

Министерство сельского хозяйства РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пермская государственная сельскохозяйственная академия  
имени академика Д.Н. Прянишникова»

# **Решения задач размещены на сайте [zadachi24.ru](http://zadachi24.ru)**

Кафедра технологического  
и энергетического оборудования

В.С. Кошман, И.П. Машкарева

## **ГИДРАВЛИКА**

Учебное пособие по решению задач  
и задания для расчетно-графической работы

Пермь  
ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА  
2012

УДК 532.1 ÷ 532.5.032  
М 383

Рецензент:

профессор кафедры технического сервиса, автомобилей и тракторов  
кандидат технических наук, профессор А.Т. Манташов

Учебное пособие разработали доцент Кошман В.С. и старший преподаватель Машкарева И.П. в соответствии со стандартом подготовки по направлениям бакалавриата:

110800 «Агроинженерия»

280700 «Техносферная безопасность»

190600 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»,

с учетом примерной программы дисциплины «Гидравлика», рекомендованной учебно-методическим объединением вузов по агроинженерному образованию.

Учебное пособие предназначено для студентов инженерного факультета и факультета заочного обучения, изучающих гидравлику. Может быть полезно студентам-выпускникам, выполняющим выпускные квалификационные работы.

Рассмотрено на заседании кафедры «Технологическое и энергетическое оборудование» (протокол № 2 от 23 октября 2012г) и рекомендовано к изданию методической комиссией инженерного факультета (протокол № 5 от 15 января 2012г.)

# СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....   | 4   |
| Методические рекомендации к решению задач расчетно-графической работы .....         | 4   |
| Правила оформления РГР .....  | 5   |
| Принятые обозначения.....   | 6   |
| ТЕМА 1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ .....                             | 7   |
| Указания к решению задач .....  | 10  |
| Рисунки 1.7...1.28 к задачам темы 1.....  | 18  |
| ТЕМА 2. СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ И КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ..... | 21  |
| 2.1. Сила давления жидкости на плоские поверхности.....                             | 21  |
| Указания к решению задач .....  | 23  |
| 2.2. Сила давления жидкости на криволинейные поверхности.....                       | 28  |
| Рисунки 2.13...2.37 к задачам темы 2.....   | 42  |
| ТЕМА 3. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....                       | 45  |
| Указания к решению задач .....  | 48  |
| Рисунки 3.7...3.18 к задачам темы 3.....  | 62  |
| ТЕМА 4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....                           | 63  |
| 4.1. Расчет простого трубопровода .....   | 64  |
| 4.2. Расчет сложных трубопроводов .....   | 67  |
| 4.3. Трубопровод с непрерывной раздачей жидкости по пути .....                      | 68  |
| Указания к решению задач .....  | 69  |
| Рисунки 4.8...4.22 к задачам темы 4.....  | 80  |
| ТЕМА 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБОПРОВОДАХ .....                                   | 81  |
| ТЕМА 6. НАСОСНАЯ УСТАНОВКА И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКА. РАБОТА НАСОСА НА СЕТЬ .....         | 88  |
| Указания к решению задач .....  | 90  |
| Рисунки 6.5...6.13 к задачам темы 6.....  | 98  |
| ТЕМА 7. РАСЧЕТ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА .....   | 99  |
| Указания к решению задач .....  | 103 |
| Рисунки 7.7...7.16 к задачам темы 7.....  | 112 |
| ТЕМА 8. ОСНОВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ .....                            | 114 |
| Источники водоснабжения .....   | 115 |
| Водоприемные сооружения .....   | 117 |
| Водонапорное оборудование .....   | 119 |
| Напорно-регулирующие сооружения .....   | 122 |
| Основные методы и технологические процессы обработки воды .....                     | 125 |
| Системы подачи и распределения воды .....   | 128 |
| Классификация систем водоснабжения.....   | 129 |
| Указания к решению задач .....  | 130 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....   | 133 |
| ЛИТЕРАТУРА.....   | 144 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов инженерных специальностей сельскохозяйственных ВУЗов, в учебных планах которых предусмотрен общий курс гидравлики, гидромашин, гидроприводов и сельскохозяйственного водоснабжения.

Основное назначение учебного пособия – помочь студентам выработать навыки применения теоретических знаний для решения учебных и технических задач.

Учебное пособие включает в себя тексты задач по восьми темам, которые охватывают практически все разделы учебного курса. В нем принят следующий порядок изложения: начало каждой темы предваряют краткие сведения из теории и методические рекомендации по решению задач данной темы. Затем приводятся примеры решения задач и в заключении – тексты задач для самостоятельного решения и выполнения расчетно-графической работы студентами очного обучения или контрольных работ студентами заочной формы обучения. В конце учебного пособия представлены справочные и нормативные данные, необходимые для решения предлагаемых задач.

В учебном пособии особое внимание уделено методике расчета напорных потоков, ограниченных твердыми стенками, расчету трубопроводов. Объясняется это двумя причинами. Во-первых, приобретенное умение расчета трубопроводов понадобится студентам в процессе работы над дипломным проектом. Во-вторых, вся будущая инженерная деятельность выпускников сельскохозяйственных ВУЗов связана с современной техникой, оборудованной гидравлическими системами, а также решением проблем по дальнейшему совершенствованию механизации трудоемких процессов в растениеводстве и животноводстве на основе гидравлических устройств.

В связи со сказанным в учебном пособии уделено внимание основам сельскохозяйственного водоснабжения и тем задачам, которое оно решает.

### **Методические рекомендации к решению задач расчетно-графической работы**

Студентам, обучающимся на инженерных факультетах, важно понять, что язык «мира техники» - это формулы, схемы и чертежи. Именно технологические расчеты предшествуют прочностным, а затем следует исполнение чертежей. При этом важно знать не только формулы соответствующих разделов гидравлики, но и условия, когда их использование правомерно.

*Целью расчетно-графической работы* является изучение и усвоение на практике общих приемов гидравлических расчетов, а также приобретение навыков работы с технической и справочной литературой.

При решении задач следует придерживаться следующего алгоритма:

- Внимательно прочитать и уяснить смысл содержания задачи.
- Восстановить в памяти основные положения темы курса гидравлики, к которой относится содержание задачи.

- Наметить план решения задачи, обеспечивающий получение конечного результата кратчайшим путем. Выбор пути решения задачи часто вызывает наибольшее затруднение. В этом случае рекомендуем провести анализ хода решения, начиная с формулы, непосредственно дающей конечный результат. При таком анализе последовательно выявляется цепочка промежуточных неизвестных величин и формул для их вычисления. Путь, обратный ходу этого процесса, и будет решением задачи.

### **Правила оформления РГР**

Задание на РГР следует брать из Приложения 20 по двум последним цифрам шифра зачетной книжки.

Текстовый материал РГР должен быть оформлен в виде пояснительной записки объемом 15...20 страниц на листах формата А4. Текст должен быть написан разборчивым почерком или распечатан на принтере. Записи производят на одной стороне листа с полями шириной 20 мм слева и 5 мм справа. Текст должен быть стилистически и орфографически правильным без сокращений слов. Все формулы приводятся сначала в буквенном выражении с последующей расшифровкой входящих в формулу величин, а затем уже в них проставляют цифровые значения и производят решение относительно искомой величины. При использовании нормативных и справочных данных следует делать ссылку на источники.

