град. коэффициент расхода μ растет, а с дальнейшим увеличением угла – уменьшается.

Конические сходящиеся насадки применяют в тех случаях, когда нужно получить большую выходную скорость струи, дальность полета и силу удара струи (гидромониторы, пожарные стволы и т. д.).

В конических расходящихся насадках внутреннее расширение струи после сжатия больше, чем в конических сходящихся и цилиндрических, поэтому потери напора здесь возрастают и коэффициент скорости φ уменьшается. Внешнего сжатия при выходе нет.

Коэффициенты φ и μ зависят от угла конусности. При угле конусности $\beta < 8^\circ$ значения коэффициентов можно принимать равными 0,45; при $\beta = 12^\circ$ (предельный угол) – 0,26. При $\beta > 12^\circ$ струя вытекает, не касаясь стенок насадка, то есть как из отверстия без насадка.

8.5 Значения коэффициентов ε , φ и μ для насадков

Значения коэффициентов ε , φ и μ для насадков отражены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Значения коэффициентов ε , φ и μ для насадков

Тип насадков	ε	φ	μ
Наружный цилиндрический	1	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический	1	0,71	0,71
Конический сходящийся при $\beta = 13^{\circ}24'$	0,982	0,963	0,946
Конический расходящийся при $\beta = 8^{\circ}$	1	0,45	0,45
Коноидальный	1	0,98	0,98
Примечание: для конических насадков коэффициенты даны для выходного сечения.			

Конические расходящиеся насадки применяют в тех случаях, когда необходимо уменьшить скорость истечения (например, насадки для подачи смазочных масел). В конических расходящихся насадках в месте сжатия струи создается большой вакуум, поэтому их еще применяют там, где требуется создать большой эффект всасывания (эжекторы, инжекторы и т. д.).

Коноидальные насадки имеют очертания формы струи, вытекающей через отверстие в тонкой стенке. Для этих насадков значение коэффициентов составляет: $\varphi = \mu = 0,97 - 0,995$. Их применяют в пожарных брандспойтах, но редко, так как изготовление является очень сложным.

Для коноидально-расходящейся насадки можно получить коэффициент расхода больше единицы за счет увеличения выходного сечения.

Примеры решения задач

1. Вода при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ из резервуара А подается в резервуар В по короткому трубопроводу, состоящему из двух участков длиной $l_1 = 9$ м, $l_2 = 12$ м и диаметрами $d_1 = 0,008$ м и $d_2 = 0,015$ с коэффициентом гидравлического трения $\lambda = 0,032$, снабженному краном с коэффициентом $\xi_{\text{кр}} = 4,2$.

Разность уровней в резервуарах воды в баках составляет $H = 4$ м. На глубине $H_1 = 7$ м к резервуару присоединен коноидальный насадок с диаметром выходного сечения $d_n = 0,008$ м и длиной $l_n = 5 \cdot d_n$ при коэффициенте расхода для насадка $\mu_n = 0,97$ (рис. 8.4). Определите: 1) расход, поступающий в резервуар по короткому трубопроводу; 2) расход воды через коноидальный насадок.

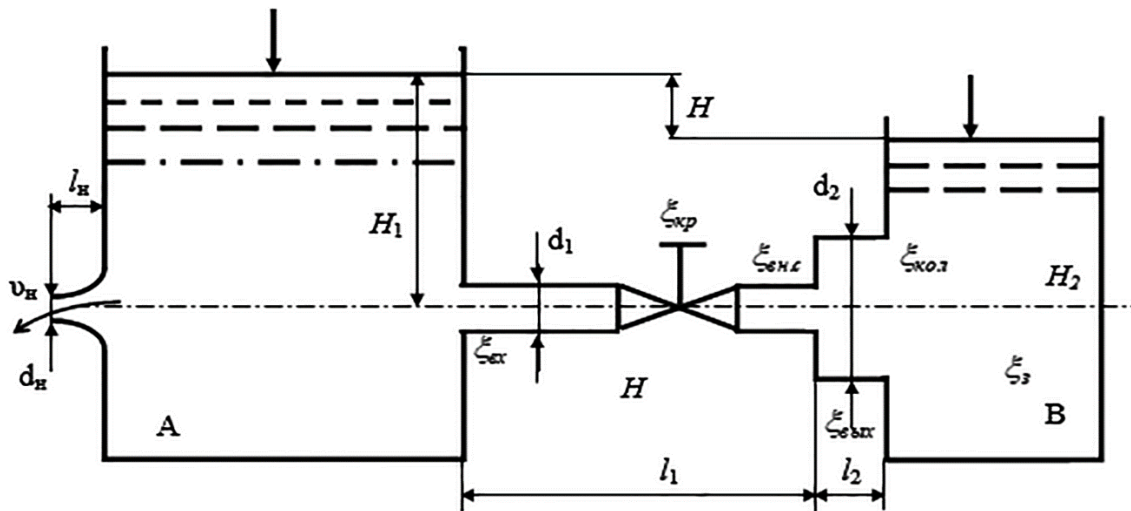


Рисунок 8.4 – Схема для решения задачи 1

Решение. Расход, поступающий в резервуар по трубопроводу, определим по формуле:

$$Q_H = \mu_s \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

где $\mu_s = \frac{1}{\sqrt{\sum \zeta}}$ – коэффициент расхода системы;

$$\sum \zeta = \sum \xi_{дл} + \sum \zeta_l$$

Потери напора по длине на первом участке:

$$\sum \xi_{дл1} = \frac{\lambda \cdot l_1}{d_1} = \frac{0,032 \cdot 9}{0,008} = 36$$

Потери напора по длине на втором участке:

$$\sum \xi_{дл2} = \frac{\lambda \cdot l_2}{d_2} = \frac{0,032 \cdot 12}{0,015} = 25,6$$

Коэффициент потерь на внезапное расширение:

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

$$\xi_{\text{внр}} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2 = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2 = \left(\frac{0,015^2}{0,008^2} - 1 \right)^2 = 6,33$$

Сумма коэффициентов потерь составит:

$$\sum \xi_{\text{н}} = 0,5 + 4,2 + 6,33 + 1 = 12,03;$$

$$\mu_s = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi_{\text{н}}}} = \frac{1}{\sqrt{12,03}} = 0,288$$

Расход воды по короткому трубопроводу равен:

$$Q_{\text{н}} = \mu_s \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,288 \cdot \frac{0,015^2 \cdot 3,14}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4} = 0,00046 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воды через конoidalный насадок равен:

$$Q_{\text{н}} = \mu_{\text{н}} \cdot S_{\text{н}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,97 \cdot \frac{0,008^2 \cdot 3,14}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 7} = 0,00057 \text{ м}^3/\text{с}$$

2. Из открытого резервуара по короткому стальному трубопроводу постоянного поперечного сечения $d_1 = 0,01$ м и длиной $l_1 = 5$ м, с краном, коэффициент сопротивления которого $\xi_{\text{кр}} = 2,5$, заканчивающимся соплом диаметром $d_s = 0,5d_1$, вытекает вода в атмосферу при температуре 30 °С. Истечение происходит под напором $H_1 = 8$ м. С другой стороны к резервуару подсоединен конoidalный насадок, диаметром выходного сопла $d_{\text{н}} = 0,008$ м и длиной $l_{\text{н}} = 5 \cdot d_{\text{н}}$, истечение из которого происходит при разности уровней в резервуарах $H = 2$ м, с коэффициентом расхода насадка $\mu_{\text{н}} = 0,97$ (рис. 8.5). Определите: 1) скорость истечения, а также расход вытекающей из сопла воды; 2) расход через затопленный конoidalный насадок.

Решение. Определим напор, под которым вода вытекает из короткого трубопровода, воспользовавшись уравнением Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h$$

Плоскость сравнения 0–0 по центру сечения трубопровода, сечение 1–1 по уровню воды в резервуаре А, сечение 2–2 на выходе из системы труб.

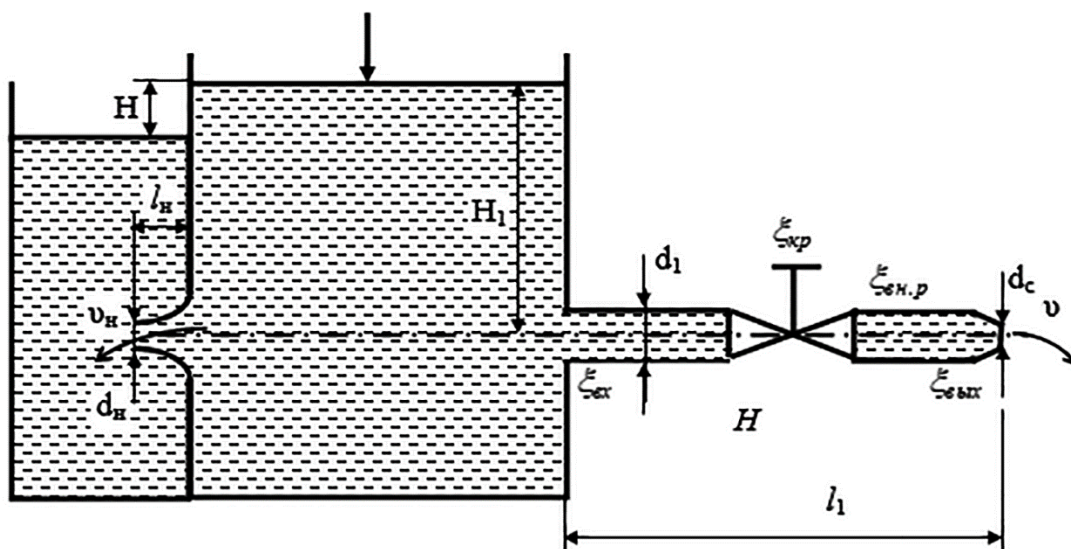


Рисунок 8.5 – Схема для решения задачи 2

Тогда уравнение Бернулли примет вид:

$$z_1 = H_1 = 8 \text{ м}; \quad \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_{\text{атм}}}{\gamma};$$

$$\frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \rightarrow 0; \quad z_2 = 0; \quad 8 = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \sum h;$$

$$\sum h = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\zeta_{\text{вх}} + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \zeta_{\text{кр}} + \alpha + \zeta_{\text{с}} \right);$$

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5; \quad \zeta_{\text{кр}} = 2,5;$$

$$\zeta_{\text{вых}} = \zeta_{\text{в}} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 = \zeta_{\text{в}} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 = 0,14 \cdot \left(\frac{0,12}{0,25} \right)^4 = 0,00743$$

Определим коэффициент гидравлического трения для квадратичной зоны сопротивления:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,1}{10} \right)^{0,25} = 0,035$$

Здесь высота выступов шероховатости для стальных труб $K_{\text{э}} = 0,1$ мм.

Таким образом, имеем:

$$\xi_{l_1} = \frac{\lambda_1 \cdot l_1}{d_1} = \frac{0,035 \cdot 5}{0,01} = 17,5$$

Сумма коэффициентов потерь составит:

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

$$\sum \xi = 17,5 + 2,5 + 0,5 + 0,00743 + 0,5 = 21$$

Площадь живого сечения равна:

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2$$

Коэффициент расхода системы составляет:

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{сист}}}} = \frac{1}{\sqrt{21}} = 0,218$$

Расход воды по трубопроводу (истечение происходит под уровень жидкости) равен:

$$Q_T = \mu_c \cdot S_1 \cdot \sqrt{2gH} = 0,218 \cdot 0,0000785 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 8} = 0,000214 \text{ м}^3/\text{с}$$

Скорость воды на выходе из трубопровода составит:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0,000214}{0,0000785} = 2,73 \text{ м/с}$$

Уточним зону сопротивлений:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{2,73 \cdot 0,01}{0,000000996} = 27409,63$$

В данном случае $\nu = 0,000000996 \text{ м}^2/\text{с}$ (для воды при температуре 30 °С).

Определим нижнюю границу квадратичной зоны:

$$Re \cdot \frac{K_3}{d} = 27409,6 \cdot \frac{0,1}{10} = 274,096; 274,096 \leq 500$$

Следовательно, в трубопроводе наблюдается переходная область сопротивлений. Уточним значение параметров:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,1}{10} + \frac{68}{27409,6} \right)^{0,25} = 0,037;$$

$$\text{следовательно, } \xi_{l1} = \frac{\lambda_1 \cdot l_1}{d_1} = \frac{0,037 \cdot 5}{0,01} = 18,4;$$

$$\sum \xi = 18,4 + 2,5 + 0,5 + 0,00743 + 0,5 = 21,9;$$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{сист}}}} = \frac{1}{\sqrt{21,9}} = 0,214$$

Расход вытекающей из сопла воды и скорость истечения составят:

$$Q_T = \mu_c \cdot S_1 \cdot \sqrt{2gH} = 0,214 \cdot 0,0000785 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 8} = 0,00021 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0,00021}{0,0000785} = 2,68 \text{ м/с}$$

Расход через затопленный коноидальный насадок равен:

$$Q_H = \mu_H \cdot S_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_3} = 0,97 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,008^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 0,00031 \text{ м}^3/\text{с}$$

Здесь $\mu_H = 0,97$ – коэффициент расхода.

Площадь живого сечения составит:

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,008^2}{4} = 0,0000502 \text{ м}^2$$

3. Вода при температуре 20 °С из резервуара А подается в резервуар В со скоростью $v = 0,5$ м/с по стальному трубопроводу диаметром $d_1 = 0,01$ м и длиной $l_1 = 16$ м. Уровень воды в баке А поддерживается постоянно и составляет $H_1 = 7$ м. Коэффициент сопротивления: $\xi_{\text{вх}} = 0,5$; крана $\xi_{\text{к}} = 1,5$; колена без закругления $\xi_{\text{к1}} = 0,25$; колена с закруглением $\xi_{\text{к2}} = 0,14$. На глубине H_1 к резервуару присоединен внутренний цилиндрический насадок (насадок Борда), диаметром $d_n = 0,01$ м и длиной $l_n = 5 \cdot d_n$ при коэффициенте скорости для насадка $\mu_n = \varphi_n = 0,71$ (рис. 8.6). Определите: 1) время заполнения водой резервуара В, объемом $W = 1,15 \text{ м}^3$, а также потери напора в трубопроводе; 2) скорость истечения воды из насадка.

Решение. Определим расход жидкости в трубопроводе, воспользовавшись уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2;$$
$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}; \text{ тогда } Q = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,5 \cdot \frac{0,01^2 \cdot 3,14}{4} = 0,000039 \text{ м}^3/\text{с}$$

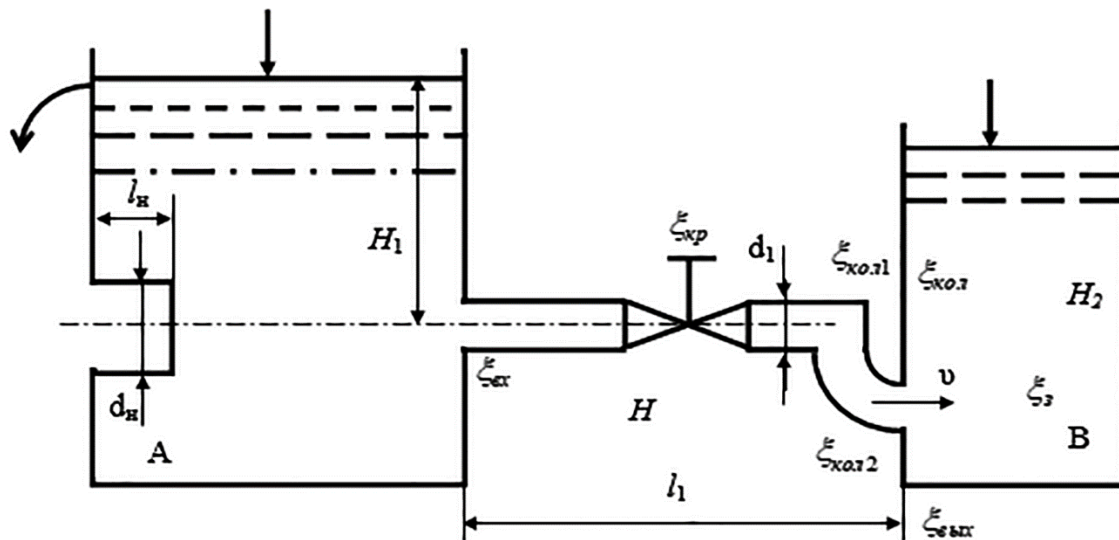


Рисунок 8.6 – Схема для решения задачи 3

Определим время заполнения водой резервуара В:

$$t = \frac{W}{Q} = \frac{1,15}{0,000039} = 29487,2 \text{ с} = 491 \text{ час}$$

Определим потери напора по трубопроводу:

1) местные потери:

$$h_{\text{м}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}; \quad h_{\text{вх}} = 0,5 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 9,81} = 0,0064 \text{ м}; \quad h_{\text{кол1}} = 0,25 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 9,81} = 0,0032 \text{ м};$$

$$h_{\text{кол2}} = 0,14 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 9,81} = 0,0019 \text{ м}; \quad h_{\text{кр}} = 1,5 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 9,81} = 0,019 \text{ м};$$

$$h_{\text{вых}} = 0,5 \cdot \frac{0,5}{2 \cdot 9,81} = 0,0064 \text{ м}$$

2) потери напора по длине:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Для определения гидравлического коэффициента λ определим граничные условия: $K_s = 0,1$ мм (для труб стальных); кинематический коэффициент вязкости для воды при температуре 20 °С равен 0,000000998 м²/с.

Определим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{0,5 \cdot 0,01}{0,000000998} = 50100,2;$$

$$Re \cdot \frac{K_3}{d} = 50100,2 \cdot \frac{0,1}{10} = 501; 501 > 500$$

Следовательно, в трубах наблюдается турбулентный режим и переходная область сопротивления. В данном случае:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_3}{d}\right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,1}{10}\right)^{0,25} = 0,035$$

Таким образом, получим:

$$h_1 = 0,035 \cdot \frac{16}{0,01} \cdot \frac{0,5^2}{2 \cdot 9,81} = 0,71 \text{ м.}$$

Тогда суммарные потери напора равны:

$$\sum h = 0,0064 + 0,0032 + 0,0019 + 0,019 + 0,0064 + 0,71 = 0,75 \text{ м}$$

Определим скорость истечения воды из насадка. Скорость воды через насадок установим по формуле:

$$v_H = \varphi_H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0};$$
$$v_H = 0,71 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 7} = 8,32 \text{ м/с}$$

4. Для ограничения на трубопроводе $D = 150$ мм установлена дроссельная диафрагма. Избыточное давление до и после диафрагмы соответственно равно $P_1 = 6,1 \cdot 10^4$ Па и $P_2 = 1,7 \cdot 10^4$ Па (рис. 8.7). Определите необходимый внутренний диаметр диафрагмы, чтобы расход был равен $Q = 32$ л/с.

Решение. Для определения диаметра воспользуемся уравнением определения расхода при истечении из отверстия в тонкой стенке:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH}$$

В данной формуле μ – коэффициент расхода системы:

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{сист}}}} = \frac{1}{\sqrt{\xi_d}}$$

Определим напор H и площадь поперечного сечения S :

$$H = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \frac{61}{9,81} - \frac{17}{9,81} = 4,49 \text{ м;}$$

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

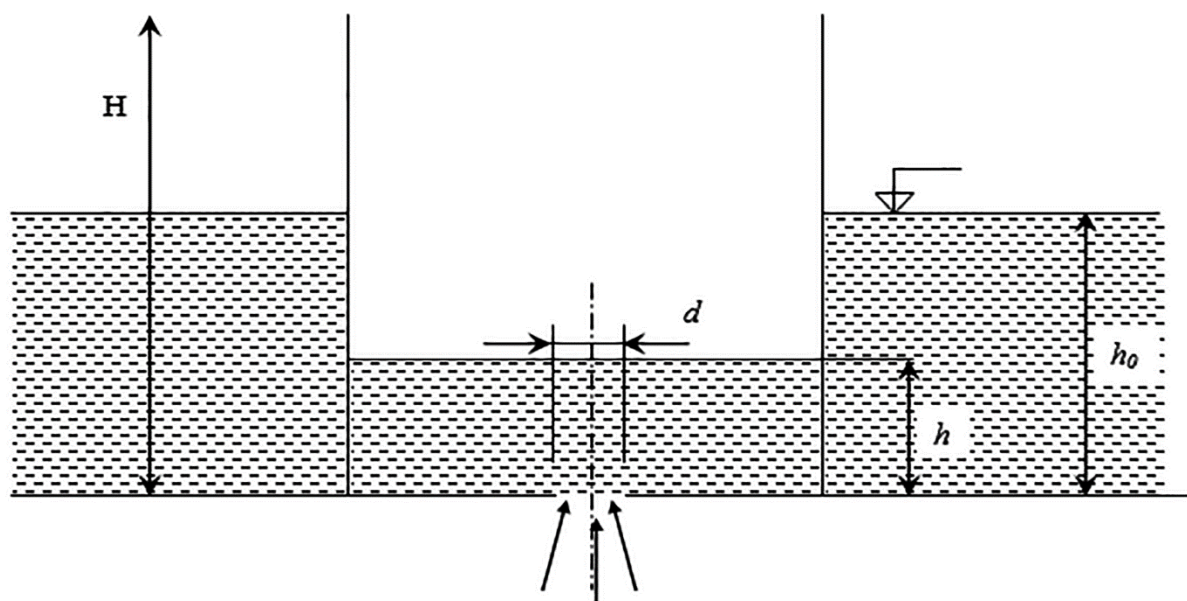


Рисунок 8.7 – Схема для решения задачи 4

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} = 0,0177 \text{ м}^2$$

Коэффициент сопротивления диафрагмы равен:

$$\xi_d = \left(\frac{D^2}{d^2 \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2 ; \varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2}$$

В таблице 8.3 отразим зависимость $Q = f(d)$. Откуда диаметр диафрагмы будет равен $d = 77,5$ мм.

Таблица 8.3 – Зависимость расхода от диаметра диафрагмы

d , мм	ε	ξ_d	μ_c	Q , м ³ /с
40	0,061	483,4	0,045	0,0076
50	0,613	187,2	0,073	0,0120
80	0,623	21,6	0,216	0,0360

5. В оболочке резервуара были сделаны квадратное отверстие со стороной $a = 4$ см и круглое отверстие диаметром $d = 6$ см, к которому присоединен цилиндрический насадок. Отметки центров отверстий и уровня воды в резервуаре указаны ниже. Отметку дна принять равной 0,00. Скорость в резервуаре $v = 0$. Центры отверстий удалены от боковых стенок резервуара на 1 м (рис. 8.8). Определите: 1) суммарный расход Q из резервуара; 2) длину

стороны a квадратного отверстия, чтобы при заданных отметках расход квадратного отверстия равнялся расходу из насадка; 3) расход Q_1 из резервуара через трубу диаметром d_2 и длиной L с краном посередине, присоединенную вместо насадка.

Отметки: уровень воды – 1,2 м; центр насадка – 0,9 м; центр отверстия – 0. Диаметр трубы $d = 70$ мм, длина $L = 16$ м, угол открытия крана $\alpha = 10$ град., $\lambda = 0,02$.

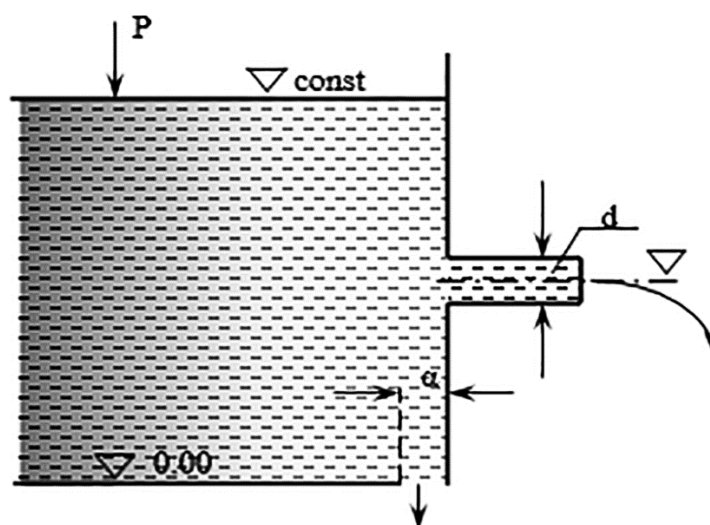


Рисунок 8.8 – Схема для решения задачи 5

Решение. Суммарный расход через отверстие и насадок определится по формуле:

$$Q = \mu_o \cdot S_o \cdot \sqrt{2gH_o} + \mu_n \cdot S_n \cdot \sqrt{2gH_n}$$

В данной формуле μ_o – коэффициент расхода отверстия; μ_n – коэффициент расхода внешнего цилиндрического насадка.

Значение коэффициента расхода отверстия зависит от степени сжатия этого отверстия. Сжатие будет неполным, если отверстие располагается таким образом, что часть периметра совпадает с боковыми стенками или дном резервуара, играющими роль направляющих плоскостей. В этом случае значение коэффициентов сжатия и расхода увеличатся.

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

$$\mu_o = \mu \left(1 + \frac{c \cdot n}{\chi} \right); \mu_o = 0,606 \text{ при } H = 1,2 \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения отверстия составит:

$$S_o = a^2 = 0,04^2 = 0,0016 \text{ м}^2$$

Диаметр насадка $d = 0,06$ м, а напор над центром насадка равен:

$$H = 1,2 - 0,9 = 0,3 \text{ м}; \mu_n = 0,82$$

Площадь поперечного сечения насадка равна:

$$S_n = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,06^2}{4} = 0,00283 \text{ м}^2$$

Следовательно, суммарный расход составит:

$$Q = 0,606 \cdot 0,016 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,2} + \\ + 0,82 \cdot 0,00283 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3} = 0,053 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воды из насадка будет равен:

$$Q = 0,82 \cdot 0,00283 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3} = 0,00563 \text{ м}^3/\text{с}$$

Определим сторону a квадратного отверстия, при которой расход будет равен $0,00563 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$S_o = \frac{Q}{\mu_o \cdot \sqrt{2gH_o}} = \frac{0,00563}{0,606 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,2}} = 0,00192 \text{ м}^2;$$

$$a = \sqrt{S_o} = \sqrt{0,00192} = 0,044 \text{ м} = 4,4 \text{ см}$$

Для определения расхода воды из трубы необходимо определить коэффициент расхода системы $\mu_{\text{сист}}$:

$$\mu_{\text{сист}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \sum \zeta_{\text{мест}} + \sum \zeta_{\text{длин}}}} = \frac{1}{\sqrt{1,1 + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + \zeta_{\text{крана}} + \lambda \cdot \frac{L}{D}}};$$

$$\mu_{\text{сист}} = \frac{1}{\sqrt{1,1 + 0,5 + 1,0 + 0,29 + 0,02 \cdot \frac{16}{0,07}}} = 0,366$$

В расчете $\zeta_{\text{крана}} = 0,29$ при угле открытия крана 10 град.

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5; \zeta_{\text{вых}} = 1,0.$$

Тогда расход воды из трубы окажется равным:

$$Q = 0,366 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{2gH};$$

$$Q = 0,366 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,07^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3} = 0,0137 \text{ м}^3/\text{с}$$

6. Определите расход воды, вытекающей из круглого отверстия диаметром $d = 0,05 \text{ м}$. Напор над центром отверстия $H = 1,8 \text{ м}$. Установите, как изменится расход, если к отверстию присоединить конически расходящийся насадок длиной $l = 0,2 \text{ м}$, с углом конусности $\Theta = 7^\circ$ (рис. 8.9).

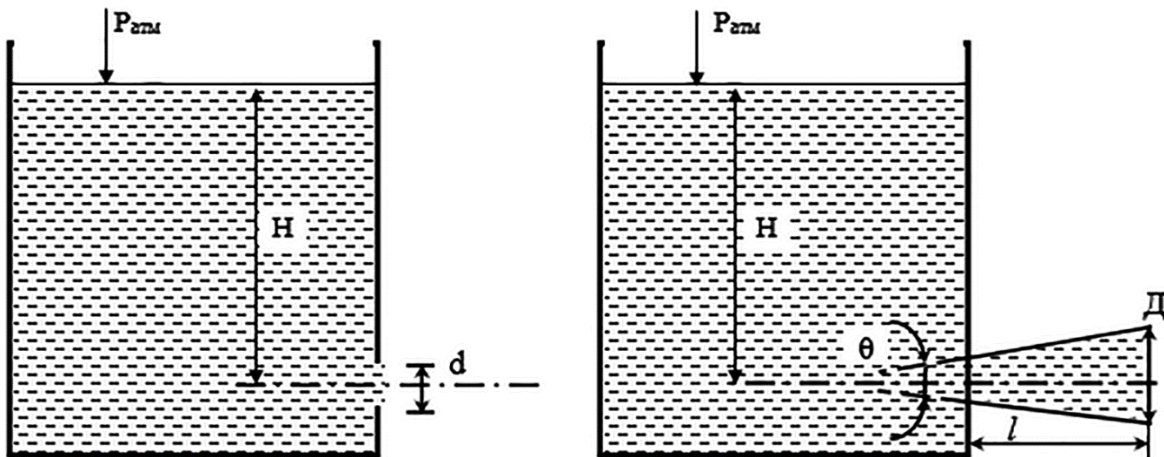


Рисунок 8.9 – Схема для решения задачи 6

Решение. Определим площадь поперечного сечения отверстия (насадка):

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 0,00196 \text{ м}^2$$

Для решения воспользуемся формулой определения расхода при истечении через отверстия и насадки:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH_0} = 0,62 \cdot 0,00196 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,8} = 0,0072 \text{ м}^3/\text{с}$$

При этом μ – коэффициент расхода отверстия (0,062), а коэффициент расхода конически расходящегося насадка соответствует значению 0,45.

Скорость определим, воспользовавшись уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2$$

Таким образом, получим:

8. Истечение жидкостей из отверстий и насадков

$$v = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,0072}{3,14 \cdot 0,05^2} = 3,67 \text{ м/с};$$

$$H_0 = H + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} = 1,8 + \frac{1,1 \cdot 3,67^2}{2 \cdot 9,81} = 1,88 \text{ м}$$

Уточним расход:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH_0} = 0,62 \cdot 0,00195 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,87} = 0,0073 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,0073}{3,14 \cdot 0,05^2} = 3,72 \text{ м/с};$$

При дальнейшем проведении уточнений расход и скорость изменяются менее чем на 3 %.

Определим диаметр выходного сечения насадка:

$$d_2 = d + L \cdot 2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = 0,05 + 2 \cdot 0,2 \cdot \operatorname{tg} \frac{7}{2} = 0,075 \text{ м};$$

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH_0} = 0,62 \cdot 0,0044 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,8} = 0,0117 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\text{где } S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,075^2}{4} = 0,0044 \text{ м}^2$$

Таким образом, получим:

$$Q_2 - Q_1 = 0,0117 - 0,0072 = 0,0045 \text{ м}^3/\text{с} = 4,5 \text{ л/с}$$

Расход изменится на 4,5 л/с.

9 ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБОПРОВОДАХ

9.1 Классификация трубопроводов

Роль трубопроводных систем в хозяйстве любой страны, отдельной корпорации или просто отдельного предприятия трудно переоценить. Системы трубопроводов в настоящее время являются самым эффективным, надежным и экологически чистым транспортом для жидких и газообразных продуктов. Со временем их роль в развитии научно-технического прогресса возрастает. Только с помощью трубопроводов достигается возможность объединения стран-производителей углеводородного сырья со странами-потребителями. Большая доля в перекачке жидкостей и газов по праву принадлежит системам газопроводов и нефтепроводов, но значительную роль играют такие системы как водоснабжение и канализация, теплоснабжение и вентиляция, добыча некоторых твердых ископаемых и их гидротранспорт. Практически в каждой машине и механизме значительная роль принадлежит трубопроводам.

По своему назначению трубопроводы принято различать по виду транспортируемой по ним продукции:

- 1) *газопроводы;*
- 2) *нефтепроводы;*
- 3) *водопроводы, воздухопроводы;*
- 4) *продуктопроводы.*

По виду движения по ним жидкостей трубопроводы можно разделить на две категории:

- 1) *напорные трубопроводы;*
- 2) *безнапорные (самотечные) трубопроводы.*

Также трубопроводы можно подразделить по виду сечения на *трубопроводы круглого и некруглого сечения (прямоугольные, квадратные и другого*

профиля). Трубопроводы можно разделить и по материалу, из которого они изготовлены: *стальные трубопроводы, бетонные, пластиковые и др.*

Дать полную и исчерпывающую классификацию трубопроводов вряд ли удастся из-за многообразия их функций и областей использования. Нас будут интересовать лишь те классификации, которые влияют на принятые методы и способы описания движения по ним жидкостей и газов.

9.2 Простой трубопровод

Основным элементом любой трубопроводной системы, какой бы сложной она не была, является простой трубопровод. Классическим определением его будет *трубопровод, собранный из труб одинакового диаметра и качества его внутренних стенок, в котором движется транзитный поток жидкости и на котором нет местных гидравлических сопротивлений*.

При напорном движении жидкости простой трубопровод работает полным сечением: $S = \frac{\pi d^2}{4} = 4\pi R_r^2 = const$. Размер сечения трубопровода (диаметр или величина гидравлического радиуса), а также протяженность (длина) трубопровода являются его основными *геометрическими характеристиками*.

Основными *технологическими характеристиками трубопровода* выступают расход жидкости в трубопроводе (Q) и напор (H) (на головных сооружениях трубопровода, то есть в его начале). Большинство других характеристик простого трубопровода являются, несмотря на их важность, производными.

Поскольку в простом трубопроводе расход жидкости транзитный (одинаковый в начале и конце трубопровода), то средняя скорость движения жидкости в трубопроводе постоянна.

Для установившегося движения жидкости по трубопроводу средняя скорость движения жидкости определяется по формуле Шези:

$$v = C\sqrt{R_r \cdot i} \quad (9.1)$$

где $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ – скоростной коэффициент Шези;

$R_r = \frac{S}{\Pi}$ – гидравлический радиус сечения (для круглого сечения при полном заполнении жидкостью он соответствует $\frac{d}{4}$;

$i = \frac{h_{тр}}{l}$ – гидравлический уклон.

Полагая, что весь имеющийся напор на головных сооружениях (в начале) трубопровода тратится на преодоление сил трения в трубопроводе (в простом трубопроводе это потери напора по длине), уравнение движения жидкости (Бернулли) примет вид:

$$H = h_{дт} = \frac{v^2 l}{C R_r} \quad (9.2)$$

Расход жидкости в трубопроводе определим на основе зависимости:

$$Q = v \cdot S = SC\sqrt{R_r \cdot i}$$

Обозначив $SC\sqrt{R_r} = K$, получим **основное уравнение простого трубопровода** в виде выражения (9.3):

$$Q = K\sqrt{i} \quad (9.3)$$

где K – модуль расхода или расход жидкости в русле заданного сечения при гидравлическом уклоне, равном единице (иначе модуль расхода называют расходной характеристикой трубопровода).

Другой и более известный вид основного уравнения простого трубопровода получим, решив уравнение относительно напора:

$$H = Q^2 \frac{l}{K^2} \text{ или } H = R \cdot Q^2 \quad (9.4)$$

Величину $\frac{l}{K^2}$ называют **удельным сопротивлением трубопровода**.

При этом $R = \frac{l}{K^2}$ – **полное сопротивление трубопровода**.

Вид гидравлической характеристики зависит от режима движения жидкости в трубопроводе: при ламинарном движении жидкости гидравлическая характеристика трубопровода – прямая линия, проходящая через начало координат; при турбулентном режиме – парабола.

Если на трубопроводе, собранном из труб одинакового диаметра, имеются местные сопротивления, то такой трубопровод можно привести к простому трубопроводу эквивалентной длины ($l_{\text{ЭКВ}}$) следующим образом:

$$\lambda \frac{l_{\text{ЭКВ}}}{d} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{lv^2}{d2g} + \sum \xi_{\text{М}} \frac{v^2}{2g};$$
$$\lambda \frac{l_{\text{ЭКВ}}}{d} = \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_{\text{М}}; l_{\text{ЭКВ}} = l + \frac{d}{\lambda} \cdot \sum \xi_{\text{М}}$$

9.3 Сложные трубопроводы

К сложным трубопроводам следует относить те трубопроводы, которые не подходят к категории простых:

- 1) *трубопроводы, собранные из труб разного диаметра (последовательное соединение трубопроводов);*
- 2) *трубопроводы, имеющие разветвления: параллельное соединение трубопроводов, сети трубопроводов, трубопроводы с непрерывной раздачей жидкости.*

Последовательное соединение трубопроводов. При последовательном соединении трубопроводов конец предыдущего простого трубопровода одновременно является началом следующего простого трубопровода. В сложном трубопроводе, состоящем из последовательно соединенных простых трубопроводов, последние называются участками этого трубопровода. Расход жидкости во всех участках сложного трубопровода остается постоянной величиной. Общие потери напора во всем трубопроводе будут равны сумме потерь напора во всех отдельных его участках:

$$H = \sum_{i=1}^n h_i = Q^2 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{K_i^2} \quad (9.5)$$

где $h_i = Q^2 \frac{l_i}{K_i^2}$ – потери напора на i -ом участке трубопровода.

Таким образом, потери напора в трубопроводе, состоящем из последовательно соединенных друг с другом участков, равны квадрату расхода жидкости в трубопроводе, умноженному на сумму удельных сопротивлений всех участков.

Гидравлическая характеристика трубопровода, состоящего из последовательно соединенных участков, представляет собой графическую сумму (по оси напоров) гидравлических характеристик всех отдельных участков. Сложный трубопровод, состоящий из последовательно соединенных простых трубопроводов, можно свести к простому трубопроводу с одинаковым (эквивалентным) диаметром. При этом длины участков будут пересчитываться, чтобы сохранить реальные гидравлические сопротивления участков трубопровода.

Так, приведенная длина i -го участка $l_{пр}$ определяется по формуле (9.6):

$$l_{пр} = l_i \cdot \frac{d_{эКВ}}{d_i} \quad (9.6)$$

Следует отметить, что величина скоростного напора также зависит от диаметра трубопровода, и при определении приведенной длины участка мы вносим некоторую ошибку, которая будет тем большей, чем больше разница в величинах фактического и эквивалентного диаметров. В таких случаях можно рекомендовать другой, более сложный способ.

Параллельное соединение трубопроводов. Схема прокладки параллельных трубопроводов используется в тех случаях, когда на трассе магистрального трубопровода есть участки, где требуется уменьшить гидравлические сопротивления трубопровода (высокие перевальные точки трубопровода) или при заложении трубопровода в труднодоступных местах (переход через

9. Движение жидкостей в трубопроводах

реки и др.). При параллельном соединении трубопроводов имеются две особые точки, называемые точками разветвления. В этих точках находятся концы параллельных ветвей трубопровода (точки A и B).