Впереди текста РГР должен быть помещен титульный лист (см. Приложение 1) на обычной писчей бумаге, выполненный в соответствии с требованиями стандарта предприятия [16].

Решение каждой задачи следует начинать с новой страницы. Текст задач писать полностью без сокращений. После чего следует составить краткие условия задачи с рисунком, выполненным чертежными инструментами.

Вычисления должны соответствовать необходимой точности. Графическую часть работы (графики) необходимо выполнять на миллиметровой бумаге или на компьютере. При решении задач чрезвычайно важно следить за соблюдением единства размерности всех входящих в расчетные формулы величин. Недостаточное внимание к размерностям – наиболее частая причина ошибок.

В конце расчетно-графической работы необходимо привести перечень использованной литературы с указанием автора, названия книги, издательства и года издания.

Выполненную РГР студент обязан представить преподавателю на проверку не позже, чем за 10 дней до начала экзаменационной сессии. В возвращенной РГР студент должен исправить все отмеченные ошибки и выполнить все данные ему указания.

## Принятые обозначения

$b$  – ширина  
 $d$  – диаметр  
 $E$  – модуль упругости  
 $P$  – сила давления  
 $G$  – вес  
 $g$  – ускорение свободного падения  
 $H$  – напор, глубина наполнения  
 $h$  – глубина погружения  
 $h_w$  – суммарные потери удельной энергии (потеря напора)  
 $l$  – длина потока, плечо силы  
 $M$  – момент силы  
 $N$  – мощность  
 $n$  – частота вращения  
 $p$  – давление  
 $Q$  – объемный расход (объемная подача)  
 $q$  – удельный расход на единицу длины потока  
 $R$  – гидравлический радиус  
 $Re$  – число Рейнольдса  
 $S$  – поперечное сечение потока,  $S_c$  – площадь сечения струи,  $S_o$  – площадь отверстия  
 $T$  – фаза гидравлического удара  
 $t$  – температура, °C  
 $t$  – время  
 $v$  – средняя скорость в сечении  
 $z$  – геометрическая высота (геометрический напор)  
 $a_{уд}$  – скорость распространения ударной волны  
 $\alpha$  – коэффициент кинетической энергии потока (коэффициент Кориолиса)  
 $\gamma$  – удельный вес  
 $\Delta$  – некоторое приращение; высота выступов  
 $\delta$  – толщина  
 $\zeta$  – коэффициент сопротивления  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия  
 $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости  
 $\mu$  – коэффициент расхода из отверстий и насадок  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости  
 $\omega$  – угловая скорость вращения  
 $\rho$  – плотность  
 $\Sigma$  – знак суммы  
 $\sigma$  – напряжение  
 $const$  – постоянная величина (в том числе по потоку жидкости)

# ТЕМА 1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ

*Термины и определения.* В гидравлике под жидкостью понимают сплошную среду, обладающую свойством текучести (то есть способностью изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил). Понятие «жидкость» включает в себя как капельные жидкости, так и газы.

В гидростатике изучаются законы равновесия капельных жидкостей. В области рабочих давлений, имеющих место на практике, капельные жидкости (вода, масла, нефть, бензин, керосин, ртуть,...) считаются несжимаемыми. Капельная жидкость может заполнять часть объема сосуда, образуя «свободную поверхность» - поверхность раздела с газовой средой.

Математически допущение о несжимаемости жидкости записывают в виде

$$\rho = \text{const} \quad (1.1)$$

или  $\gamma = \rho g = \text{const} \quad (1.2)$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, Н/м<sup>3</sup>.

В модели сплошной среды отвлекаются от молекулярного строения вещества и рассматривают *жидкие частицы*, то есть физически бесконечно малые объемы сплошной среды, сохраняющие все ее физические свойства.

Поскольку жидкие частицы благодаря текучести жидкости свободно перемещаются относительно друг друга, в жидкости не могут действовать сосредоточенные силы. Действуют только непрерывно распределенные силы. Силы, непрерывно распределенные по массе (объему) жидкости называются *массовыми силами*. К ним относятся: сила тяжести и силы инерции. Силы, непрерывно распределенные по поверхности выделенного объема жидкости, называются *поверхностными силами*. Это силы, действующие со стороны соседних объемов среды, твердых тел, газовой среды. Поверхностные силы пропорциональны площади поверхности.

В результате действия поверхностных (внешних) сил внутри жидкости возникает напряжение сжатия, которое по величине равно *гидростатическому давлению*, обладающему двумя свойствами:

- на внешней поверхности жидкости оно всегда направлено по нормали внутрь объема жидкости;
- в любой точке внутри жидкости оно по всем направлениям одинаково, то есть не зависит от угла наклона площадки, на которую действует.

Поскольку жидкости практически не способны сопротивляться растяжению, то в неподвижных жидкостях не действуют касательные силы, а, следовательно, и касательные напряжения.

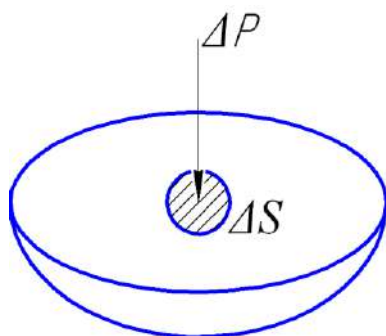


Рисунок 1.1 – Схема к пояснению гидростатического давления в точке

Для малой площадки  $\Delta S$ , выделенной на горизонтальной поверхности, находящейся под действием силы  $\Delta P$  (рис. 1.1) имеем:

$$\Delta p_{\text{ср}} = \Delta P / \Delta S \quad (1.6)$$

где  $\Delta p_{\text{ср}}$  – среднее гидростатическое давление.

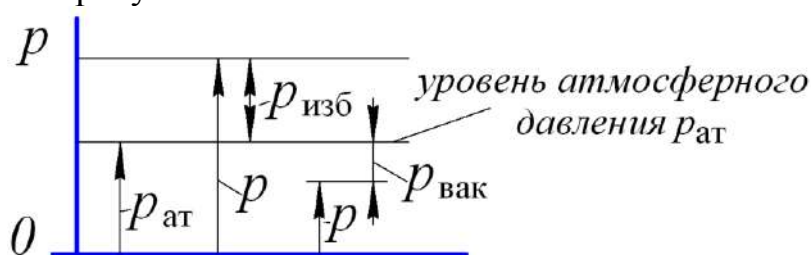
Предел отношения силы  $\Delta P$  к площадке  $\Delta S$  при уменьшении ее размеров до нуля называется *гидростатическим давлением в точке*:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} (\Delta P / \Delta S) \quad (1.7)$$

В системе единиц *СИ* размерность гидростатического давления  $p$ :

$$[p] = \frac{H}{M^2} = \text{Па (паскаль)}$$

При оценке давления различают полное давление ( $p$ ), атмосферное давление ( $p_{\text{ат}}$ ), избыточное давление ( $p_{\text{изб}}$ ) и вакуумметрическое давление ( $p_{\text{вак}}$ ), иллюстрируемые рисунком 1.2.



0 – условный нуль отсчета давления

Рисунок 1.2 – Виды давления

*Полное (или абсолютное) давление*  $p$  – это давление в точке жидкости, отсчитываемое от нулевого значения.

*Атмосферное давление*  $p_{\text{ат}}$  – это давление, создаваемое окружающей воздушной средой. Атмосферное давление  $p_{\text{ат}}$  – единственное измеряемое абсолютное давление. Его измеряют барометром.

*Избыточное давление*  $p_{\text{изб}}$  – это превышение полного давления  $p$  над атмосферным давлением  $p_{\text{ат}}$ :

$$p_{\text{изб}} = p - p_{\text{ат}} \quad (1.8)$$

Избыточное давление  $p_{\text{изб}}$ , кроме того, принято называть манометрическим давлением. Его измеряют манометрами и пьезометрами.

*Вакуумметрическое давление*  $p_{\text{вак}}$  – это «недостаток» полного давления  $p$  до атмосферного  $p_{\text{ат}}$ :

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{ат}} - p \quad (1.9)$$

Оно *измеряется* приборами, которые называются вакуумметрами.

По условиям решаемых задач гидростатическое давление может быть и полным, и избыточным, и вакуумметрическим. В гидростатике понятие «гидростатическое давление» является важнейшим понятием.



Помимо паскалей (Па) давление также измеряется и во внесистемных единицах:

- техническая атмосфера (ат):  $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 0,981 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;
- бар:  $1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;
- миллиметр ртутного столба:  $1 \text{ мм рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$ ;
- метр водяного столба:  $1 \text{ м вод.ст.} = 9,81 \text{ кПа}$ .

Аналитически величину гидростатического давления  $p$  в любой точке (например  $M$ ) покоящейся жидкости *определяют* (рис. 1.3,а) из уравнения, называемого *основным уравнением гидростатики*:

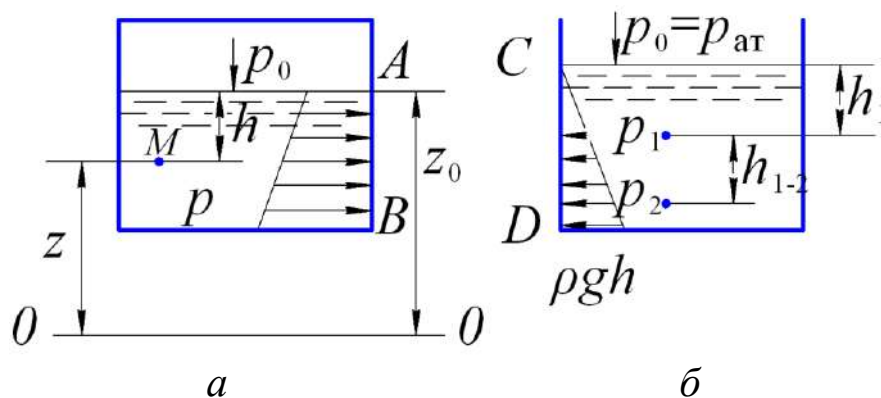
$$p = p_0 + \rho g h \quad (1.10)$$

где  $p_0$  – давление на свободной поверхности, Па;

$\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$h$  – глубина погружения рассматриваемой точки относительно свободной поверхности, м.



а – закрытый резервуар; б – открытый резервуар;  
0-0 – плоскость сравнения

Рисунок 1.3 – К пояснению основного уравнения гидростатики

При решении задач неизвестными величинами могут быть:  $p_0$ ,  $h$ ,  $p$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $h_{1-2}$  и другие. Их числовые значения находят из решения основного уравнения гидростатики, например:

$$p_2 = p_1 + \rho g h_{1-2} \quad (1.11)$$

$$p_1 = p_2 - \rho g h_{1-2} \quad (1.12)$$

$$p_1 = p_{\text{ат}} + \rho g h_1 \quad (1.13)$$

Давление жидкости, как видно из формулы (1.10), растет с увеличением глубины по закону прямой и на фиксированной глубине есть величина постоянная.

Поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется *поверхностью равного давления* (ПРД). Частными случаями ПРД являются свободная поверхность и горизонтальное дно сосуда.

Обозначив через  $z$  координату т.М(рис. 1.3,а), через  $z_0$  – координату свободной поверхности и заменив в (1.10)  $h$  на  $(z_0 - z)$  получают следующее выражение (также называемое основным уравнением гидростатики):

$$z + p/(\rho g) = z_0 + p_0 /(\rho g), \quad (1.14)$$

где в общем случае:

$z$  – геометрическая (нивелирная) высота, м;

$p/(\rho g)$  – абсолютная пьезометрическая высота, м.

Сумма слагаемых

$$z + p/(\rho g) = H_{\text{ст}} \quad (1.15)$$

называется *гидростатическим напором*, который для всех точек рассматриваемого объема неподвижной жидкости есть величина постоянная

$$H_{\text{ст}} = \text{const}$$

**Эпюра гидростатического давления** – это диаграмма распределения давления жидкости в пределах смоченной поверхности, ограничивающей покоящийся объем жидкости.

Учитывая, что избыточное давление прямо пропорционально глубине погружения, достаточно знать его величину в характерных точках, например, в точках  $A$  и  $B$  на рис. 1.3,а и точках  $C$  и  $D$  на рис. 1.3,б. Эпюра избыточного давления представляет собой прямоугольный треугольник, а эпюра абсолютного давления на рис. 1.3,а – трапецию. Каждая абсцисса этих фигур в масштабе, отмеренная в направлении, перпендикулярном к стенке, представляет собой гидростатическое давление в соответствующей точке стенки.

### Указания к решению задач

Решение задач этого раздела основывается на использовании основного уравнения гидростатики (1.10). С его помощью описывают условие равновесия покоящейся жидкости применительно к поверхности равного давления ПРД, намеченной в пределах однородной жидкости.

Кроме того, следует обращать внимание на исходные данные задачи, в особенности на вид гидростатического давления, воздействующего на свободную поверхность в сосуде, заполненном капельной жидкостью: абсолютное  $p$ , избыточное  $p_m$  или вакуумметрическое  $p_{\text{вак}}$ . В левой и правой части уравнения равновесия (1.14) в обязательном порядке должен быть задействован один и тот же вид гидростатического давления.

Применяя основное уравнение гидростатики, также надо иметь в виду, что второй член в его правой части  $\rho gh$  может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от направления его действия относительно поверхности равного давления.

### Пример 1

Построить эпюру избыточного гидростатического давления, действующего на наклонную плоскую стенку открытого резервуара, заполненного водой (рис. 1.4). Глубина наполнения резервуара жидкостью равна  $h = 4$  м. Плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

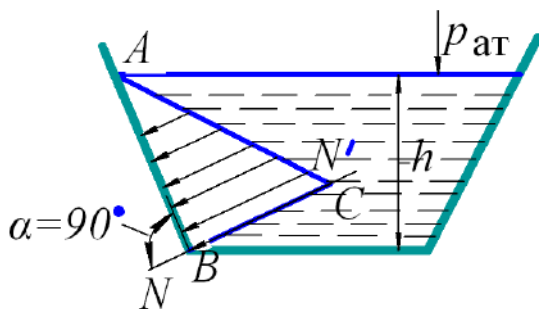


Рисунок 1.4 – К построению эпюры избыточного гидростатического давления

### Решение

Поскольку имеем открытый резервуар, полное давление  $p$  на глубине погружения  $h$  определяемое по формуле (1.10), равно:

$$p = p_{\text{ат}} + \rho gh,$$

где  $p_{\text{ат}}$  – атмосферное давление на свободной поверхности;

$\rho gh$  – избыточное давление на глубине  $h$ , равное

$$p_{\text{изб}} = p - p_{\text{ат}} = \rho gh, \quad (1.16)$$

то есть равно весовому давлению  $\rho gh$ .