Будем считать, что жидкость движется слева направо. Тогда общий для всех ветвей напор в точке A будет больше напора в другой общей для всех ветвей трубопровода точке B . В точке A поток жидкости растекается по параллельным ветвям, а в точке B вновь собирается в единый трубопровод. Каждая ветвь может иметь различные геометрические размеры: диаметр и протяженность (длину). Поскольку вся система трубопроводов является закрытой, то поток жидкости в данной системе будет транзитным:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = Q \quad (9.7)$$

Жидкость движется по всем ветвям при одинаковой разности напоров:

$$H_{AB} = H_A - H_B$$

Тогда расход жидкости по каждой ветви можно записать формулой (9.8):

$$Q_i = K_i \sqrt{\frac{H_{AB}}{l_i}} \quad (9.8)$$

Поскольку ветвей в системе n , а число неизвестных в системе уравнений будет $n + 1$, включая напор, затрачиваемый на прохождение жидкости по всем ветвям H_{AB} , то в качестве дополнительного уравнения в системе будет использовано уравнение неразрывности:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i$$

При решении системы уравнений можно воспользоваться приведенным соотношением (9.9):

$$\frac{Q_i}{Q_{i+1}} = \frac{K_i}{K_{i+1}} \sqrt{\frac{l_{i+1}}{l_i}} \quad (9.9)$$

Для построения гидравлической характеристики системы параллельных трубопроводов можно воспользоваться методом графического суммирования. Суммирование осуществляется по оси расходов Q , так как $Q = \sum Q_i$.

Трубопроводы с непрерывным (распределенным расходом). В данном случае предполагается, что *вдоль всей длины трубопровода располагаются одинаковые равномерно распределенные потребители жидкости*. Классическим примером такого трубопровода может служить *оросительная система*.

В начальной точке трубопровода напор составляет H . В общем случае расход по трубопроводу состоит из транзитного расхода (Q_T) и расхода, который непрерывно раздается по всей длине трубопровода (Q_p).

Тогда в некотором сечении трубопровода на расстоянии x от его начала расход будет равен:

$$Q_r = Q_T + Q_p - \frac{Q_p}{l} x$$

Следовательно, гидравлический уклон в сечении x на малом отрезке dx будет составлять:

$$i_x = \frac{Q_r^2}{K^2} = \frac{\left(Q_T + Q_p - \frac{Q_p}{l} x\right)^2}{K^2}$$

Уравнение падения напора вдоль элемента dx запишется в виде:

$$dH = i \cdot dx = \left[\frac{(Q_T + Q_p)^2}{K^2} - \frac{2Q_p}{l \cdot K^2} (Q_T + Q_p)x + \frac{Q_p^2}{l^2 \cdot K^2} x^2 \right] dx$$

После интегрирования получим выражение (9.10):

$$H = \frac{l}{K^2} \left(Q_T^2 + Q_T Q_p + \frac{1}{3} Q_p^2 \right) \quad (9.10)$$

Следовательно при $Q_T = 0$: $H = \frac{1}{3} Q_p^2 \frac{l}{K^2}$.

Сети трубопроводов. Если магистральные трубопроводы принято рассматривать как средства внешнего транспорта жидкостей и газов, то сети используются в качестве оборудования для внутреннего транспорта жидких или газообразных продуктов.

По направлению движения жидкости (газа) сети различают на сборные и раздаточные (распределительные). *В сборных сетях имеется группа источников возникновения жидкости (газа). Жидкость от этих источников направляется в своеобразные узлы сбора и оттуда – в магистральный трубопровод.* Классическим примером сборной сети может служить нефтесборная система со скважин, канализационная сеть.

В раздаточных (распределительных) сетях жидкость или газ поступают из магистрального трубопровода и по сети распределяются по потребителям (абонентам). Распространенным примером распределительной сети является система водоснабжения. К такому же типу сетей можно также отнести систему принудительной вентиляции, где воздух подается в служебные помещения или на рабочие места, систему теплоснабжения и др.

Сети строятся в населенных пунктах, на предприятиях, отдельных территориях. Трубы в таких системах могут изготавливаться из различных материалов в зависимости от технологических требований, предъявляемых к сетям. В сборных сетях источники жидкости и газа располагают напором, обеспечивающим движение жидкости (газа) до магистралей. Если напоры недостаточны, то создаются специальные узлы, где напор обеспечивается принудительным образом.

Имеется по крайней мере две группы задач для гидравлического расчета сетей: *проектирование новых сетей и расчет пропускной способности существующих сетей.* Принципы расчета похожи. В основу расчетных формул по-

ложены уравнения Дарси-Вейсбаха и Шези. Предварительно в сети выбирается ветвь с наибольшей нагрузкой (расход и напор). Эта ветвь рассматривается как своеобразный трубопровод, который в общем случае можно отнести к категории последовательного соединения простых трубопроводов. Другие участки рассчитываются самостоятельно. После завершения расчетных работ осуществляется проверка соответствия результатов расчетов в узлах сети. После анализа расхождений результатов решений в узлах сети осуществляется корректировка исходных данных. Таким образом, метод итераций является наиболее приемлемым для расчета сетей.

Трубопроводы некруглого профиля. Подавляющее большинство трубопроводов собирается из круглых труб. Преимущества круглого сечения очевидны: круглое сечение обладает максимальной пропускной способностью и минимальным гидравлическим сопротивлением.

Так, гидравлический радиус для круглого сечения $R = \frac{r}{2}$, для треугольного сечения $R_r = \frac{\alpha\sqrt{3}}{12}$, для квадратного сечения $R_r = \frac{\alpha}{4}$, для шестиугольного сечения $R_r = \frac{\alpha\sqrt{3}}{6}$.

Тем не менее, трубы некруглого сечения применяются в промышленности там, где потери напора не играют особой роли. Это, в первую очередь, воздуховоды с малыми скоростями движения воздуха и др.

Трубопроводы, работающие под вакуумом (сифоны). Сифоном называется такой самотечный трубопровод, часть которого располагается выше уровня жидкости в резервуаре. Действующий напор представляет собой разницу уровней в резервуарах.

Для приведения сифона в действие необходимо предварительно откачать из него воздух и создать разрежение. При этом жидкость поднимется из резервуара *A* до верхней точки сифона, после чего она начнет двигаться по ниспадающей части трубопровода в резервуар *B*.

Другой метод запуска сифона – заполнение его жидкостью извне.

Запишем уравнение Бернулли для двух сечений $a-a$ и $b-b$ относительно плоскости сравнения 0–0:

$$z_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v_B^2}{2g} + \sum h_{\text{тр}};$$

$$\text{так как } p_A = p_B = p_{\text{ат}} \text{ и } \frac{\sqrt{A^2}}{2g} = \frac{\sqrt{B^2}}{2g},$$

$$\text{имеем } \Delta z = z_A - z_B = \sum h_{\text{тр}}$$

В этой связи получим выражение (9.11):

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta z}{l}} \quad (9.11)$$

Критическим сечением в сифоне будет сечение $x-x$ в верхней точке сифона. Давление в этой точке будет минимальным и для нормальной работы сифона необходимо, чтобы оно было выше упругости паров перекачиваемой по сифону жидкости:

$$\frac{p_{\text{min}}}{\rho g} > \frac{p_y}{\rho g}$$

Трубопроводы со стенками из упругого материала. В практике предприятий нефтяной отрасли нередки случаи использования специальных трубопроводов, стенки которых деформируются при изменении давления в перекачиваемой по ним жидкости. К трубопроводам такого типа относятся мягкие и гибкие рукава, резиновые и армированные шланги.

Опыты Фримана показали, что в данных случаях можно пользоваться формулой, которая аналогична формуле Дарси-Вейсбаха, где значение расчетных показателей можно принять по данным таблицы 9.1:

$$h_{\text{дт}} = \lambda_p \frac{l}{d_{\text{расч}}} \frac{v^2}{2g}$$

Для упругих деформируемых рукавов и шлангов в формулу Дарси-Вейсбаха следует ввести необходимые поправки (табл. 9.2).

Таблица 9.1 – Значение показателя rj в зависимости от характеристики трубопровода

Характеристика трубопровода	Величина rj
Гладкие резиновые рукава	0,000860
Обыкновенные резиновые рукава	0,000899
Очень гладкие, прорезиненные внутри	0,000884
Шероховатые внутри	0,021300
Кожаные	0,013700

Таблица 9.2 – Поправки для расчета упругих деформируемых рукавов и шлангов

Номинальный диаметр, мм	Средний внутренний диаметр, мм		λ_p
	$p = 1 \text{ атм}$	$p = 3 \text{ атм}$	
25	24,42	24,79	0,055
32	31,84	32,53	0,060
38	39,84	40,80	0,080
50	54,00	55,40	0,090
65	65,93	67,73	0,095

9.4 Неустановившееся движение жидкости в трубопроводе

Постановка вопроса, требования к модели и допущения. Вопросы изучения неустановившегося движения реальной жидкости очень сложны. Если окажется необходимым получить самое общее решение поставленной задачи, то придется рассматривать *систему уравнений, в состав которой будут входить: уравнение Навье-Стокса; уравнение неразрывности; уравнение состояния жидкости; уравнение термического состояния жидкости; уравнение первого закона термодинамики.*

Следует отметить, что данная система настолько сложна и трудоемка в своем решении, что сразу же стоит рассмотреть вопросы о необходимости принятия некоторых допущений и ограничений, облегчающих решение поставленной задачи. Другими словами, необходимо определить из соображений практики степень детальности построения модели, откуда станут очевидными

требования к описанию объекта изучения. Так, *рассматриваемый объект (жидкость) должен обладать упругими свойствами (быть сжимаемой), деформация жидкости должна происходить в пределах пропорциональности, что соответствует закону Гука.*

Следует также учитывать упругие свойства самого трубопровода, иные внешние среды не рассматриваются. Движение жидкости считается одномерным. Можно также пренебречь и тепловыми потерями во внешнюю среду.

Остановимся на изучении проблем, связанных с явлением гидравлического удара в круглых трубах и на базе решения этой практической задачи рассмотрим основные уравнения неустановившегося движения жидкости. Явление гидравлического удара характеризуется большими скоростями распространения ударной волны и значительными величинами возникающих при этом давлений. Периоды колебаний давления составляют доли секунды, благодаря чему действием сил трения можно пренебречь.

Явление гидравлического удара. *Явление гидравлического удара возникает при резком изменении скорости движения жидкости в трубопроводе (вплоть до его мгновенного закрытия). В таких случаях происходит переход кинетической энергии движущейся жидкости в потенциальную энергию покоящейся жидкости.* Однако этот переход не мгновенный, а протекает с определенной скоростью, зависящей от свойств жидкости и материала трубопровода. Кроме того, процесс носит волновой характер. Покажем на простом примере, что гидравлический удар – процесс колебательный, то есть волновой.

Резервуар A соединен с трубопроводом длиной l ; на конце трубопровода установлена задвижка. Размеры резервуара таковы, что при отборе жидкости из него уровень жидкости в резервуаре практически не понижается. Также для упрощения модели пока будем считать саму трубу недеформируемой. Примем за начало отсчета точку O , расположенную на оси трубы в плоскости задвижки. Если потерями напора на трение при движении жидкости пренебречь,

то пьезометрическая линия будет горизонтальной. Если бы жидкость была несжимаемой, то при резком закрытии задвижки мгновенно остановилась бы вся масса жидкости, находящаяся в трубе, что вызвало бы мгновенный рост давления во всей жидкости.

На самом деле в упругой жидкости процесс будет развиваться иначе. В момент резкого закрытия задвижки остановится только тонкий слой жидкости, непосредственно примыкающий к задвижке. Остальная масса жидкости будет продолжать движение за бесконечно малый промежуток времени (длительность процесса остановки). Остановится масса жидкости в объеме первого тонкого слоя:

$$\Delta M = \rho \cdot S \cdot \Delta n \quad (9.12)$$

где S – площадь внутреннего сечения трубы;

Δn – толщина тонкого слоя жидкости.

Если обозначить давление в точке O до закрытия затвора через давление после мгновенного закрытия задвижки ($p_o + \Delta p$), то по теореме об изменении количества движения можно вычислить Δp :

$$\Delta p \Delta t = \rho v_o \Delta n$$

$$\text{или } \Delta p = \rho \cdot c v_o, \text{ где } c = \lim \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Таким образом, получим выражение (9.13):

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{c v_o}{g} \quad (9.13)$$

Затем в следующий момент времени остановится следующий слой жидкости, потом третий и т. д. Так, постепенно увеличенное давление у задвижки распространится по всему трубопроводу в направлении против течения жидкости. Тогда величина $c = \frac{dn}{dt}$ представляет собой скорость распространения упругой (ударной) волны.

По истечении времени $\frac{l}{c}$ вся жидкость в трубопроводе станет находиться в сжатом состоянии. Но теперь возник перепад давления между жидкостью в резервуаре и жидкостью в трубе, в результате чего начнется движение упругой жидкости из трубопровода обратно в резервуар. По истечении такого же временного интервала $\frac{l}{c}$ давление жидкости у задвижки понизится на величину Δp , то есть достигнет первоначального значения. При этом процесс движения жидкости в резервуар будет продолжаться, пока пониженное давление не распространится до конца трубопровода (до резервуара).

Таким образом, давление у задвижки будет сохраняться на постоянном уровне в течение времени $\frac{2l}{c}$, а продолжительность всего цикла гидравлического удара будет равна $\frac{4l}{c}$. За это время давление у задвижки в течение половины этого времени будет максимальным ($p_0 + \Delta p$), в течение другой половины времени – минимальным ($p_0 - \Delta p$).

Скорость распространения упругих волн в трубопроводе. Рассмотрим общую задачу о распространении упругой волны в трубопроводе с упругими стенками (то есть с учетом сжимаемости материала труб). Выделим элемент трубопровода протяженностью $\Delta n = c \cdot \Delta t$, в котором жидкость остановилась в течение времени Δt , а давление возросло на величину:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0 \quad (9.14)$$

В остальной части трубы жидкость продолжает двигаться и за время Δt в выделенный остановившийся элемент жидкости за счет ее сжатия и сжатия стенки трубы поступит дополнительный объем жидкости:

$$\Delta W = S_0 v_0 \Delta t$$

При этом S_0 и v_0 представляют начальную площадь трубы и скорость движения жидкости до момента удара.

Разделим этот дополнительный объем на два составляющих объема (за счет сжатия жидкости ΔW_1 и за счет сжатия трубы ΔW_2):

$$\Delta W_1 = \beta_{\text{ж}} \cdot S_o \cdot \Delta n \cdot \Delta p$$

$$\text{или } \Delta W_1 = S_o \cdot \Delta n \frac{\Delta p}{K_{\text{ж}}};$$

$$\Delta W_2 = \Delta S_o \cdot \Delta n$$

При этом ΔS – увеличение площади сечения трубы за счет упругости ее материала. Таким образом, имеем:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2;$$

$$S_o v_o \Delta t = S_o \Delta n \frac{\Delta p}{K_{\text{ж}}} + \Delta S_o \cdot \Delta n$$

$$\text{или } v_o = \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\Delta p}{K_{\text{ж}}} + \frac{\Delta S_o}{S_o};$$

$$\frac{dp}{\rho \cdot c^2} = \frac{dp}{K_{\text{ж}}} + \frac{dS_o}{S_o}$$

Отсюда скорость распространения упругой волны в жидкости составит:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{dp}{\rho}}{\frac{dp}{K_{\text{ж}}} \left(1 + \frac{dS_o}{S_o} \cdot \frac{K_{\text{ж}}}{dp}\right)}}$$

Относительное удлинение размера трубы (ее радиуса) составит:

$$\frac{dS_o}{S_o} = \frac{d(\pi r^2)}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r}$$

Принимая во внимание, что $\frac{dr}{r} = \frac{d\sigma}{E}$ (E – модуль Юнга материала трубы),

получим следующую зависимость:

$$\sigma = \frac{p \cdot d}{2e}$$

В приведенной зависимости σ представляет нормальное напряжение; e – толщина стенки трубы. Тогда, получим:

$$d\sigma = \frac{d}{2e} dp; \quad \frac{dS_o}{S_o} = \frac{dp}{E} \cdot \frac{d}{e};$$

Следовательно, скорость распространения упругой волны в жидкости определяется выражением (9.15):

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K_{ж}}{\rho}}{1 + \frac{dK}{eE}}} \quad (9.15)$$

Величину $K_o = \frac{K_{ж}}{1 + \frac{dK}{eE}}$ называют *приведенным модулем упругости*.

В зависимости от времени распространения ударной волны и времени перекрытия задвижки (или другой запорной арматуры), в результате которого возник гидравлический удар, можно выделить два вида ударов:

1. **Полный (прямой) гидравлический удар**, если время перекрытия задвижки меньше времени распространения ударной волны.

2. **Неполный (непрямой) гидравлический удар**, когда время перекрытия задвижки больше времени распространения ударной волны.

При полном гидравлическом ударе фронт возникшей ударной волны движется в направлении, обратном первоначальному направлению движения жидкости в трубопроводе. Его дальнейшее направление движения зависит от элементов трубопровода, расположенных до закрытой задвижки. Возможно и повторное неоднократное прохождения фронта волны в прямом и обратном направлениях.

При неполном гидравлическом ударе фронт ударной волны не только меняет направление своего движения на противоположное, но и частично проходит далее сквозь не до конца закрытую задвижку.

Прямой гидравлический удар бывает тогда, когда время закрытия задвижки меньше фазы удара (T), определяемой по формуле (9.16):

$$T = \frac{2l}{C_u} \quad (9.16)$$

где l – длина трубопровода от места удара до сечения, в котором поддерживается постоянное давление;

C_u – скорость распространения ударной волны в трубопроводе.

Значение скорости распространения ударной волны в трубопроводе определяется по формуле Н. Е. Жуковского (9.17):

$$C_u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E D}{E_{tr} h} k}} \quad (9.17)$$

где E – модуль объемной упругости жидкости;

ρ – плотность жидкости;

$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения звука в жидкости;

E_{tr} – модуль упругости материала стенок трубы;

D – диаметр трубы;

h – толщина стенок трубы.

Для воды отношение $\frac{E}{E_{tr}}$ зависит от материала труб и может быть принято: для стальных труб – 0,01; чугунных – 0,02; железобетонных – 0,1–0,14; асбестоцементных – 0,11; полиэтиленовых – 1–1,45.

Коэффициент k для тонкостенных трубопроводов применяется (стальные, чугунные, асбестоцементные, полиэтиленовые) равным единицы. Для железобетонных трубопроводов он рассчитывается по формуле (9.18):

$$k = \frac{1}{1 + 9,5a} \quad (9.18)$$

где $a = f/h$ – коэффициент армирования кольцевой арматурой (f – площадь сечения кольцевой арматуры на один метр длины стенки трубы); значение a обычно составляет от 0,015 до 0,05.

Повышение давления при прямом гидравлическом ударе определяется по формуле (9.19):

$$P = \rho \cdot Cu \cdot V_0 \quad (9.19)$$

где V_0 – скорость движения воды в трубопроводе до закрытия задвижки.