Как уже отмечалось, по мере роста глубины погружения  $h$  точки под свободную поверхность величина гидростатического давления возрастает по закону прямой линии. Для проведения прямой необходимо знать местоположения как минимум двух точек, например на свободной поверхности и на днище резервуара. Найдем их.

На свободной поверхности избыточное гидростатическое давление

$$p_{\text{изб}} = \rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0 = 0.$$

На глубине погружения  $h$  избыточное гидростатическое давление

$$p_{\text{изб}} = \rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4 = 39240 \text{ Па}.$$

Свободная поверхность и горизонтальное днище резервуара – это поверхности равного давления.

На наклонной стенке в верхней части смоченной поверхности выделяем точку  $A$ , отвечающую величине  $p_{\text{изб}} = 0$  (рис. 1.4). Через точку  $B$  проводим нормаль  $NN'$ , на которой в принятом масштабе откладываем отрезок  $BC$ , отвечающий величине избыточного гидростатического давления  $p_{\text{изб}} = 39240 \text{ Па}$ . Соединяем точки  $A$  и  $C$  прямой линией. Получаем прямоугольный треугольник  $ABC$ . На его катете  $AB$  отмечаем ряд равноудаленных точек, через которые проводим в пределах треугольника  $ABC$  линии, параллельные катету  $BC$ . Гидростатическое давление всегда направлено по нормали к площадкам действия, что на проведенных линиях отмечено стрелками. Таким образом, прямоугольный треугольник  $ABC$  является эпюрой избыточного гидростатического давления, действующего на плоскую наклонную стенку открытого резервуара.

### Пример 2

Определить высоту столба воды в пьезометре над уровнем жидкости в закрытом сосуде, если абсолютное давление на поверхности воды в сосуде  $p_0 = 104 \text{ кПа}$ .

### Решение

Принимаем за поверхность равного давления плоскость, проходящую через точки 1 и 2, где

$$p_1 = p_2. \quad (1.17)$$

По условию задачи

$$p_1 = p_0. \quad (1.18)$$

где  $p_0$  - внешнее поверхностное давление.

Полное давление в точке 2 определяем по основному уравнению гидростатики:

$$p_2 = p_{\text{ат}} + \rho g h. \quad (1.19)$$

В согласии с равенством (1.17) в уравнениях (1.18) и (1.19) равны левые части, а следовательно, равны и правые. Приходим к уравнению равновесия:

$$p_0 = p_{\text{ат}} + \rho g h, \quad (1.20)$$

решая которое определяем  $h$ :

$$h = \frac{p_0 - p_{\text{ат}}}{\rho g} \quad (1.21)$$

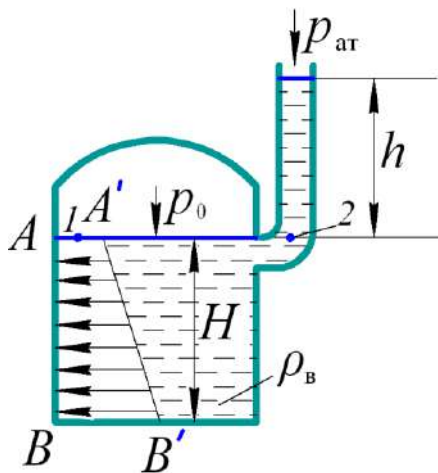


Рисунок 1.5 – К примеру 2

При величинах

$$p_{\text{ат}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}; p_0 = 104000 \text{ Па};$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2 \text{ и } \rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

получаем

$$h = \frac{104000 - 100000}{1000 \cdot 9,81} = 0,4 \text{ м}$$

### Пример 3

Закрытый резервуар A, заполненный водой, снабжен жидкостным ртутным манометром (рис 1.6). Определить глубину  $H$  подключения ртутного манометра к резервуару, если разность уровней ртути в нем  $h = 200$  мм, величина  $a = 0,1$  м и давление  $p_0 = 107,9$  кПа. Плотность ртути принять равной  $\rho_{\text{рт}} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>.

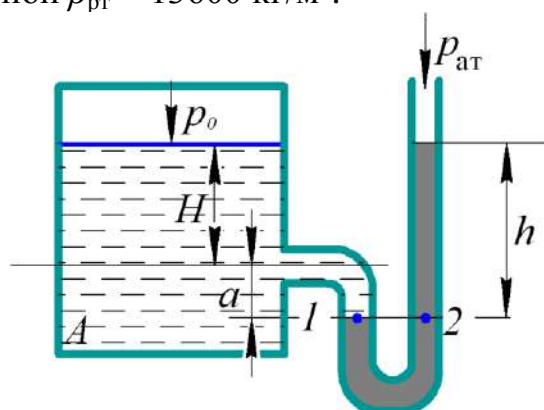


Рисунок 1.6 – К примеру 3

Решение

Принимаем поверхность равного давления, проходящую через точки 1 и 2, где  $p_1 = p_2$ .

По основному уравнению гидростатики:

- полное давление в точке 1

$$p_1 = p_0 + \rho_{\text{в}} g (H + a),$$

- полное давление в точке 2

$$p_2 = p_{\text{ат}} + \rho_{\text{рт}} g h.$$

Приходим к уравнению равновесия жидкости относительно поверхности равного давления 1-2:

$$p_0 + \rho_{\text{в}} g H + \rho_{\text{в}} g \cdot a = p_{\text{ат}} + \rho_{\text{рт}} g h,$$

согласно которому выражение для определения искомой глубины  $H$  имеет вид

$$H = \frac{p_{\text{ат}} - p_0 + \rho_{\text{рт}}gh - \rho_{\text{в}}g \cdot a}{\rho_{\text{в}}g}.$$

При величинах

$$p_{\text{ат}} = 1 \cdot 10^5 \text{Па}; \quad p_0 = 1,079 \cdot 10^5 \text{Па}; \quad \rho_{\text{рт}} = 13600 \text{кг/м}^3;$$

$$a = 0,1 \text{м}; \quad p_{\text{в}} = 1000 \text{кг/м}^3; \quad h = 0,2 \text{ м}$$

получаем

$$H = \frac{100000 - 107900 + 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,1}{1000 \cdot 9,81} = 1,81 \text{ м}$$

#### Пример 4

Построить эпюру абсолютного гидростатического давления на плоскую поверхность  $AB$  (рис. 1.5), если глубина воды в сосуде  $H = 5 \text{м}$ . Внешнее давление равно  $104 \text{кПа}$ .

Решение

Полное давление в точке  $A$  известно по условию задачи

$$p_A = 104 \text{кПа}$$

Полное давление в точке  $B$  определяем по основному уравнению гидростатики

$$p_B = p_A + \rho g H = 104 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 153 \text{кПа}.$$

Нормали, проходящие через точки  $A$  и  $B$  совпадают соответственно со свободной поверхностью жидкости и горизонтальным дном сосуда и лежат в плоскости чертежа (рис. 1.5). На данных нормалях со стороны жидкости в принятом масштабе откладываем величины полного давления  $p_A = 104 \text{кПа}$  и  $p_B = 153 \text{кПа}$ . Получаем соответственно точки  $A'$  и  $B'$ , которые соединяем прямой линией  $A'B'$ . На равных удалениях друг от друга проводим отрезки прямых от линии  $AB$  до линии  $A'B'$  параллельно основаниям  $AA'$  и  $BB'$  прямоугольной трапеции  $AA'B'B$ . Данные линии замыкаем стрелками, отмечая тем самым, что гидростатическое давление на плоскую поверхность  $AB$  действует со стороны жидкости. Таким образом, искомая эпюра полного гидростатического давления представляет собой трапецию  $AA'B'B$ .

**Задача 1** (рис. 1.7). Определить абсолютное давление в сосуде  $A$  по показанию жидкостного манометра, если в левом открытом колене над ртутью налито масло плотностью  $\rho_{\text{м}}$ , в сосуде  $A$  вода плотностью  $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{кг/м}^3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |     |     |      |
|-------------------|-------------------|------------------------|------|-----|-----|------|
|                   |                   | 1                      | 2    | 3   | 4   | 5    |
| $h_1$             | м                 | 2                      | 1,6  | 1,5 | 1,3 | 1,2  |
| $h_2$             | м                 | 0,5                    | 0,4  | 0,2 | 0,2 | 0,12 |
| $h_3$             | м                 | 0,2                    | 0,14 | 0,1 | 0,1 | 0,08 |
| $\rho_{\text{м}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 880                    | 970  | 900 | 910 | 890  |

**Задача 2** (рис.1.7). Какой слой минерального масла  $h_3$  плотностью  $\rho_m$  должен быть в жидкостном манометре, если абсолютное давление на свободной поверхности воды в сосуде  $p$  при заданных высотах  $h_1$  и  $h_2$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $\rho_m$        | кг/м <sup>3</sup> | 880                    | 850  | 880  | 890  | 910  |
| $p$             | кПа               | 90                     | 80   | 75   | 80   | 70   |
| $h_1$           | м                 | 2                      | 3    | 3    | 2,5  | 3,2  |
| $h_2$           | м                 | 0,04                   | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,01 |

**Задача 3** (рис.1.8). Определить вакуумметрическое давление воды в точке  $B$  трубопровода, расположенной на высоте  $a$  ниже линии раздела между водой и ртутью. Разность уровней ртути в коленях манометра  $h$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $a$             | мм                | 200                    | 150 | 230 | 300 | 160 |
| $h$             | мм                | 300                    | 350 | 400 | 420 | 240 |

**Задача 4** (рис.1.9). Закрытый резервуар  $A$ , заполненный керосином плотностью  $\rho_{\text{на}}$  глубину  $H$ , снабжён вакуумметром и пьезометром. Определить абсолютное давление  $p_0$  на свободной поверхности в резервуаре и разность уровней ртути в вакуумметре  $h_1$ , если высота поднятия керосина в пьезометре  $h$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 4.

Таблица 4

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup> | 820                    | 810 | 845 | 885 | 900 |
| $H$             | м                 | 3                      | 4   | 3   | 1   | 2   |
| $h$             | м                 | 1,5                    | 2   | 2   | 0,5 | 1,7 |

**Задача 5** (рис.1.9). Определить глубину воды  $H$  в резервуаре  $A$ , если известны показания ртутного манометра  $h_1$ , пьезометра  $h$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 5.

Таблица 5

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $h$             | мм                | 300                    | 500 | 430 | 300 | 450 |
| $h_1$           | мм                | 800                    | 900 | 860 | 880 | 910 |

**Задача 6** (рис.1.10). Закрытый резервуар с жидкостью плотностью  $\rho$  снабжен открытым и закрытым пьезометрами. Определить приведенную пьезометрическую высоту  $h_x$  поднятия жидкости в закрытом пьезометре, (соответствующую абсолютному гидростатическому давлению в точке  $A$ ), если показание открытого пьезометра при нормальном атмосферном давлении  $h$ , а расстояние от поверхности жидкости в резервуаре до точки  $A$  равно  $h_A$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 6.

Таблица 6

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup> | 1000                   | 900 | 910 | 860 | 845 |
| $h$             | м                 | 1,8                    | 1,5 | 1,3 | 1,0 | 1,4 |
| $h_A$           | м                 | 0,9                    | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,4 |

**Задача 7** (рис.1.11). Закрытый резервуар заполнен жидкостью плотностью  $\rho$ . Определить показание манометра  $p_m$ , если показание открытого пьезометра при нормальном

атмосферном давлении  $h$ , а глубина погружения точки  $A$  равна  $h_A$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 7.

Таблица 7

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup> | 760                    | 820 | 745 | 810 | 885 |
| $h$             | м                 | 2,4                    | 2,7 | 3   | 2,2 | 2,1 |
| $h_A$           | м                 | 1,1                    | 1,7 | 1,8 | 1,6 | 1,2 |

**Задача 8** (рис.1.12). Определить абсолютное гидростатическое давление в точке  $A$  закрытого резервуара, заполненного водой, если при нормальном атмосферном давлении высота столба ртути в трубке дифманометра  $h_{рт}$ , а линия раздела между ртутью и водой расположена ниже точки  $B$  на величину  $h_1$ , точка  $B$  выше точки  $A$  на величину  $h_2$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 8.

Таблица 8

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $h_{рт}$        | м                 | 0,6                    | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,7 |
| $h_1$           | м                 | 3,6                    | 3,3 | 3,8 | 3   | 2,9 |
| $h_2$           | м                 | 1,7                    | 1,4 | 1,8 | 1,5 | 1,9 |

**Задача 9** (рис.1.13). Закрытый резервуар с жидкостью плотностью  $\rho$ , снабжён закрытым пьезометром, дифференциальным ртутным и механическим манометрами. Определить высоту поднятия ртути  $h_{рт}$  в дифференциальном манометре и пьезометрическую высоту  $h_x$  в закрытом пьезометре, если известны показания манометра  $p_m$  и высоты  $h_1, h_2, h_3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 9.