Если время закрытия задвижки больше фазы удара ($t_3 > T$), такой удар называется непрямым. При этом дополнительное давление может быть определено по формуле (9.20):

$$P = \frac{2\rho \cdot V_0 \cdot l}{t_3} \quad (9.20)$$

Результат действия удара выражают также величиной *повышения напора* H , которая выражается формулой (9.21) при прямом ударе и формулой (9.22) при непрямом ударе:

$$H = \frac{Cu \cdot V_0}{g}, \quad (9.21)$$

$$H = \frac{2V_0 \cdot l}{gt_3} \quad (9.22)$$

Примеры решения задач

1. Два хранилища с керосином сообщаются со стальным сифоном, имеющим длину $L = 250$ м и диаметр $d = 0,25$ м. Отметки уровня керосина в хранилищах отличаются на величину $H = 1,4$ м. От нижнего хранилища отходит стальная труба диаметром $d = 0,25$ м с задвижкой, имеющая толщину стенок $e = 7$ мм. От пункта A отходят стальные трубопроводы с последовательным и параллельным соединениями, имеющими объемные расходы соответственно $Q_1 = 0,0017$ м³/с и $Q_2 = 0,0016$ м³/с. При этом на втором участке последовательного соединения производится равномерная путевая раздача воды $q = 0,03$ л/с (рис. 9.1).

Определите: 1. Начальную скорость v_0 движения керосина в стальном трубопроводе, при котором давление при мгновенном закрытии задвижки достигает величины $p = 2\,200\,000$ Па, если перед закрытием задвижки в трубопроводе давление соответствует $p_0 = 400\,000$ Па.

2. Объемный расход в сифоне при заданном диаметре.
3. Распределение расхода в трубопроводах с параллельным соединением.
4. Потери напора на участках трубопровода при использовании последовательного соединения.

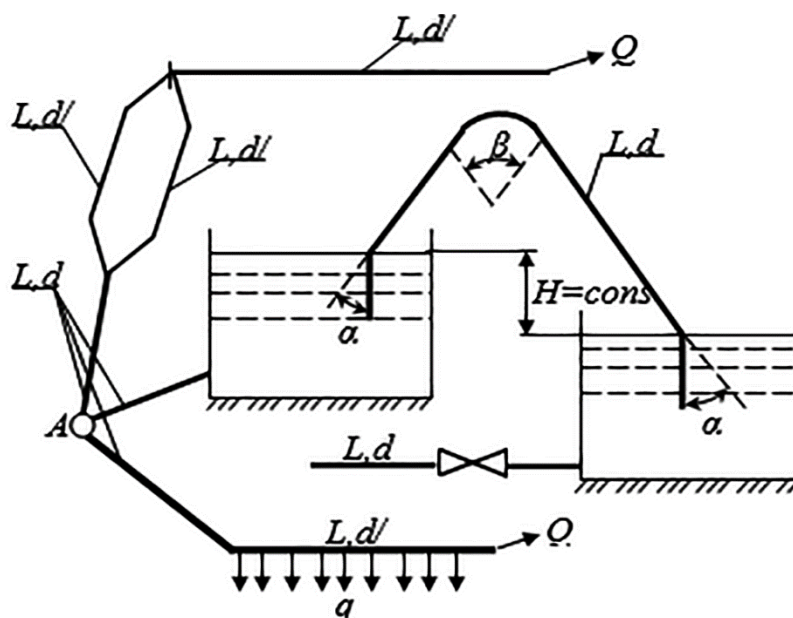


Рисунок 9.1 – Схема для решения задачи 1

Решение:

1. Определим начальную скорость v_0 движения керосина в стальном трубопроводе, при котором давление при мгновенном закрытии задвижки достигает величины $p = 2\,200\,000$ Па, если перед закрытием задвижки в трубопроводе давление соответствует $p_0 = 400\,000$ Па.

Вспользуемся выражением:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0$$

следовательно, $v_0 = \frac{\Delta p}{\rho \cdot c}$;

9. Движение жидкостей в трубопроводах

В данной задаче $\Delta P = P_0 - P = 2200000 - 400000 = 1800000$ Па; ρ – плотность керосина, равная 800 кг/м^3 .

Модуль упругости керосина (E) составляет $1\,370\,000$ кПа; модуль упругости стали (E_{rip}) – $196\,000\,000$ кПа.

Скорость распространения волны гидравлического удара равна:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{e} \cdot \frac{E}{E_{rip}}}}; c = \frac{\sqrt{\frac{1370000 \cdot 1000}{800}}}{\sqrt{1 + \frac{250}{7} \cdot \frac{1370000}{196000000}}} = 1170,64 \text{ м/с}$$

Начальная скорость движения керосина составит:

$$v_0 = \frac{\Delta P}{\rho \cdot c} = \frac{1800000}{800 \cdot 1170,6} = 1,92 \text{ м/с}$$

2. Определим объемный расход в сифоне при заданном диаметре.

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + \zeta_{\text{сист}}}}$$

$$\text{где } S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,049 \text{ м}^2$$

Гидравлическое сопротивление системы складывается из местных сопротивлений при внезапном повороте сифона и сопротивления гидравлического трения по длине сифона.

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5; \zeta_{\text{вых}} = 1.$$

$\zeta_{\text{пов1}} = 0,35$ (при $\alpha = 45^\circ$ – резкий поворот); $\zeta_{\text{пов2}} = 1,3 \cdot \sin 90 = 1,3$ – плавный поворот.

Рассчитаем сопротивление гидравлического трения:

$$h_{\text{под}} = A \cdot l \cdot Q^2$$

Значение удельного сопротивления (A) при $d = 250$ мм равно $2,187$.

Подставим в формулу $l = 250$ м, зная, что расход определяется из уравнения неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2;$$

$$h_{\text{пот}} = A \cdot l \cdot S^2 = 2 \cdot g \cdot A \cdot l \cdot S^2 \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \zeta_{\text{д}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g};$$

$$\text{откуда } \zeta_{\text{д}} = 2 \cdot g \cdot A \cdot l \cdot S^2 = 2 \cdot 9,81 \cdot 2,187 \cdot 250 \cdot 0,049^2 = 25,76$$

Таким образом, суммарное сопротивление составит:

$$\zeta_{\text{сист}} = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{пов1}} + \zeta_{\text{пов2}} + \zeta_{\text{вых}} + \zeta_{\text{дл}};$$

$$\zeta_{\text{сист}} = 0,5 + 0,35 + 0,35 + 1,3 + 1 + 25,76 = 29,26$$

Тогда объемный расход в сифоне при заданном диаметре равен:

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + \zeta_{\text{сист}}}};$$

$$Q = 0,049 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 1,4}{1 + 29,26}} = 0,0467 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 46,68 \text{ л/с}$$

3. Определим распределение расхода в трубопроводах с параллельным соединением. Согласно условию задачи, трубопроводы соединены параллельно. Определенный расход жидкости, подходя к точке разветвления, распределяется по двум ответвлениям (в частном случае диаметры ответвлений равны $d_1 = 125$ мм, $d_2 = 125$ мм). Составим для нашего трубопровода уравнение баланса расхода в узле:

$$Q_{\text{расх}} = Q_1 + Q_2; \quad Q_1 = Q_2;$$

$$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_{\text{расх}}}{2} = \frac{0,0017}{2} = 0,00085 \text{ м}^3/\text{с}$$

4. Определим потери напора по длине последовательно соединенных участков трубопровода. По условию задачи трубопровод состоит из последовательно соединенных труб разных диаметров, уложенных в одну линию друг за другом. При этом расход не на всех его участках постоянный, и полная потеря напора на всем протяжении трубопровода определяется как сумма потерь на двух его участках.

Потери на каждом из двух участков можно определить по формуле:

$$h_1 = \frac{Q^2}{K^2} \cdot L$$

На втором участке магистрального трубопровода:

$$Q_m = Q_2 = 0,0016 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 1,6 \text{ л/с}$$

При $d_2 = 250$ мм модуль расхода $K = 716,3$ л/с, тогда на втором участке магистрального трубопровода имеется непрерывная раздача $q = 0,03$ л/с. Рассчитаем потери напора в трубопроводе с непрерывным путевым расходом:

$$Q_{\text{расх}} = Q_T + Q_{\text{п}}$$

При этом транзитный расход (Q_T) равен Q_1 и соответствует $0,0016 \text{ м}^3/\text{с}$.

Путевой расход рассчитываем: $Q_{\text{п}} = q \cdot L$

$$\text{тогда } Q_{\text{расх}} = Q_T + q \cdot L = 1,6 + 0,03 \cdot 250 = 9,1 \text{ л/с;}$$

$$h_1 = \frac{9,1^2}{716,3^2} \cdot 250 = 0,0403 \text{ м}$$

На втором участке действует объемный расход $Q_2 = 0,0016 \text{ м}^3/\text{с}$, диаметр остается тот же. Тогда, получим:

$$h_2 = \frac{1,6^2}{716,3^2} \cdot 250 = 0,00125 \text{ м}$$

Суммарные потери напора будут равны:

$$H = h_1 + h_2 = 0,0403 + 0,00125 = 0,0416 \text{ м}$$

2. Два бассейна сообщаются чугунным сифоном, имеющим обратный клапан с сеткой с углами поворотов $\alpha = 45^\circ$ и $\beta = 90^\circ$. Отметки уровней воды отличаются на величину $H = 2,6$ м. От нижнего бассейна отходит бетонная труба диаметром $d = 0,3$ м, длиной $L = 250$ м, с объемным расходом, соответствующим $Q = 0,021 \text{ м}^3/\text{с}$, с задвижкой. Магистральные асбестоцементные трубопроводы имеют последовательные и параллельные участки. Объемный расход в трубопроводе с параллельными участками $Q_1 = 0,0025 \text{ м}^3/\text{с}$, с последовательным соединением участков $Q_2 = 0,0030 \text{ м}^3/\text{с}$. На конечном

участке последовательного соединения происходит равномерная путевая раздача $q = 0,02$ л/с (рис. 9.2).

- Определите:**
1. Повышение давления ΔP в трубопроводе при внезапном закрытии задвижки.
 2. Объемный расход в сифоне при заданном диаметре.
 3. Распределение расхода в трубопроводах с параллельным соединением.
 4. Потери напора на участках трубопровода при использовании последовательного соединения.

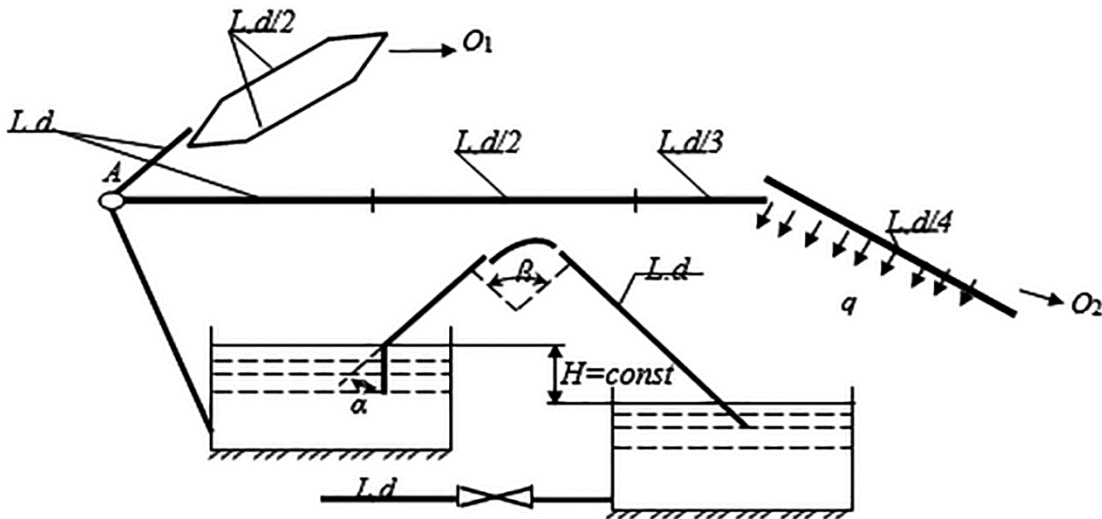


Рисунок 9.2 – Схема для решения задачи 2

Решение:

1. Определим повышение давления в трубопроводе при внезапном закрытии задвижки:

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0$$

При этом плотность жидкости (ρ) составляет $1\,000$ кг/м³.

Скорость распространения волны гидравлического удара равна:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{e} \cdot \frac{E}{E_{pip}}}}; c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{300}{8} \cdot 0,1}} = 653,83 \text{ м/с}$$

9. Движение жидкостей в трубопроводах

Для воды $E = 2,03 \cdot 10^6$ кПа; $\frac{E}{E_{rip}} = 0,1$ – для бетонных труб.

Для определения скорости движения воспользуемся уравнением неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2;$$
$$v_0 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,021}{3,14 \cdot 0,3^2} = 0,3 \text{ м/с}$$

Тогда повышение давления в трубопроводе при внезапном закрытии задвижки составит:

$$\Delta p = 1000 \cdot 653,83 \cdot 0,3 = 196149 \text{ Па} = 196,149 \text{ кПа}$$

2. Определим объемный расход в сифоне при заданном диаметре.

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + \zeta_{\text{сист}}}},$$
$$\text{где } S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,0707 \text{ м}^2$$

Гидравлическое сопротивление системы складывается из местных сопротивлений при внезапном повороте сифона и сопротивления гидравлического трения по длине сифона.

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5; \zeta_{\text{вых}} = 1.$$

$\zeta_{\text{пов1}} = 0,35$ (при $\alpha = 45^\circ$ – резкий поворот); $\zeta_{\text{пов2}} = 1,3 \cdot \sin 90 = 1,3$ – плавный поворот.

Рассчитаем сопротивление гидравлического трения:

$$h_{\text{пот}} = A \cdot l \cdot Q^2$$

Подставим в формулу $l = 250$ м, зная, что расход определяется из уравнения неразрывности:

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2;$$
$$h_{\text{пот}} = A \cdot l \cdot S^2 = 2 \cdot g \cdot A \cdot l \cdot S^2 \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \zeta_d \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g};$$

$$\text{откуда } \zeta_d = 2 \cdot g \cdot A \cdot l \cdot S^2 = 2 \cdot 9,81 \cdot 0,914 \cdot 250 \cdot 0,0707^2 = 22,41$$

Таким образом, суммарное сопротивление составит:

$$\zeta_{\text{сист}} = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{пов1}} + \zeta_{\text{пов2}} + \zeta_{\text{вых}} + \zeta_{\text{дл}};$$
$$\zeta_{\text{сист}} = 0,5 + 0,35 + 1,3 + 1 + 22,41 = 25,56$$

Тогда объемный расход в сифоне при заданном диаметре равен:

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + \zeta_{\text{сист}}}};$$
$$Q = 0,0707 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 2,6}{1 + 25,56}} = 0,098 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 97,98 \text{ л/с}$$

3. Определим распределение расхода в трубопроводах с параллельным соединением. Согласно условию задачи, трубопроводы соединены параллельно. Определенный расход жидкости, подходя к точке разветвления, распределяется по двум ответвлениям (в частном случае диаметры ответвлений равны: $d_1 = 150$ мм, $d_2 = 150$ мм). Составим для нашего трубопровода уравнение баланса расхода в узле:

$$Q_{\text{расх}} = Q_1 + Q_2; \quad Q_1 = Q_2;$$
$$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_{\text{расх}}}{2} = \frac{0,0025}{2} = 0,00125 \text{ м}^3/\text{с}$$

4. Определим потери напора по длине последовательно соединенных участков трубопровода. По условию задачи трубопровод состоит из последовательно соединенных труб разных диаметров, уложенных в одну линию друг за другом. При этом расход не на всех его участках постоянный, и полная потеря напора на всем протяжении трубопровода определяется как сумма потерь на четырех его участках.

Потери на каждом из четырех участков можно определить по формуле:

$$h_4 = \frac{Q^2}{K^2} \cdot L$$

На четвертом участке магистрального трубопровода:

$$Q_m = Q_4 = 0,003 \text{ м}^3/\text{с} \text{ или } 3 \text{ л/с}$$

9. Движение жидкостей в трубопроводах

При $d_4 = 75$ мм модуль расхода $K = 24,77$ л/с, тогда на четвертом участке магистрального трубопровода имеется непрерывная раздача $q = 0,02$ л/с. Рассчитаем потери напора в трубопроводе с непрерывным путевым расходом:

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{Т}} + Q_{\text{П}}$$

При этом транзитный расход ($Q_{\text{Т}}$) равен Q_1 и соответствует $0,003$ м³/с.

Путевой расход рассчитываем: $Q_{\text{П}} = q \cdot L$

$$\text{тогда } Q_{\text{расх}} = Q_{\text{Т}} + q \cdot L = 3,0 + 0,02 \cdot 250 = 8,0 \text{ л/с;}$$

$$h_4 = \frac{8^2}{24,77^2} \cdot 250 = 6,52 \text{ м}$$

На третьем участке действует объемный расход $Q_2 = 0,003$ м³/с; при диаметре $d_3 = 100$ мм. Тогда, получим:

$$h_3 = \frac{3^2}{53,61^2} \cdot 250 = 0,783 \text{ м}$$

На втором участке действует объемный расход $Q_2 = 0,003$ м³/с; при диаметре $d_2 = 150$ мм. Тогда, получим:

$$h_2 = \frac{3^2}{58,4^2} \cdot 250 = 0,09 \text{ м}$$

На первом участке действует объемный расход $Q_2 = 0,003$ м³/с; при диаметре $d_1 = 300$ мм. Тогда, получим:

$$h_1 = \frac{3^2}{99,3^2} \cdot 250 = 0,0023 \text{ м}$$

Суммарные потери напора будут равны:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 6,52 + 0,783 + 0,09 + 0,0023 = 7,4 \text{ м}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухаркин, Е. Н. Инженерные сети. Оборудование зданий и сооружений / Е. Н. Бухаркин. – М. : Высшая школа, 2001. – 415 с.
2. Гидравлика, водоснабжение и канализация / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков, П. В. Сафонов. – М. : Стройиздат, 2001. – 359 с.
3. Кедров, В. С. Санитарно-техническое оборудование зданий / В. С. Кедров. – М. : Стройиздат, 1989. – 385 с.
4. Молчанова, Т. Г. Гидравлика. Практикум : учебное пособие / Т. Г. Молчанова. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2014. – 152 с.
5. СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий // Техэксперт. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/573741260> (дата обращения: 20.10.2024).
6. Семенов, В. Н. Унификация и стандартизация проектной документации для строительства / В. Н. Семенов. – М. : Стройиздат, 1985. – 222 с.
7. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле академика Н. Н. Павловского. – М. : Стройиздат, 1987. – 156 с.
8. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных труб / Ф. А. Шевелев. – М. : Стройиздат, 1973. – 157 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Физические свойства жидкости

1. Определите плотность жидкости Ж, полученной смешением жидкости Ж₁ объемом $W_1 = (10 + 10j)$ л, плотностью $\rho_1 = (860 + 5xj)$ кг/м³, и жидкости Ж₂ объемом $W_2 = (95 - 10j)$ л/м³, плотностью $\rho_2 = (910 - 5j)$ кг/м³.

2. Жидкость, имеющая плотность $\rho = (865 + 1xj)$ кг/м³ и объем $W = (150 - 1j)$ л, получена смешиванием масла плотностью $\rho_1 = (850 + 1j)$ кг/м³ с маслом плотностью $\rho_2 = (885 + 0,5j)$ кг/м³. Определите объемы W_1 и W_2 масел, составляющих эту жидкость.

3. Определите плотность жидкости, полученной смешиванием двух минеральных масел плотностью $\rho_1 = (845 + 5j)$ кг/м³ и $\rho_2 = (865 + 5j)$ кг/м³. Объем первого масла составляет 40 % объема второго.

4. Определите плотность рабочих жидкостей при различных температурах. Результаты расчета для своего варианта задания занесите в таблицу А.1. Температурный коэффициент объемного расширения всех масел принять равным $8,75 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

Таблица А.1 – Плотность рабочих жидкостей при разных температурах

В кг/м³

№	Марка масла	Плотность жидкости при температуре $t, ^\circ\text{C}$									
		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
1	М-8-В ₂							886			
2	М-10-В ₂							890			
3	МГ-46-В (МГ-30)							890			
4	МГ-15-В(с) (РМГЗ)							860			
5	МГ-15-Б (АМГ-10)							870			
6	МГ-20							885			

5. При температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ масла М-10-В₂, МГ-46-В и МГ-15-В(с) занимают объем $W_0 = (20 + 10j)$ л. Определите объемы, которые они будут занимать при температурах минус $40\text{ }^\circ\text{C}$ и плюс $50\text{ }^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент объемного расширения всех масел принять равным $8,75 \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$.

6. Минеральное масло и вода в гидроцилиндрах при атмосферном давлении занимают объем $W_0 = (10 + 3j)$ л. Определите, какой объем будут занимать эти жидкости при давлении $p = (8 + 4j)$ МПа, если коэффициент объемного сжатия минерального масла равен $6,6 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$; воды – $4,7 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$. Деформацией стенок гидроцилиндров пренебречь.

7. На какую величину переместится шток гидроцилиндра, имеющего диаметр $D = (50 + 10j)$ мм, с запертым в нем при атмосферном давлении объемом минерального масла $W_0 = 18$ л, если на данный шток приложить усилие, соответствующее $T = (3 + 0,5j) 10^4$ кН? Коэффициент объемного сжатия масла составляет $6,6 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$. Деформацией стенок гидроцилиндра пренебречь.

8. Стальной трубопровод длиной $L = (100 + 20j)$ м и внутренним диаметром $d = (40 + 10j)$ мм при атмосферном давлении полностью заполнен минеральным маслом. Определите, какой дополнительный объем масла необходимо подать в полость трубы при ее гидравлическом испытании под давлением, составляющим $p = (16 + 4j)$ МПа. Коэффициент объемного сжатия масла равен $6,6 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$. Деформацией стенок трубы пренебречь.

9. Резервуар заполнен водой, занимающей объем $W_1 = (1,5 + 0,2j)$ м³. На сколько уменьшится и чему будет равен этот объем при увеличении давления на величину 200 атмосфер? Коэффициент объемного сжатия воды принять равным $4,75 \cdot 10^{-10}\text{ Па}^{-1}$. Деформацией стенок резервуара пренебречь.

10. Высота цилиндрического резервуара $h = (2,5 + 0,1j)$ м, его внутренний диаметр $d = (2,7 + 0,1j)$ м. Определите массу мазута плотностью 920 кг/м^3 , которую можно налить в резервуар при температуре $15\text{ }^\circ\text{C}$, если его температура может подняться до $40\text{ }^\circ\text{C}$. Расширением стенок резервуара пренебречь. Коэффициент объемного температурного расширения жидкости равен $0,0008\text{ K}^{-1}$.

Гидростатика

1. Закрытый резервуар A , заполненный пресной водой, снабжен вакуумметром и пьезометром (рис. А.1). Определите абсолютное давление p_0 над свободной поверхностью в резервуаре и высоту поднятия воды в пьезометре h , если глубина воды в резервуаре $H = (2,2 + 0,1j)$ м, а разность уровней ртути в вакуумметре $h_1 = 80$ мм. рт. ст.

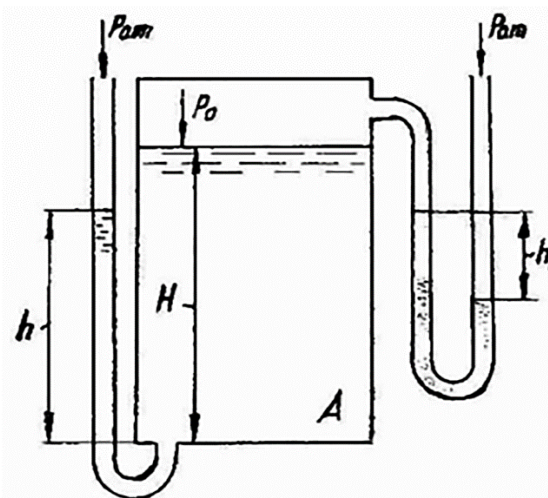


Рисунок А.1 – Схема для решения задач 1 и 2

2. Закрытый резервуар A , заполненный керосином на глубину, составляющую $H = (3 + 0,1j)$ м, снабжен ртутным манометром и пьезометром (рис. А.1). Определите абсолютное давление p_0 над свободной поверхностью в резервуаре и разность уровней ртути в вакуумметре h_1 , если высота поднятия керосина в пьезометре $h = 1,5$ м. Плотность керосина 820 кг/м^3 .

3. Закрытый резервуар A , заполненный водой, снабжен ртутным манометром и мановакуумметром M (рис. А.2). Определите глубину H подключения ртутного манометра к резервуару, если разность уровней ртути в манометре составляет $h = (140 + 2j)$ мм. Величина $b = 0,5$ м, а показание мановакуумметра M равно $p_M = 9,81 \text{ кН/м}^2$.

4. Закрытый резервуар A , заполненный нефтью, снабжен ртутным манометром и мановакуумметром M (рис. А.2). Определите показание мановакуумметра p_M , если глубина подключения манометра $H = (1,5 + 0,2j)$ м, разность уровней ртути $h = 200$ мм, а величина $b = 0,5$ м. Плотность нефти 900 кг/м^3 .

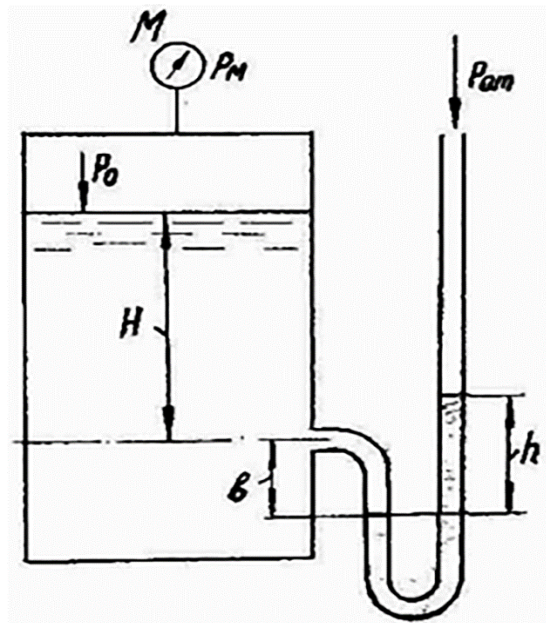


Рисунок А.2 – Схема для решения задач 3 и 4

5. Манометрическое давление в трубе *A*, заполненной жидкостью с плотностью 820 кг/м^3 , составляет $p_M = 1,5 \text{ кгс/см}^2$ (рис. А.3). Показание ртутного дифференциального манометра $h = (100 + 5j) \text{ мм}$. Определите давление p_B в трубе *B*, заполненной той же жидкостью, что колена манометра и труба *A*.

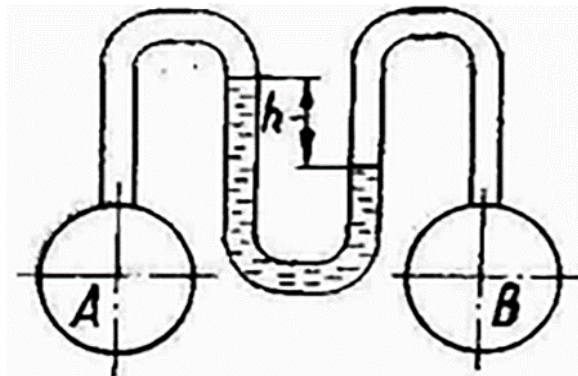


Рисунок А.3 – Схема для решения задачи 5

6. Определите, на какой высоте z установится уровень ртути в дифференциальном жидкостном манометре (рис. А.4), если при абсолютном давлении в трубопроводе $p = (130 + 0,5j) \text{ кПа}$ и показании манометра $h = 25 \text{ мм}$ система находится в равновесии. Удельный вес ртути – $133,4 \text{ кН/м}^3$, воды – $9,81 \text{ кН/м}^3$.

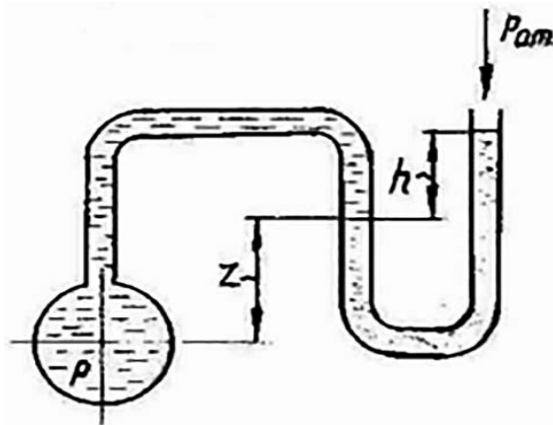


Рисунок А.4 – Схема для решения задачи 6

7. Закрытый резервуар (рис. А.5) заполнен керосином. Определите показание манометра M (p_M), если показание открытого пьезометра соответствует уровню $h = (2,0 + 0,1j)$ м при нормальном атмосферном давлении, а глубина погружения точки A равна $h_1 = (1,1 + 0,05j)$ м.

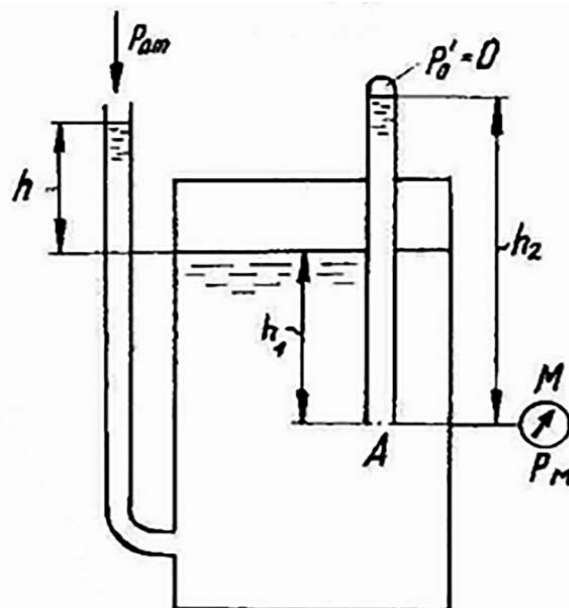


Рисунок А.5 – Схема для решения задач 7 и 8

8. Закрытый резервуар с водой (рис. А.5) снабжен закрытым и открытым пьезометрами. Определите высоту h_2 поднятия воды в закрытом пьезометре (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке A). По-

казание открытого пьезометра $h = 1,8$ м при нормальном атмосферном давлении. Расстояние от свободной поверхности жидкости в резервуаре до точки A равно $h_1 = (0,8 + 0,05j)$ м.

9. Закрытый резервуар с нефтью снабжен пьезометром (рис. А.6). Определите показание манометра M , если глубина погружения точки A составляет $h_1 = (0,5 + 0,05j)$ м, а при нормальном атмосферном давлении показание пьезометра равно $h_2 = (0,7 + 0,1j)$ м.

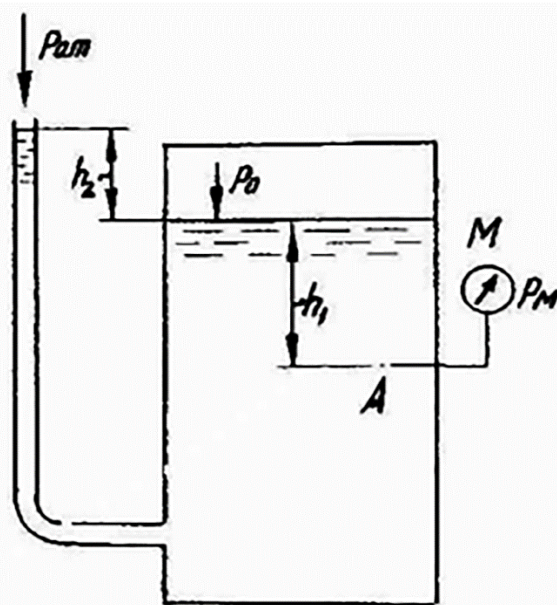


Рисунок А.6 – Схема для решения задачи 9

10. На какой высоте h над точкой A находится свободная поверхность воды, если манометр M (рис. А.7) показывает давление $(20 + j)$ кПа? Абсолютное давление над свободной поверхностью жидкости в резервуаре соответствует $(8 + 2j)$ кПа. Постройте эпюру абсолютного гидростатического давления, действующего по вертикали BC .

11. Резервуар, наполненный водой, снабжен пьезометром (рис. А.8). Точка A погружена на глубину $h = (1,0 + 0,1j)$ м. Избыточное давление на свободной поверхности равно $(5 + 0,2j)$ кПа. Найдите высоту h_1 подъема воды в пьезометре. Постройте эпюру абсолютного гидростатического давления на плоскую поверхность BC .

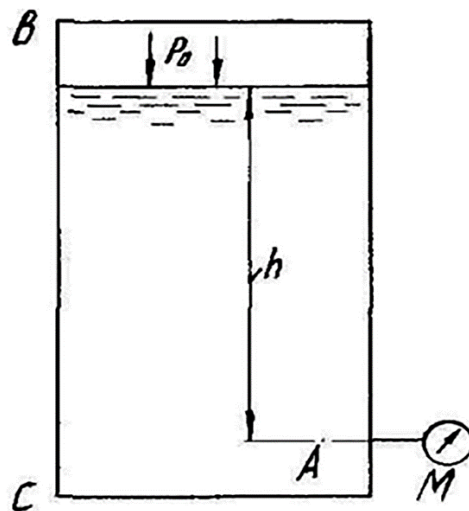


Рисунок А.7 – Схема для решения задачи 10

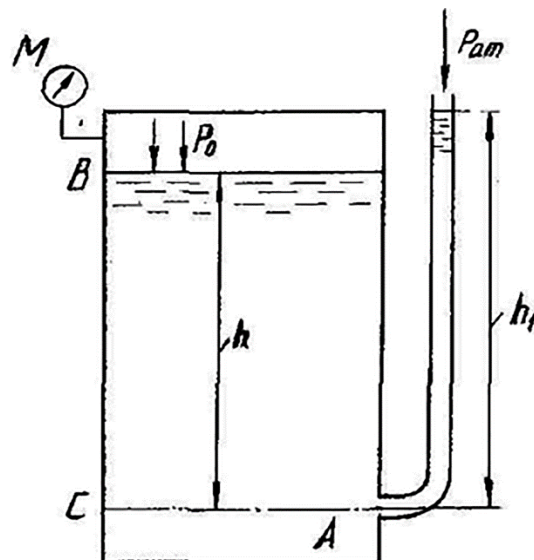


Рисунок А.8 – Схема для решения задач 11 и 12

12. Резервуар, наполненный водой, снабжен пьезометром и манометром M (рис. А.8). Точка A погружена на глубину $h = (0,9 + 0,1j)$ м, а показание пьезометра соответствует уровню $h_1 = (1,5 + 0,2j)$ м. Найдите показание манометра M , а также постройте эпюру избыточного гидростатического давления, действующего по вертикали BC .

13. Определите абсолютное давление на свободной поверхности и избыточное давление в точке A для жидкости плотностью 760 кг/м^3 , находящейся в резервуаре (рис. А.9), если атмосферное давление $p_{\text{ат}} = 750 \text{ мм. рт. ст.}$ Глубина погружения точки A под свободную поверхность $h = (3 + 0,1j)$ м, показание

манометра M соответствует уровню $p_M = (0,035 + 0,005j)$ МПа, а расстояние от центра манометра $h_1 = (0,5 + 0,1j)$ м.

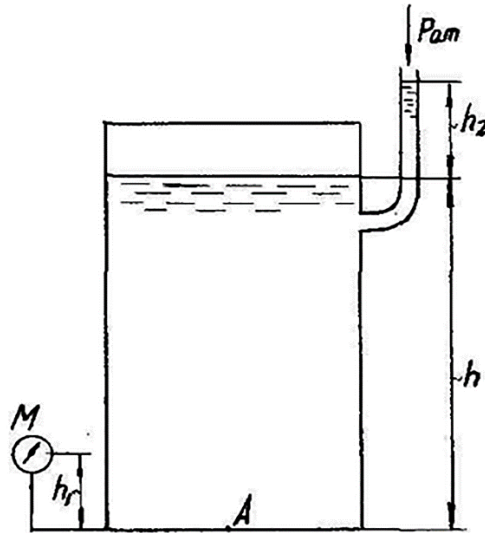


Рисунок А.9 – Схема для решения задачи 13

14. Цилиндрический сосуд, характеризующийся массой $m = (450 + 5j)$ кг, диаметром $D = (550 + 50j)$ мм и высотой $h = (540 + 40j)$ мм, полностью заполнен жидкостью плотностью $(1000 - 30j)$ кг/м³. Данный сосуд опирается на плунжер диаметром $d = (350 + 50j)$ мм, который входит в него на глубину, равную $b = (200 + 20j)$ мм (рис. А.10). Определите показание манометра M и усилие T на верхней крышке сосуда. Трением опоры сосуда о поршень пренебречь.

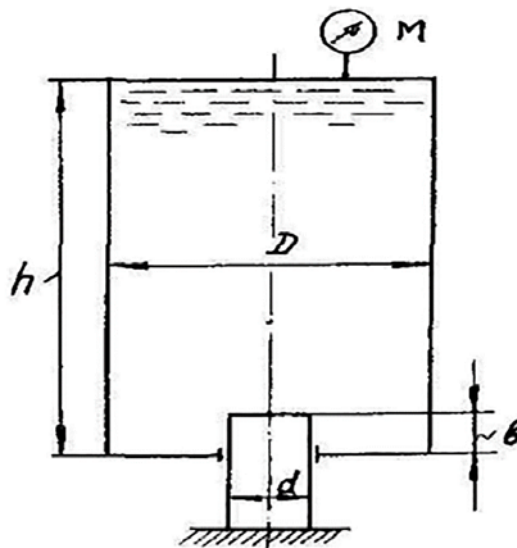


Рисунок А.10 – Схема для решения задачи 14

15. Понтон (рис. А.11) длиной $L = (10 + 0,5j)$ м и массой, составляющей $m_{п} = (5 + 0,4j) \cdot 10^3$ кг, имеет поперечное сечение с размерами $H = (4,1 + 0,1j)$ м, $h = (3,1 + 0,1j)$ м и $b = (9,0 + 0,2j)$ м. Определите максимальную грузоподъемность $m_{гр}$ понтона, если расстояние ватерлинии от палубы $h_1 = (0,20 + 0,01j)$ м. Плотность воды принять равной $1\ 000\ \text{кг/м}^3$.