Таблица 9

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3    | 4    | 5    |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup> | 820                    | 808 | 846  | 884  | 901  |
| $p_m$           | МПа               | 0,12                   | 0,1 | 0,14 | 0,15 | 0,19 |
| $h_1$           | м                 | 1,3                    | 1,2 | 1,5  | 1,7  | 1,9  |
| $h_2$           | м                 | 2,3                    | 2   | 2,5  | 2,7  | 2,9  |
| $h_3$           | м                 | 2                      | 1,8 | 2    | 2,2  | 2,4  |

**Задача 10** (рис. 1.14). Вначале в  $U$ -образную трубку налили ртуть, а затем в одно колено трубки налили воду плотностью  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, а в другую жидкость плотностью  $\rho_{ж}$ . При совпадении верхних уровней жидкости и воды высота столба воды равна  $h_v$ . Определить разность уровней ртути  $\Delta h$ , если плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>. Исходные данные к задаче приведены в табл. 10. Таблица 10

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $h_v$           | мм                | 430                    | 350 | 300 | 290 | 400 |
| $\rho_{ж}$      | кг/м <sup>3</sup> | 700                    | 760 | 800 | 850 | 720 |

**Задача 11** (рис. 1.15). К закрытому резервуару с водой присоединены два ртутных манометра. Определить глубину погружения нижнего манометра  $h$ , если известны показания обоих манометров  $h_1$  и  $h_2$ , а также глубина погружения верхнего манометра  $a$ . Плотность воды принять равной  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600$  кг/м<sup>3</sup>. Исходные данные к задаче приведены в табл. 11. Таблица 11

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |      |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|------|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5   |
| $h_1$           | мм                | 300                    | 350 | 400 | 450  | 500 |
| $h_2$           | мм                | 350                    | 400 | 500 | 600  | 700 |
| $a$             | м                 | 0,5                    | 0,6 | 0,7 | 0,65 | 0,8 |

**Задача 12** (рис. 1.15). Найти избыточное давление на свободной поверхности в резервуаре, заполненном водой, если известны: глубина погружения верхнего манометра  $a$ , нижнего манометра  $h$  и показания верхнего манометра  $h_1$ . Определить показание нижнего манометра  $h_2$ . Плотность воды  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ , плотность ртути  $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 12.

Таблица 12

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3    | 4    | 5    |
| $h$             | м                 | 1,15                   | 1,2 | 1,5  | 1,65 | 1,3  |
| $h_1$           | мм                | 150                    | 125 | 145  | 135  | 140  |
| $a$             | м                 | 0,2                    | 0,3 | 0,35 | 0,4  | 0,45 |

**Задача 13** (рис. 1.16). На какой высоте  $h$  над точкой  $A$  находится свободная поверхность воды, если манометр показывает давление  $p_m$ . Давление на свободной поверхности воды в сосуде  $p_o$ . Построить эпюру гидростатического давления на плоскую поверхность  $BC$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 13.

Таблица 13

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |     |      |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|-----|------|-----|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3   | 4    | 5   |
| $p_m$           | кПа               | 24                     | 22   | 12  | 19   | 26  |
| $p_o$           | кПа               | 7,5                    | 8,45 | 6,4 | 10,5 | 9,3 |

**Задача 14** (рис. 1.17). К боковой стенке резервуара, наполненного водой, присоединена пьезометрическая трубка на глубине  $h$  от свободной поверхности. Избыточное давление на свободной поверхности  $p_m$ . Найти высоту подъема воды в пьезометре  $h_p$ . Построить эпюру полного и избыточного гидростатического давления на плоскую поверхность  $AC$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 14.

Таблица 14

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5    |
| $h$             | м                 | 1,08                   | 1,0 | 1,1 | 1,25 | 1,15 |
| $p_m$           | кПа               | 9,0                    | 9,4 | 9,2 | 9,0  | 9,2  |

**Задача 15** (рис. 1.18). Определить величину абсолютного  $p_o$  и избыточного давления  $p_m$  на свободной поверхности в сосуде и высоту  $h_1$ , если высота поднятия ртути в ртутном манометре  $h_2$ . Построить эпюру избыточного гидростатического давления на плоскую поверхность  $AB$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 15.

Таблица 15

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |      |       |       |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|------|-------|-------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3    | 4     | 5     |
| $h_2$           | м                 | 0,04                   | 0,025 | 0,02 | 0,015 | 0,028 |
| $H$             | м                 | 1,5                    | 2,0   | 1,8  | 2,5   | 2,9   |

**Задача 16** (рис. 1.19). Определить манометрическое давление в точке  $a$  водопровода, если заданы высоты  $h_1$  и  $h_2$ . Удельный вес ртути принять равным  $\gamma_{рт} = 133,4 \text{ кН/м}^3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 16.

Таблица 16

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $h_1$           | м                 | 0,25                   | 0,14 | 0,15 | 0,2  | 0,16 |
| $h_2$           | м                 | 0,5                    | 0,27 | 0,32 | 0,43 | 0,38 |

**Задача 17** (рис. 1.20). Определить вакуумметрическое давление в точке присоединения  $U$ -образного жидкостного вакуумметра к сосуду, заполненного той же жидкостью, а также абсолютное давление  $p_o$  на свободной поверхности в сосуде, если заданы высоты  $h_1$ ,  $h_2$  и плотность жидкости  $\rho_{ж}$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 17.



Таблица 17

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |     |     |      |
|-------------------|-------------------|------------------------|------|-----|-----|------|
|                   |                   | 1                      | 2    | 3   | 4   | 5    |
| $h_1$             | мм                | 200                    | 250  | 400 | 500 | 700  |
| $h_2$             | мм                | 600                    | 550  | 400 | 300 | 150  |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 750                    | 1250 | 840 | 790 | 1000 |

**Задача 18** (рис.1.21). Манометр, подключенный к закрытому резервуару с жидкостью, показывает избыточное давление  $p_m$ . Определить абсолютное давление воздуха на свободной поверхности в резервуаре  $p_0$  и высоту  $h$ , если уровень жидкости в резервуаре  $H$ , расстояние от точки подключения до центра манометра  $Z$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 18.

Таблица 18

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |     |
|-------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|-----|
|                   |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5   |
| $p_m$             | кПа               | 55                     | 45   | 50   | 30   | 40  |
| $H$               | м                 | 4,5                    | 3,05 | 4,25 | 2,75 | 3,5 |
| $Z$               | м                 | 1,33                   | 1,02 | 1,17 | 1,5  | 1,9 |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 1245                   | 820  | 745  | 995  | 880 |

**Задача 19** (рис. 1.22). Закрытый резервуар  $A$ , заполненный водой, снабжен ртутным манометром и мановакуумметром. Определить глубину подключения ртутного манометра к резервуару  $H$ , если заданы разность уровней ртути в манометре  $h$ , величина  $a$  известна и показание мановакуумметра  $M p_m$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 19.

Таблица 19

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $h$             | м                 | 0,16                   | 0,15 | 0,12 | 0,13 | 0,14 |
| $a$             | м                 | 0,5                    | 0,8  | 1,0  | 0,2  | 0,75 |
| $p_m$           | кПа               | 5,0                    | 4,5  | 2,5  | 2,0  | 6,5  |

**Задача 20** (рис. 1.23). Чему равна высота  $h_2$  ртутного манометра, если абсолютное давление жидкости в трубопроводе равно  $p$  и высота столба жидкости  $h_1$ ? Плотность ртути принять равной  $\rho_{\text{рт}}=13600$  кг/м<sup>3</sup>. Исходные данные к задаче приведены в табл. 20.

Таблица 20

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |       |       |       |
|-------------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                   |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $p$               | МПа               | 0,125                  | 0,112 | 0,129 | 0,132 | 0,139 |
| $h_1$             | м                 | 0,55                   | 0,65  | 0,60  | 0,63  | 0,50  |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 925                    | 900   | 910   | 900   | 960   |

**Задача 21** (рис. 1.24). В закрытом резервуаре находится жидкость под давлением. Плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}}$ . Для измерения уровня жидкости  $h$  в резервуаре имеется справа уровнемер. Левый открытый пьезометр предназначен для измерения давления в резервуаре. Определить, какую нужно назначить высоту левого пьезометра, чтобы измерить максимальное давление в резервуаре  $p$  при показании уровнемера  $h$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 21.