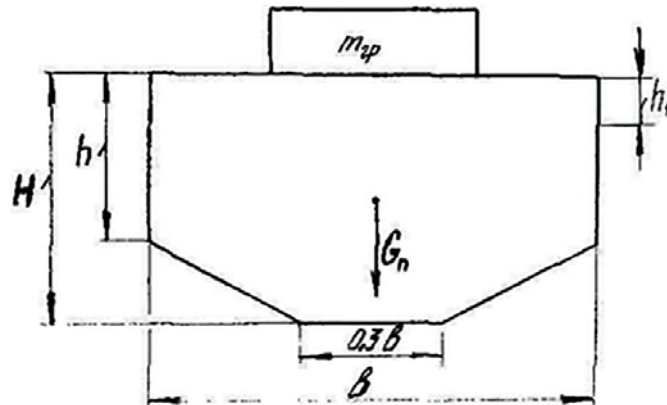


Рисунок А.11 – Схема для решения задачи 15

16. Какую силу необходимо приложить к большему поршню, чтобы система находилась в равновесии (рис. А.12)? Сила, приложенная к меньшему поршню, $P_1 = (140 + 2j)$ Н. Диаметр большого поршня $D_2 = (280 + 10j)$ мм, меньшего – $D_1 = (46 + 2j)$ мм. Разность уровней $h = 30$ см. Внутренняя полость заполнена водой. Внутренний диаметр трубки $d = 10$ мм. Трением поршней и их весом пренебречь. Сколько процентов составляет сила давления столба воды от найденной силы P_2 ?

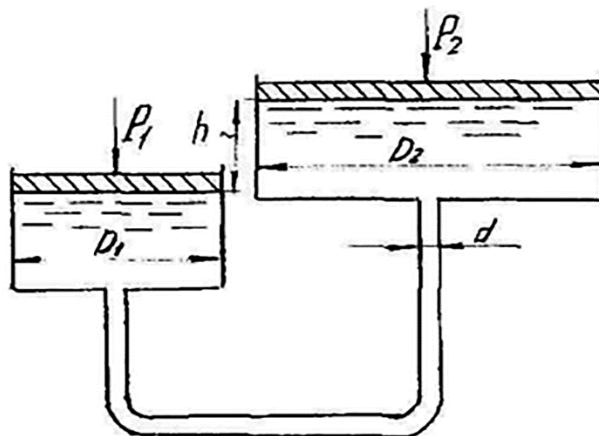


Рисунок А.12 – Схема для решения задачи 16

17. Поршень пружинного гидравлического аккумулятора (рис. А.13) диаметром $D = (230 + 5j)$ мм поднялся на высоту $h = (14 + j)$ мм. Определите жесткость пружины (Н/м), если давление жидкости $p = 1,0$ МПа. Трением между поршнем и цилиндром, а также весом поршня пренебречь.

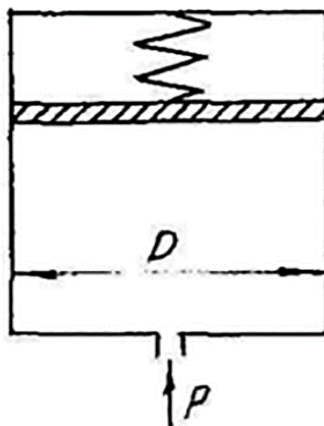


Рисунок А.13 – Схема для решения задачи 17

18. Определите давление масла p_1 , подводимого в поршневую полость гидроцилиндра (рис. А.14), если избыточное давление в штоковой полости составляет $p_2 = (80 + 2j)$ кПа; усилие на штоке $R = (10 + 0,5j)$ кН; сила трения поршня о цилиндр $F = 0,4$ кН. При этом диаметр поршня $D = 125$ мм, а диаметр штока $d = 70$ мм.

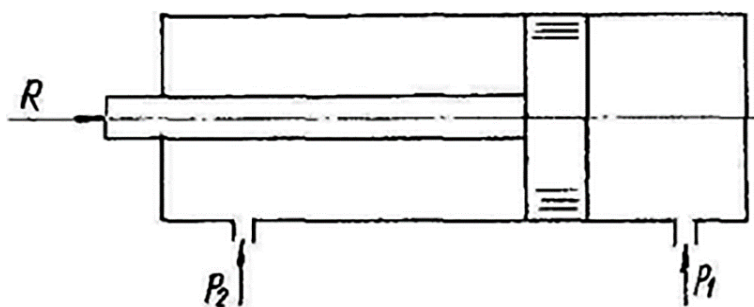


Рисунок А.14 – Схема для решения задачи 18

19. Предварительный натяг пружины дифференциального предохранительного клапана (рис. А.15) составляет $x = (15 + 0,5j)$ мм, жесткость пружины $c = (7 + 0,2j)$ Н/мм. Определите давление жидкости, при котором клапан откроется, если диаметры поршней $D_1 = 25$ мм, $D_2 = 18$ мм. Весом поршней и силой трения пренебречь.

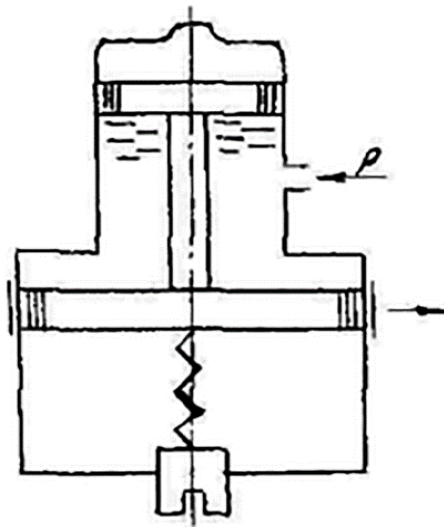


Рисунок А.15 – Схема для решения задачи 19

20. Определите величину и направление силы F , приложенной к штоку поршня для удержания его на месте (рис. А.16). Справа от поршня находится воздух, слева от него и в резервуаре, куда опущен открытый конец трубы, – вода. Показание пружинного манометра составляет $p_m = 0,08$ Мпа. При этом известны значения: $H = 5$ м, $D = (180 + 5j)$ мм и $d = (50 + 5j)$ мм.

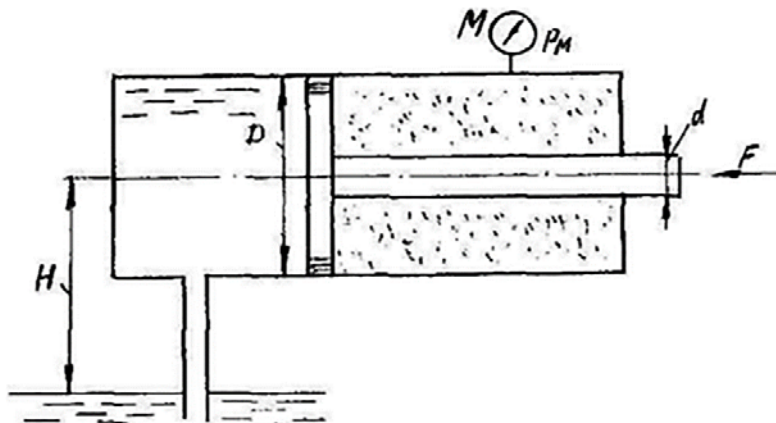


Рисунок А.16 – Схема для решения задачи 20

21. Паровой прямодействующий насос подает воду на высоту, составляющую $H = (40 + 0,2j)$ м (рис. А.17). Определите абсолютное давление пара p , если диаметр парового цилиндра $D = (280 + 2j)$ мм, диаметр насосного цилиндра $d = (140 + 2j)$ мм. Потерями на трение пренебречь.

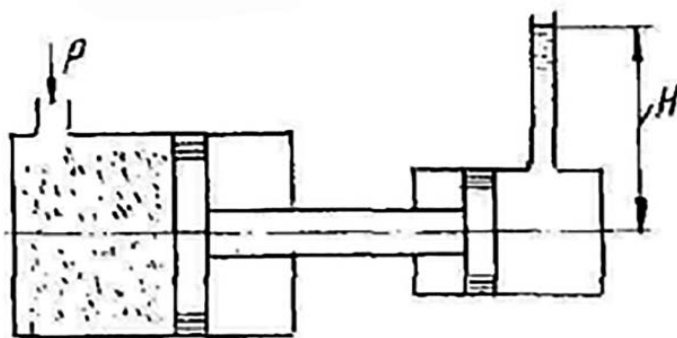


Рисунок А.17 – Схема для решения задачи 21

22. Определите силу давления на плоский прямоугольный затвор, показанный на рисунке А.18. Глубина воды в верхнем бьефе $h_1 = (3 + 0,1j)$ м, в нижнем – $h_2 = (1 + 0,1j)$ м. Ширина затвора $b = 4$ м, высота $H = (3,3 + 0,1j)$ м. Найдите начальное подъемное усилие T , если толщина затвора равна 8 см, удельный вес материала затвора составляет $1,18 \cdot 10^4$ Н/м³, а коэффициент трения затвора о пазы $f = 0,5$.

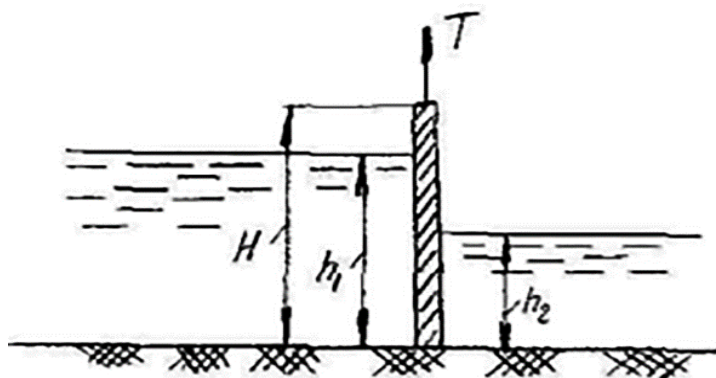


Рисунок А.18 – Схема для решения задачи 22

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ПО ВОДОСНАБЖЕНИЮ И ВОДООТВЕДЕНИЮ

Таблица Б.1 – Варианты индивидуальных заданий по водоснабжению и водоотведению

Номер варианта	Количество этажей	Параметры	Степень благоустройства здания	Высота этажа, м	Высота подвала	Отметка пола первого этажа	Отметка городского водопровода	Отметка земли у здания, м	Отметка городской канализации, м	Глубина промерзания, м	Длина ввода Лв, м	Голшина перекрытия, м	Вариант типового этажа
0	4	40	централизованное горячее водоснабжение	3,0	2,1	100	97,8	99,5	95,5	2,5	20	0,25	1
1	5	45		2,0	1,9	11	8,0	10,4	7,1	2,8	25	0,3	2
2	6	43	с газовыми водонагревателями	3,1	2,2	22	19,0	21,5	18,0	2,9	15	0,35	3
3	4	44		3,2	2,0	33	29,8	32,4	28,8	3,0	16	0,37	4
4	5	41	с быстро действующими водонагревателями	2,8	2,1	44	40,8	43,3	39,9	2,5	17	0,25	5
5	6	46		2,9	1,9	55	52,8	54,4	51,0	2,6	18	0,3	1
6	4	48	с быстро действующими водонагревателями	3,0	2,0	66	63	65,5	61,9	2,7	19	0,35	2
7	5	42		3,1	2,2	77	73,8	76,4	73,0	2,8	20	0,25	3
8	6	47	централизованное горячее водоснабжение	2,6	1,9	88	84,3	87,5	84,3	2,9	21	0,3	4
9	4	49		2,9	2,0	99	96,0	98,4	96,0	3,0	23	0,35	5
10	4	45	с газовыми водонагревателями	3,0	2,1	100	97,8	99,5	95,5	2,5	20	0,25	2
11	8	48		2,0	1,9	11	8,0	10,4	7,1	2,8	25	0,3	1
12	7	44	с быстро действующими водонагревателями	3,1	2,2	22	19,0	21,5	18,0	2,9	15	0,35	4
13	6	49		3,2	2,0	33	29,8	32,4	28,8	3,0	16	0,37	5
14	5	42	с газовыми водонагревателями	2,8	2,1	44	40,8	43,3	39,9	2,5	17	0,25	1
15	9	40		2,9	1,9	55	52,8	54,4	51,0	2,6	18	0,3	3
16	5	46	с быстро действующими водонагревателями	3,0	2,0	66	63	65,5	61,9	2,7	19	0,35	4
17	8	43		3,1	2,2	77	73,8	76,4	73,0	2,8	20	0,25	2
18	9	47	с быстро действующими водонагревателями	2,6	1,9	88	84,3	87,5	84,3	2,9	21	0,30	5
19	7	41		2,9	2,0	99	96,0	98,4	96,0	3,0	23	0,35	3

Продолжение таблицы Б.1

Номер варианта	Количество этажей	Гарантийный напор, м	Степень благоустройства здания	Высота этажа, м	Высота подвала	Отметка пола первого этажа	Отметка городского водопровода	Отметка земли у здания, м	Отметка городской канализации, м	Глубина промерзания, м	Длина ввода L _{вв} , м	Толщина перекрытия, м	Вариант типового этажа	
20	8	40	Централизованное горячее водоснабжение	3,0	2,1	100	97,8	99,5	95,5	2,5	20	0,25	1	
21	7	42		2,0	1,9	11	8,0	10,4	7,1	2,8	25	0,30	4	
22	6	47		3,1	2,2	22	19,0	21,5	18,0	2,9	15	0,35	5	
23	5	41		3,2	2,0	33	29,8	32,4	28,8	3,0	16	0,37	1	
24	9	48		2,8	2,1	44	40,8	43,3	39,9	2,5	17	0,25	3	
25	5	43	с газовыми водонагревателями	2,9	1,9	55	52,8	54,4	51,0	2,6	18	0,30	4	
26	8	46		3,0	2,0	66	63	65,5	61,9	2,7	19	0,35	2	
27	9	45		с быстрос действующими	3,1	2,2	77	73,8	76,4	73,0	2,8	20	0,25	5
28	7	49		2,6	1,9	88	84,3	87,5	84,3	2,9	21	0,3	3	
29	4	44		водонагревателями	2,9	2,0	99	96,0	98,4	96,0	3,0	23	0,35	2
30	6	46	Централизованное горячее водоснабжение	3,0	2,1	100	97,8	99,5	95,5	2,5	20	0,25	4	
31	4	43		2,0	1,9	11	8,0	10,4	7,1	2,8	25	0,30	5	
32	8	48		3,1	2,2	22	19,0	21,5	18,0	2,9	15	0,35	1	
33	7	41		3,2	2,0	33	29,8	32,4	28,8	3,0	16	0,37	3	
34	9	47		2,8	2,1	44	40,8	43,3	39,9	2,5	17	0,25	4	
35	5	40	с газовыми водонагревателями	2,9	1,9	55	52,8	54,4	51,0	2,6	18	0,30	2	
36	8	44		3,0	2,0	66	63	65,5	61,9	2,7	19	0,35	5	
37	6	49		с быстрос действующими	3,1	2,2	77	73,8	76,4	73,0	2,8	20	0,25	3
38	4	45		водонагревателями	2,6	1,9	88	84,3	87,5	84,3	2,9	21	0,30	2
39	7	42		2,9	2,0	99	96,0	98,4	96,0	3,0	23	0,35	4	
40	9	44	Централизованное горячее водоснабжение	3,0	2,1	100	97,8	99,5	95,5	2,5	20	0,25	5	
41	8	41		2,0	1,9	11	8,0	10,4	7,1	2,8	25	0,30	1	
42	7	49		3,1	2,2	22	19,0	21,5	18,0	2,9	15	0,35	3	
43	6	47		2,8	2,1	33	29,8	32,4	28,8	3,0	16	0,37	4	

Продолжение таблицы Б.1

Номер варианта	Количество этажей	Латинный вариант	Степень благоустройства здания	Высота этажа, м	Высота подвала	Отметка пола первого этажа	Отметка городского водопровода	Отметка земли у здания, м	Отметка городской канализации, м	Льдина промерзания, м	Длина ввода ЛВ, м	Голщина перекрытия, м	Вариант типového этажа
44	5	43	с газовыми водонагревателями	2,8	2,1	44	40,8	43,3	39,9	2,5	17	0,25	2
45	4	46		2,9	1,9	55	52,8	54,4	51,0	2,6	18	0,30	5
46	7	40		3,0	2,0	66	63	65,5	61,9	2,7	19	0,35	3
47	4	42	с быстро действующими водонагревателями	3,1	2,2	77	73,8	76,4	73,0	2,8	20	0,25	2
48	5	48		2,6	1,9	88	84,3	87,5	84,3	2,9	21	0,30	4
49	6	45		2,9	2,0	99	96,0	98,4	96,0	3,0	23	0,35	3
50	9	44	централизованное горячее водоснабжение	2,0	2,1	100	98,8	99,5	95,5	2,5	21	0,25	4
51	8	41		3,0	2,0	55	8,0	10,4	5,1	2,8	15	0,32	2
52	7	49		3,1	2,2	22	19,0	23,5	18,0	2,9	25	0,36	1
53	6	47	с газовыми водонагревателями	2,8	1,9	44	27,8	35,4	26,8	3,0	16	0,38	5
54	5	43		2,8	2,0	33	40,8	41,3	39,9	2,5	18	0,27	3
55	4	46		2,6	1,9	11	55,8	52,4	54,0	2,6	19	0,31	5
56	7	40	с быстро действующими водонагревателями	3,0	2,1	66	68	65,5	63,9	2,7	17	0,33	2
57	4	42		3,1	2,2	88	76,8	77,4	73,0	2,8	22	0,28	3
58	5	48		2,8	2,1	77	82,3	86,5	82,3	2,9	23	0,29	4
59	6	45	централизованное горячее водоснабжение	3,0	1,9	99	94,0	93,4	96,0	3,0	20	0,37	5
60	7	43		3,2	2,0	100	96,8	98,5	93,5	2,4	25	0,35	3
61	6	41		3,1	2,2	22	82,0	11,4	5,1	2,7	20	0,20	5
62	8	49	с газовыми водонагревателями	2,0	1,9	44	29,0	24,5	38,0	2,6	16	0,27	2
63	4	45		3,0	2,1	11	19,8	34,4	18,8	2,9	15	0,36	1
64	6	44		3,0	2,0	33	20,8	53,3	29,9	2,1	18	0,27	4
65	5	48	с газовыми водонагревателями	2,9	1,9	77	32,8	64,4	41,0	2,7	17	0,32	2
66	7	40		2,8	2,2	88	73	55,5	71,9	2,8	19	0,33	5