Таблица 21

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |       |      |
|-------------------|-------------------|------------------------|------|------|-------|------|
|                   |                   | 1                      | 2    | 3    | 4     | 5    |
| $p$               | МПа               | 0,12                   | 0,15 | 0,13 | 0,125 | 0,14 |
| $h$               | см                | 80                     | 40   | 70   | 55    | 60   |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 750                    | 1250 | 790  | 840   | 877  |

**Задача 22** (рис.1.25). Определить вакуумметрическое давление в резервуаре  $p_0$  и высоту подъема уровня воды  $h_1$  в трубе 1, если заданы высоты  $h_2$  и  $h_3$ . Удельный вес ртути

принять равным  $\gamma_{рт} = 133,4 \text{ кН/м}^3$  и воды  $\gamma_v = 9,81 \text{ кН/м}^3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 22.

Таблица 22

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |      |     |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|------|-----|------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3    | 4   | 5    |
| $h_2$           | м                 | 0,15                   | 0,2   | 0,25 | 0,1 | 0,22 |
| $h_3$           | м                 | 0,8                    | 0,655 | 1,5  | 1,0 | 1,4  |

**Задача 23** (рис. 1.26). Определить на какой высоте  $Z$  установится уровень ртути в  $U$ -образном жидкостном манометре, если при абсолютном давлении в трубопроводе  $p$  и показании манометра  $h$ , система находится в равновесии. Удельный вес ртути принять равным  $\gamma_{рт} = 133,4 \text{ кН/м}^3$ , воды  $\gamma_v = 9,81 \text{ кН/м}^3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл.23.Таблица 23

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |       |       |       |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $p$             | кПа               | 137,1                  | 133,1 | 124,1 | 126,1 | 135,1 |
| $h$             | см                | 24                     | 20    | 18    | 16    | 22    |

**Задача 24** (рис. 1.27). К закрытому баллону присоединены два  $U$ -образных жидкостных манометра. Определить высоту столба ртути в закрытой сверху трубке  $h_2$ , если в открытой трубке высота составляет  $h_1$ . Удельный вес ртути принять равным  $\gamma_{рт} = 133,4 \text{ кН/м}^3$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 24.

Таблица 24

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |    |    |    |    |
|-----------------|-------------------|------------------------|----|----|----|----|
|                 |                   | 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  |
| $h_1$           | см                | 30                     | 25 | 20 | 15 | 10 |

**Задача 25** (рис. 1.28). В цилиндрический бак диаметром  $D$  до уровня  $H$  налиты вода и жидкость на нефтяной основе. Уровень воды в пьезометре ниже уровня жидкости на величину  $h$ . Определить вес находящейся в баке жидкости, плотность которой задана в исходных данных, приведенных в табл. 25.Таблица 25

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4   | 5   |
| $D$             | м                 | 2                      | 1,75 | 2,2  | 1,8 | 1,5 |
| $h$             | мм                | 300                    | 350  | 290  | 400 | 250 |
| $\rho_{ж}$      | кг/м <sup>3</sup> | 700                    | 790  | 840  | 750 | 877 |
| $H$             | м                 | 1,5                    | 2,2  | 2,75 | 2,4 | 2,8 |