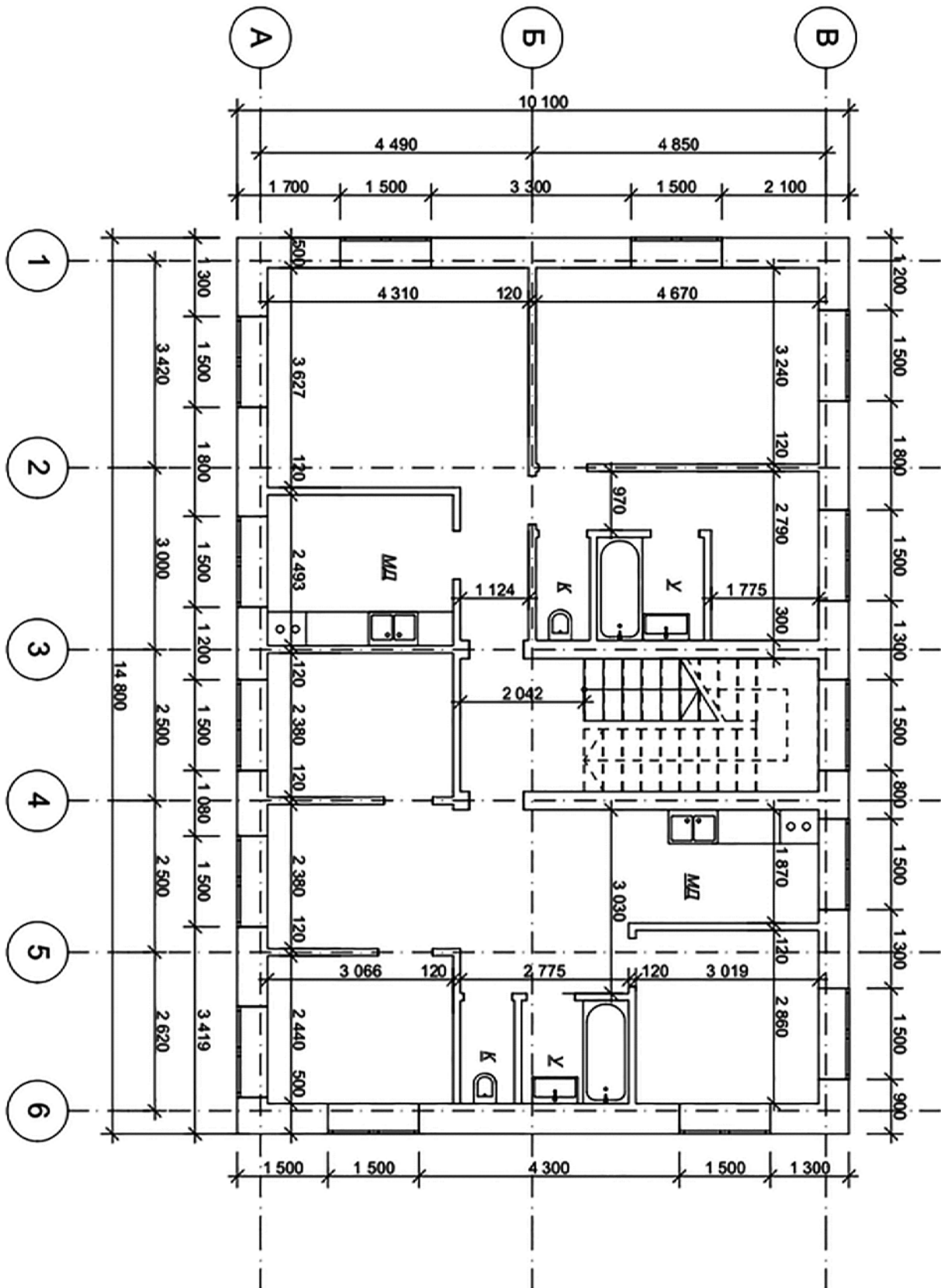
Продолжение таблицы Б.1

Номер варианта	Количество этажей	Гарантийный напор, м	Степень благоустройства здания	Высота этажа, м	Высота подвала	Отметка пола первого этажа	Отметка городского водопровода	Отметка земли у здания, м	Отметка городской канализации, м	Глубина промерзания, м	Длина ввода ЛВВ, м	Толщина перекрытия, м	Вариант типового этажа
67	8	42	с б/стро действующими водонагревателями	3,1	2,1	55	63,8	86,4	63,0	2,5	21	0,22	3
68	4	46	с б/стро действующими водонагревателями	2,9	2,2	66	74,3	67,5	74,3	3,0	20	0,33	2
69	6	47	с б/стро действующими водонагревателями	2,6	1,9	99	97,0	96,4	94,0	2,9	23	0,35	1
70	8	41	с б/стро действующими водонагревателями	2,0	2,1	100	95,8	98,5	95,5	2,5	15	0,25	4
71	4	45	с б/стро действующими водонагревателями	2,9	1,9	55	80,0	21,4	7,1	2,4	16	0,30	2
72	7	49	с б/стро действующими водонагревателями	3,0	2,2	33	19,0	22,5	48,0	2,7	25	0,26	3
73	6	46	с б/стро действующими водонагревателями	3,1	2,0	77	29,8	24,4	28,8	2,6	20	0,25	5
74	7	44	с б/стро действующими водонагревателями	3,1	2,1	66	30,8	63,3	39,9	2,5	17	0,37	1
75	4	48	с б/стро действующими водонагревателями	2,8	2,0	11	22,8	54,4	51,0	2,6	18	0,22	3
76	5	47	с б/стро действующими водонагревателями	2,9	2,2	88	7,3	45,5	61,9	2,7	21	0,32	2
77	6	42	с б/стро действующими водонагревателями	2,6	2,0	44	73,8	66,4	84,3	2,4	19	0,33	5
78	8	40	с б/стро действующими водонагревателями	2,9	2,2	22	84,3	87,5	96,0	2,8	23	0,23	4
79	7	43	с б/стро действующими водонагревателями	3,0	2,1	98	98,0	94,4	94,0	2,5	20	0,32	3
80	8	44	с б/стро действующими водонагревателями	3,1	2,1	100	97,8	95,5	94,5	2,1	18	0,36	2
81	4	45	с б/стро действующими водонагревателями	3,2	1,9	33	72,0	21,4	10,1	2,6	16	0,24	5
82	7	42	с б/стро действующими водонагревателями	3,0	2,0	66	39,0	14,5	28,0	2,6	20	0,22	1
83	5	40	с б/стро действующими водонагревателями	2,0	2,2	22	29,8	54,4	38,8	2,1	25	0,26	4
84	8	48	с б/стро действующими водонагревателями	3,1	2,1	11	10,8	33,3	49,9	2,9	18	0,37	3
85	6	49	с б/стро действующими водонагревателями	2,8	2,0	88	42,8	54,4	21,0	2,8	16	0,35	5
86	4	47	с б/стро действующими водонагревателями	2,9	2,2	77	6,3	65,5	61,9	2,7	17	0,23	2
87	5	46	с б/стро действующими водонагревателями	2,8	2,0	99	53,8	66,4	73,0	3,0	19	0,32	1
88	7	41	с б/стро действующими водонагревателями	2,9	2,1	44	84,3	87,5	94,3	2,5	15	0,38	4
89	8	43	с б/стро действующими водонагревателями	3,1	2,2	55	96,0	92,4	74,0	2,8	24	0,27	3

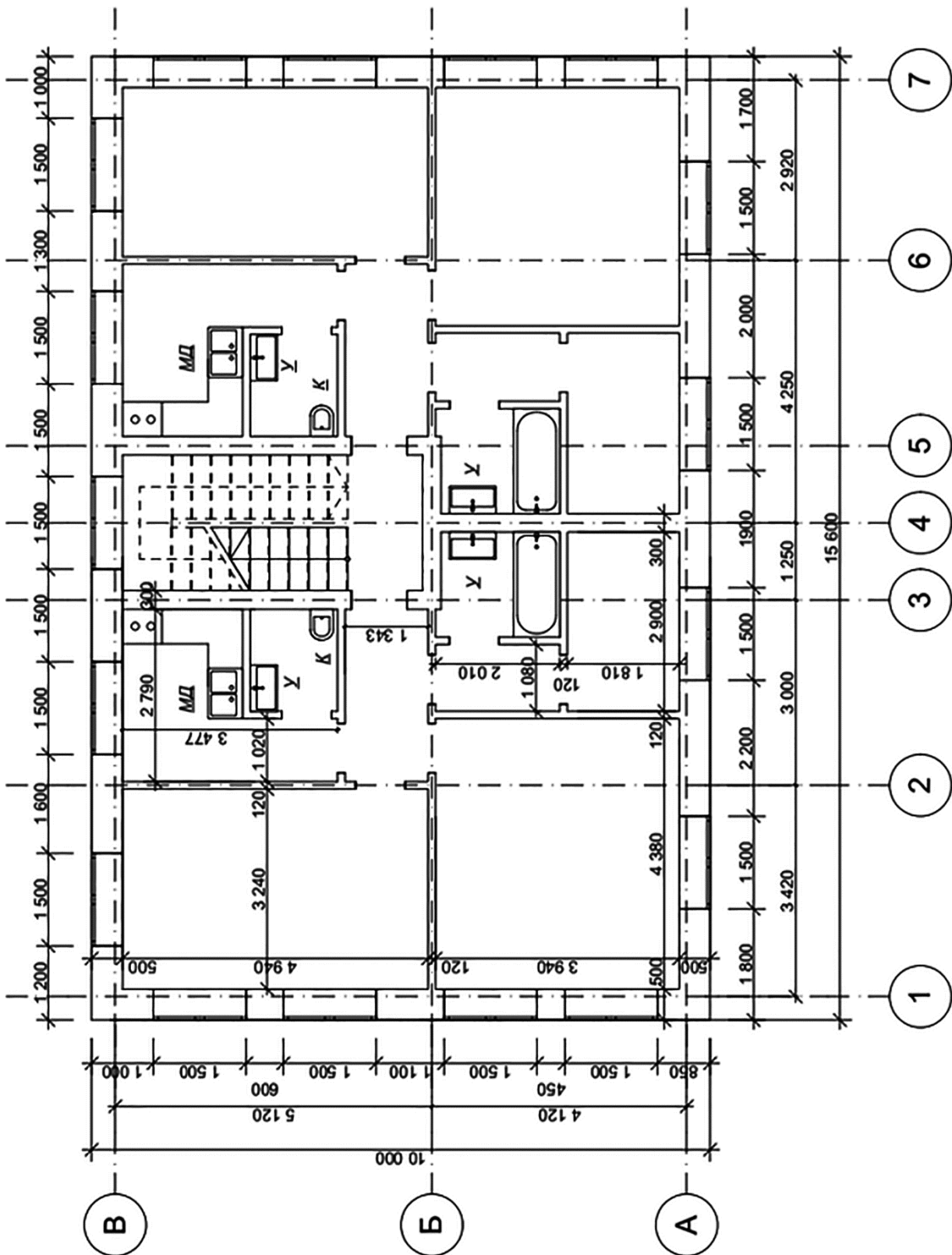
Продолжение таблицы Б.1

Номер варианта	Количество этажей	Гарантийный период, м	Степень благоустройства здания	Высота этажа, м	Высота подвала	Отметка пола первого этажа	Отметка городского водопровода	Отметка земли у здания, м	Отметка городской канализации, м	Глубина промерзания, м	Длина вала ЛВ, м	Толщина перекрытия, м	Вариант типового этажа
90	6	42	централизованное	3,1	2,2	98	92,8	94,5	83,5	2,5	18	0,33	4
91	7	48		3,2	2,0	44	62,0	31,4	11,1	2,8	17	0,21	2
92	4	41	горячее водоснабжение	3,0	2,1	22	39,0	14,5	28,0	2,4	20	0,26	5
93	8	46		2,0	1,9	77	29,8	24,4	38,8	2,7	15	0,34	3
94	5	40	с газовыми водонагревателями	2,9	1,9	88	40,8	63,3	19,9	2,2	25	0,25	1
95	6	49		3,0	2,0	11	52,8	54,4	51,0	2,9	20	0,34	5
96	8	44	с быстро действующими водонагревателями	2,8	2,1	33	63	75,5	41,9	2,6	19	0,35	3
97	7	45		2,9	2,2	99	73,8	56,4	73,0	2,3	16	0,24	1
98	6	47	водонагревателями	3,1	1,9	66	34,3	87,5	64,3	2,0	23	0,32	4
99	4	43		3,0	2,1	55	87,0	66,4	74,0	3,0	21	0,21	2

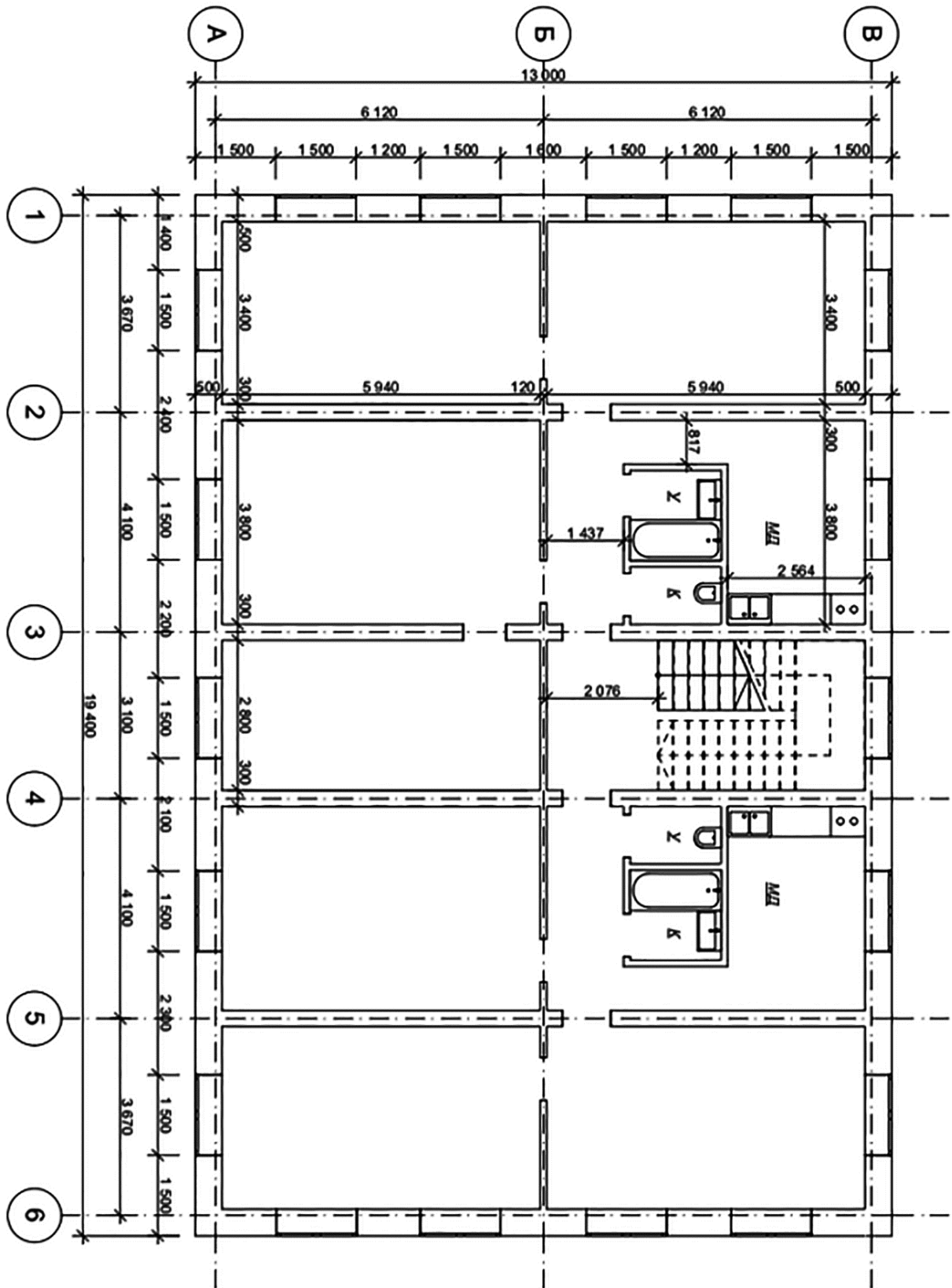
План типового этажа (вариант 1)



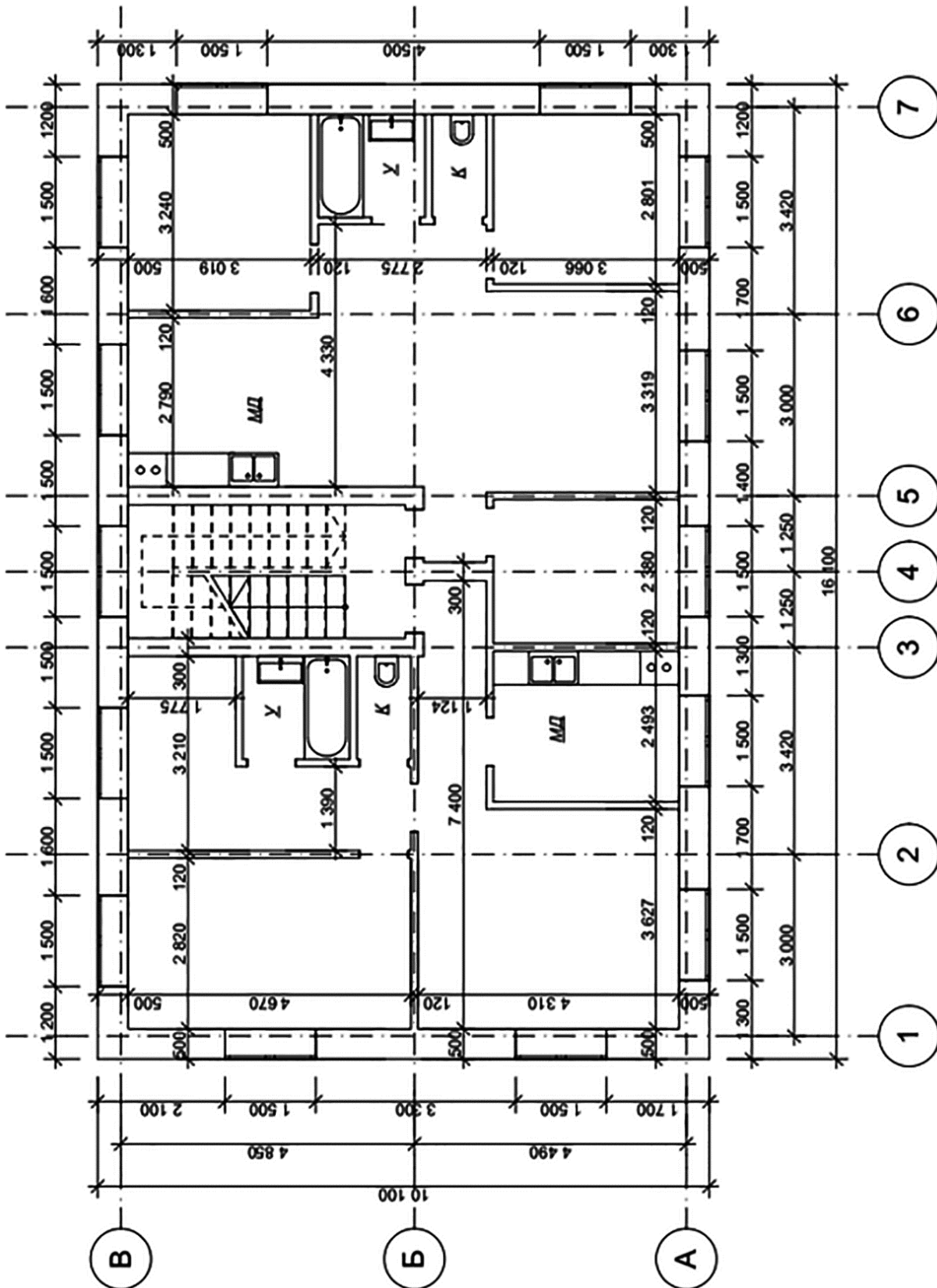
План типового этажа (вариант 2)



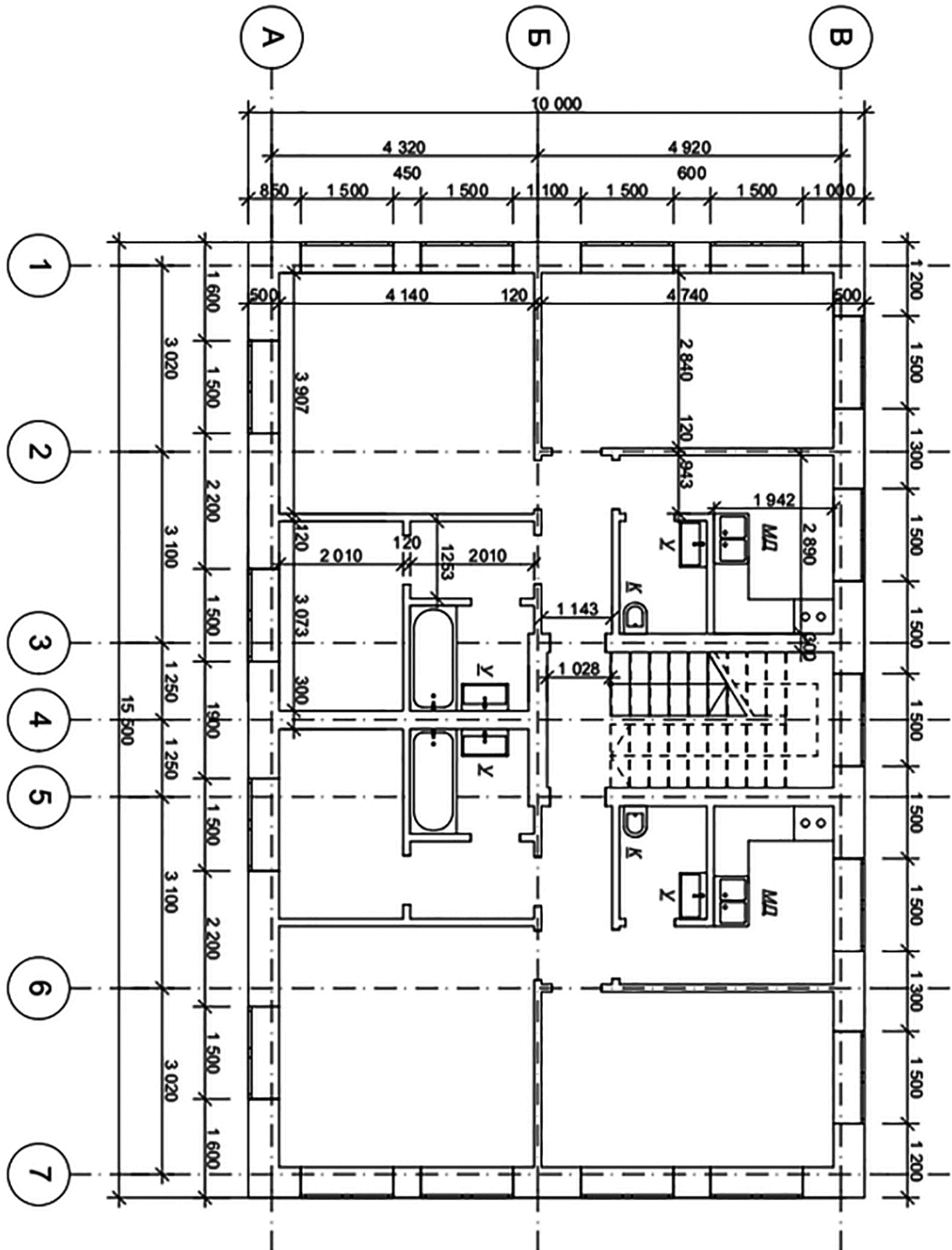
План типового этажа (вариант 3)



План типового этажа (вариант 4)



План типового этажа (вариант 5)



ПРИЛОЖЕНИЕ В

**СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ
ПО ВОДОСНАБЖЕНИЮ И ВОДООТВЕДЕНИЮ**

Таблица В.1 – Расходы воды и стоков санитарными приборами

Санитарные приборы	Секундный расход воды, л/с			Часовой расход воды, л /ч			Свободный напор (H_f), м	Сток от прибора (q_0^b), л/с	Минимальные диаметры условного прохода, мм	
	общий (q_0^{tot})	холодной (q_0^c)	горячей (q_0^h)	общий	холодной	горячей			под-водки	отвода
1. Умывальник с водоразборным краном	0,1	0,1	–	30	30	–	2	0,15	10	32
2. То же, со смесителем	0,12	0,09	0,09	60	40	40	2	0,15	10	32
3. Мойка со смесителем	0,12	0,09	0,09	80	60	60	2	0,6	10	40
4. Ванна со смесителем	0,25	0,18	0,18	300	200	200	3	0,8	10	40
5. Ванна с водогрейной колонкой и смесителем	0,22	0,22	–	300	300	–	3	1,1	15	40
6. Унитаз со смывным бачком	0,1	0,1	–	83	83	–	2	1,6	8	85
7. Унитаз со смывным краном	1,4	1,4	–	81	81	–	4	1,4	–	85
8. Поливочный кран	0,3	0,3	0,2	1 080	1 080	720	2	0,3	15	–

Таблица В.2 – Нормы расхода воды потребителями в жилых зданиях
В расчете на одного жителя

Водопотребители	Нормы расхода воды, л						Расход воды прибором, (q_0) л/с (л/час)	
	в средние сутки		в сутки наибольшего водопотребления		в час наибольшего водопотребления (q_{hru}), л/ч		общий	холодной или горячей
	общая (с горячей)	горячая	общая (с горячей)	горячая	общая (с горячей)	горячая		
<i>Жилые дома квартирного типа</i>								
1. С водопроводом и канализацией без ванн	95		120		6,5		0,2 (50)	0,2 (50)
2. С водопроводом, с канализацией и ваннами с водонагревателями на твердом топливе	150		180		8,1		0,3 (300)	0,3 (300)
3. С водопроводом, канализацией и ваннами с газовыми водонагревателями	190		225		10,5		0,3 (300)	0,3 (300)
4. С быстродействующими газовыми водонагревателями	210		250		13,0		0,3 (300)	0,3 (300)
5. С централизованным горячим водоснабжением, умывальниками, мойками и ванными	250	105	300	120	15,6	10	0,3 (300)	0,2 (200)

Таблица В.3 – Значение коэффициентов a при $P < 0,1$ и любом числе N

<i>NP</i>	<i>a</i>	<i>NP</i>	<i>a</i>	<i>NP</i>	<i>a</i>	<i>NP</i>	<i>a</i>	<i>NP</i>	<i>a</i>
0,015	0,200	0,058	0,286	0,190	0,439	0,64	0,767	2,1	1,479
0,016	0,205	0,060	0,289	0,195	0,444	0,66	0,779	2,2	1,521
0,017	0,207	0,062	0,292	0,2	0,449	0,68	0,791	2,3	1,563
0,018	0,210	0,064	0,295	0,21	0,458	0,70	0,803	2,4	1,604
0,019	0,212	0,065	0,298	0,22	0,467	0,72	0,815	2,5	1,644
0,020	0,215	0,068	0,301	0,23	0,476	0,74	0,826	2,6	1,684
0,021	0,217	0,070	0,304	0,24	0,485	0,78	0,838	2,7	1,724
0,022	0,219	0,072	0,307	0,25	0,493	0,78	0,849	2,8	1,763
0,023	0,222	0,074	0,309	0,26	0,502	0,80	0,860	2,9	1,802
0,024	0,224	0,076	0,312	0,27	0,510	0,82	0,872	3,0	1,840
0,025	0,226	0,078	0,315	0,28	0,518	0,84	0,883	3,1	1,879
0,026	0,228	0,080	0,318	0,29	0,526	0,86	0,894	3,2	1,917
0,027	0,230	0,082	0,320	0,30	0,534	0,88	0,905	3,3	1,954
0,028	0,233	0,084	0,323	0,31	0,542	0,90	0,916	3,4	1,991
0,029	0,235	0,086	0,326	0,32	0,550	0,92	0,927	3,5	2,029
0,030	0,237	0,088	0,328	0,33	0,558	0,94	0,937	3,6	2,065
0,031	0,239	0,090	0,331	0,34	0,565	0,96	0,948	3,7	2,102
0,032	0,241	0,092	0,333	0,35	0,573	0,98	0,959	3,8	2,138
0,033	0,243	0,094	0,336	0,36	0,580	1,00	0,969	3,9	2,174
0,034	0,245	0,096	0,338	0,37	0,588	1,05	0,995	4,0	2,210
0,035	0,247	0,098	0,341	0,38	0,595	1,10	1,021	4,1	2,246
0,036	0,249	0,100	0,343	0,39	0,602	1,15	1,046	4,2	2,281
0,037	0,250	0,105	0,349	0,40	0,610	1,20	1,071	4,3	2,317
0,038	0,252	0,110	0,355	0,41	0,617	1,25	1,096	4,4	2,352
0,039	0,254	0,115	0,361	0,42	0,624	1,30	1,120	4,5	2,386
0,040	0,256	0,120	0,367	0,43	0,631	1,35	1,144	4,6	2,421
0,041	0,258	0,125	0,373	0,44	0,638	1,40	1,168	4,7	2,456
0,042	0,259	0,130	0,378	0,45	0,645	1,45	1,191	4,8	2,490
0,043	0,261	0,135	0,384	0,46	0,652	1,50	1,215	4,9	2,524
0,044	0,263	0,140	0,389	0,47	0,658	1,55	1,238	5,0	2,558
0,045	0,265	0,145	0,394	0,48	0,665	1,60	1,261	5,1	2,592
0,046	0,266	0,150	0,399	0,49	0,672	1,65	1,283	5,2	2,626
0,047	0,268	0,155	0,405	0,50	0,678	1,70	1,306	5,3	2,660
0,048	0,270	0,160	0,410	0,52	0,692	1,75	1,328	5,4	2,693
0,049	0,271	0,165	0,415	0,54	0,704	1,80	1,350	5,5	2,726
0,050	0,273	0,170	0,420	0,56	0,717	1,85	1,372	5,6	2,760
0,052	0,276	0,175	0,425	0,58	0,730	1,90	1,394	5,7	2,793
0,054	0,278	0,180	0,430	0,60	0,742	1,95	1,416	5,8	2,826
0,056	0,283	0,185	0,435	0,62	0,755	2,00	1,437	5,9	2,858

Таблица В.4 – Данные для подбора крыльчатых и турбинных счетчиков воды

Диаметр условного прохода, мм	Расход воды при потере напора 2,5 м, м ³ /ч	Значение S_v для расхода воды		Коэффициент местного сопротивления
		м ³ /ч	л/с	
15	1,5	1,11	14,40	8,8
20	2,5	0,40	5,18	10
25	3,5	0,20	2,60	14
32	5	0,10	1,30	12,7
40	8	0,039	0,50	15,7
50	15	0,011	0,143	10,9
65	40	62,50	810	0,75
80	70	20,40	264	1,3
100	130	5,90	76,6	1,5
150	315	1,01	13	0,8
200	600	0,27	3,50	0,7
250	850	0,14	1,80	0,85

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Таблица Г.1 – Данные для гидравлического расчета стальных труб внутреннего водопровода

Расход, л/с	Диаметр (d), мм																				
	15		20		25		32		40		50		60		70		80		100		
	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	V	1 000i	
0,08	0,47	66,9	0,25	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,1	0,59	100,2	0,31	21,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,12	0,71	139,9	0,37	29,2	0,22	8,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,2	1,18	360,5	0,62	73,5	0,37	20,9	0,21	5,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3	1,77	807,0	0,94	154,9	0,56	43,4	0,31	10,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4	2,36	1 435	1,25	265,6	0,75	73,5	0,42	17,5	8,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	2,95	2 242	1,56	414,9	0,93	110,9	0,52	26,2	13,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,6	-	-	1,87	597,5	1,12	155,8	0,63	36,5	18,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,7	-	-	2,18	813,3	1,31	209,6	0,73	48,4	24,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,8	-	-	2,50	1 062	1,50	273,8	0,84	61,9	31,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,9	-	-	2,81	1 344	1,68	346,5	0,94	77,7	38,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	-	-	-	-	1,87	427,8	1,05	93,6	47,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,2	-	-	-	-	2,24	616	1,25	132	66,1	0,57	18,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,4	-	-	-	-	2,62	838,5	1,46	179,7	88,2	0,66	23,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,6	-	-	-	-	2,99	1 095	1,67	234,7	113,7	0,75	30,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,8	-	-	-	-	-	-	1,88	297,1	143,9	0,85	37,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-	-	-	2,09	366,8	177,7	0,94	45,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	215,0	1,04	54,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,4	-	-	-	-	-	-	-	-	255,8	1,13	64,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	300,2	1,22	74,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	348,2	1,32	86,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	399,7	1,41	99,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,2	-	-	-	-	-	-	-	-	454,8	1,51	113,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	513,4	1,60	128,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	575,6	1,70	143,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,79	160,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,88	177,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,12	224,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,35	277,0	-	-	-	-	-	-	-	-
5,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,64	347,4	1,44	75,2	1,01	29,9	1,01	29,9	0,59	7,86
6,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,83	398,8	1,61	94,3	1,13	37,0	1,13	37,0	0,65	9,67
7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,73	108,8	1,21	42,0	1,21	42,0	0,71	11,00
8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,02	147,4	1,41	57,2	1,41	57,2	0,82	14,60
9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,30	192,6	1,61	74,7	1,61	74,7	0,92	18,70
10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,59	234,7	1,81	94,5	1,81	94,5	1,06	23,20
10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,88	300,9	2,01	116,7	2,01	116,7	1,18	28,30

Примечание: V – скорость, м/с; 1 000i – гидравлический уклон (потери напора на единицу длины) при условном проходе труб, мм.

Таблица Г.2 – Данные для гидравлического расчета горизонтальных участков внутренней канализации из чугунных труб при $v/h/d > 0,6$

Наполнение	Расход (q), л/с (в числителе) скорость (v), м/с (в знаменателе) при уклонах						
	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04
<i>d = 100 мм</i>							
0,3							<u>2,17</u> 1,09
0,4				<u>2,94</u> 1,00	<u>3,22</u> 1,10	<u>3,48</u> 1,18	<u>3,71</u> 1,27
0,5		<u>3,36</u> 0,85	<u>3,87</u> 0,99	<u>4,35</u> 1,11	<u>4,76</u> 1,21	<u>5,14</u> 1,31	<u>5,50</u> 1,40
0,6		<u>4,51</u> 0,92	<u>5,21</u> 1,06	<u>5,83</u> 1,18	<u>6,38</u> 1,30	<u>6,90</u> 1,40	<u>7,37</u> 1,50
0,7	<u>4,53</u> 0,77	<u>5,61</u> 0,96	<u>6,49</u> 1,11	<u>7,26</u> 1,24	<u>7,95</u> 1,35	<u>8,59</u> 1,46	<u>9,18</u> 1,56
0,8	<u>5,29</u> 0,79	<u>6,55</u> 0,97	<u>7,58</u> 1,13	<u>8,47</u> 1,26	<u>9,27</u> 1,38	<u>10,02</u> 1,49	<u>10,71</u> 1,59
0,9	<u>5,77</u> 0,78	<u>7,14</u> 0,96	<u>8,26</u> 1,11	<u>9,24</u> 1,24	<u>10,11</u> 1,36	<u>10,93</u> 1,47	<u>11,68</u> 1,57
<i>d = 150 мм</i>							
0,3				<u>5,01</u> 1,12	<u>5,49</u> 1,23	<u>5,92</u> 1,33	<u>6,34</u> 1,42
0,4		<u>6,66</u> 1,01	<u>7,69</u> 1,16	<u>8,60</u> 1,30	<u>9,42</u> 1,43	<u>10,15</u> 1,54	<u>10,88</u> 1,65
0,5	<u>8,04</u> 0,91	<u>9,86</u> 1,12	<u>11,38</u> 1,29	<u>12,72</u> 1,44	<u>13,94</u> 1,58	<u>15,02</u> 1,70	<u>16,10</u> 1,82
0,6	<u>10,79</u> 0,97	<u>13,23</u> 1,19	<u>15,26</u> 1,38	<u>17,06</u> 1,54	<u>18,70</u> 1,54	<u>20,15</u> 1,82	<u>21,59</u> 1,95
0,7	<u>13,43</u> 1,02	<u>16,46</u> 1,25	<u>19,00</u> 1,44	<u>21,24</u> 1,61	<u>23,28</u> 1,76	<u>25,08</u> 1,90	<u>26,88</u> 2,03
0,8	<u>15,68</u> 1,03	<u>19,21</u> 1,27	<u>22,18</u> 1,46	<u>24,79</u> 1,64	<u>27,17</u> 1,79	<u>29,27</u> 1,93	<u>31,37</u> 2,07
0,9	<u>17,10</u> 1,02	<u>20,96</u> 1,25	<u>24,19</u> 1,44	<u>27,04</u> 1,61	<u>29,63</u> 1,77	<u>31,92</u> 1,91	<u>34,21</u> 2,04
1,0	<u>16,08</u> 0,98	<u>19,72</u> 1,12	<u>22,76</u> 1,29	<u>25,45</u> 1,44	<u>27,89</u> 1,58	<u>30,04</u> 1,70	<u>32,20</u> 1,82
<i>d = 200 мм</i>							
0,3			<u>9,61</u> 1,21	<u>10,75</u> 1,36	<u>11,76</u> 1,48	<u>12,72</u> 1,60	<u>13,62</u> 1,72
0,4	<u>11,67</u> 0,99	<u>14,27</u> 1,22	<u>16,48</u> 1,40	<u>18,42</u> 1,57	<u>20,17</u> 1,72	<u>21,80</u> 1,86	<u>23,35</u> 1,99
0,5	<u>17,28</u> 1,10	<u>21,13</u> 1,34	<u>24,39</u> 1,55	<u>27,27</u> 1,74	<u>29,85</u> 1,90	<u>32,26</u> 2,05	<u>34,56</u> 2,20

Продолжение таблицы Г.2

Наполнение	Расход (q), л/с (в числителе) скорость (v), м/с (в знаменателе) при уклонах						
	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04
$d = 200 \text{ мм}$							
0,6	<u>23,17</u> 1,18	<u>28,34</u> 1,44	<u>32,72</u> 1,66	<u>36,57</u> 1,86	<u>40,03</u> 2,03	<u>43,27</u> 2,20	<u>46,35</u> 2,35
0,7	<u>28,85</u> 1,23	<u>35,27</u> 1,50	<u>40,73</u> 1,73	<u>45,53</u> 1,94	<u>49,83</u> 2,12	<u>53,87</u> 2,29	<u>57,70</u> 2,46
0,8	<u>33,67</u> 1,25	<u>41,17</u> 1,53	<u>47,53</u> 1,76	<u>53,14</u> 1,97	<u>58,16</u> 2,16	<u>62,87</u> 2,33	<u>67,34</u> 2,50
0,9	<u>36,72</u> 1,23	<u>44,90</u> 1,51	<u>51,84</u> 1,74	<u>57,95</u> 1,95	<u>63,43</u> 2,13	<u>68,57</u> 2,30	<u>73,43</u> 2,47

Учебное издание

Молчанова Татьяна Геннадьевна
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

ВОДОСНАБЖЕНИЕ И ВОДООТВЕДЕНИЕ
С ОСНОВАМИ ГИДРАВЛИКИ

Учебное пособие

Подписано в печать 30.01.2025 г.
Формат 60×90/16. Уч.-изд. л – 5,12. Усл. печ. л. – 11,33.
Тираж по требованию. Заказ 128.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