### Рисунки 1.7...1.28 к задачам темы 1

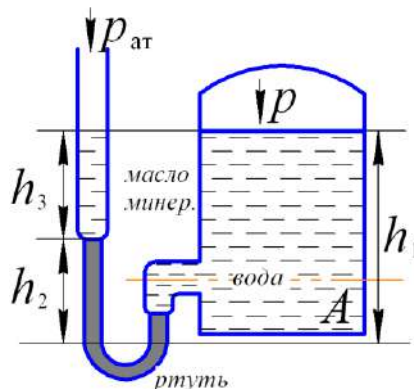


Рисунок 1.7

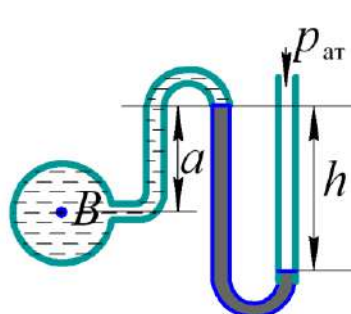


Рисунок 1.8

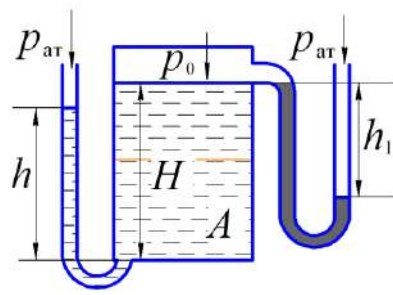


Рисунок 1.9

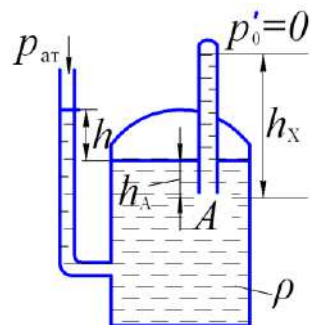


Рисунок 1.10

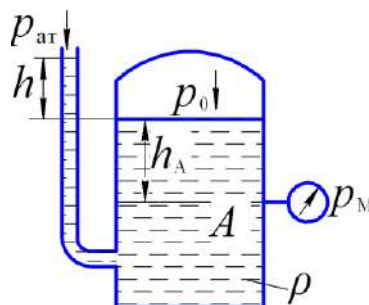


Рисунок 1.11

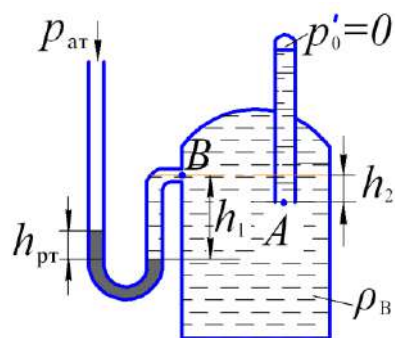


Рисунок 1.12

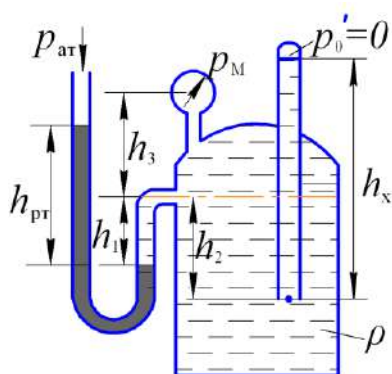


Рисунок 1.13

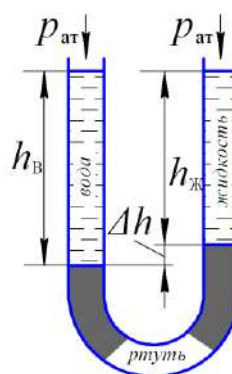


Рисунок 1.14

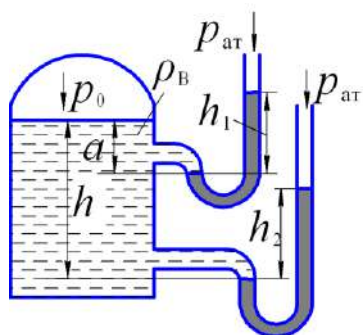


Рисунок 1.15

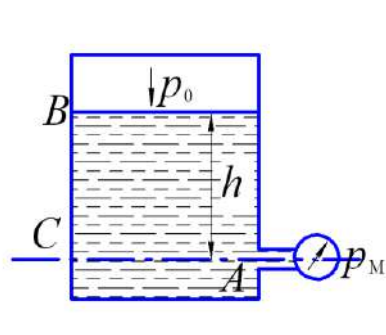


Рисунок 1.16

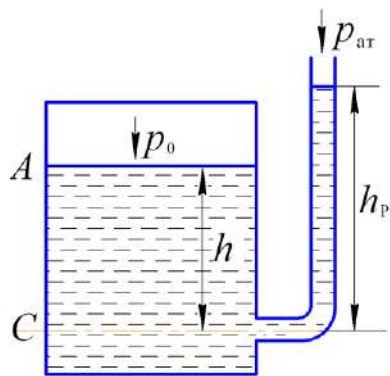


Рисунок 1.17

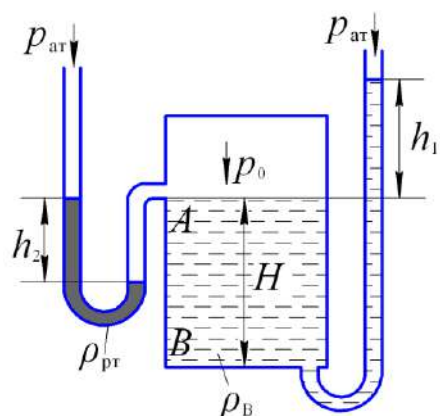


Рисунок 1.18

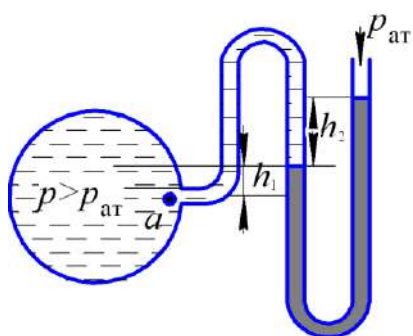


Рисунок 1.19

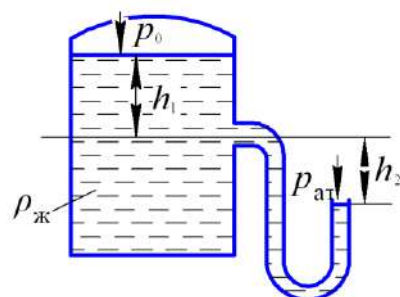


Рисунок 1.20

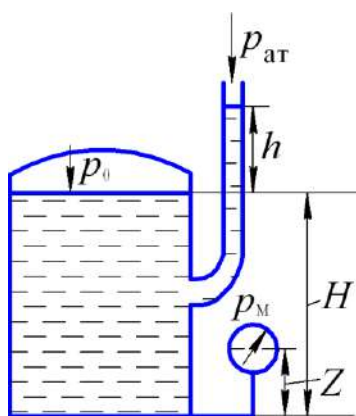


Рисунок 1.21

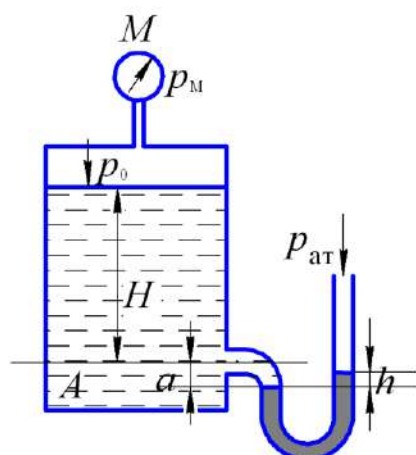


Рисунок 1.22

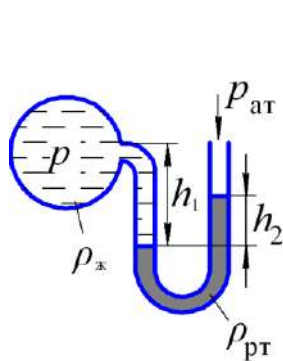


Рисунок 1.23

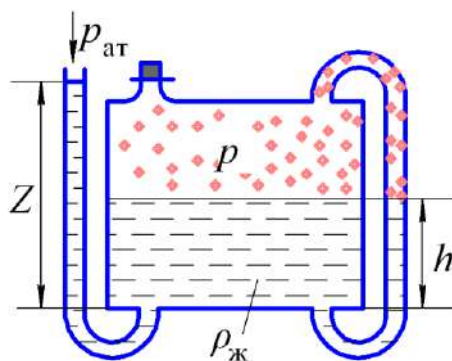


Рисунок 1.24

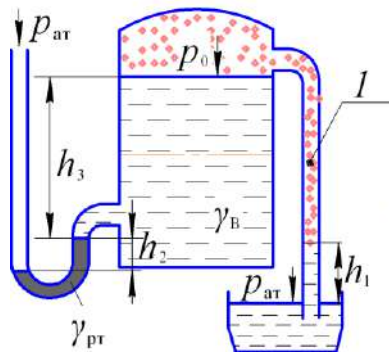


Рисунок 1.25

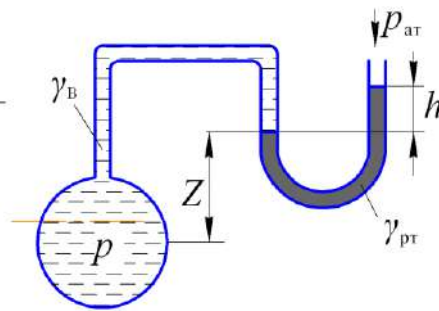


Рисунок 1.26

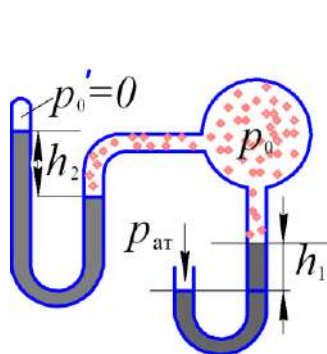


Рисунок 1.27

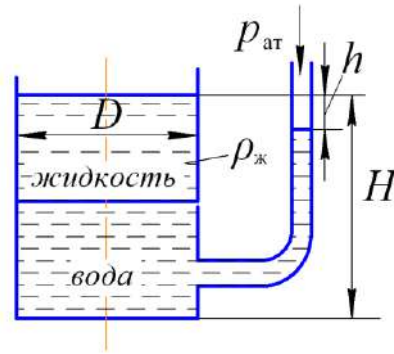


Рисунок 1.28

## ТЕМА 2. СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ И КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

### 2.1. Сила давления жидкости на плоские поверхности

Расчет величин сил давления жидкости на поверхности имеет большое практическое значение при технологических и прочностных расчетах гидротехнических сооружений небольших размеров в пределах сельской местности, или например, навозоприемных каналов самотечных систем навозоудаления в животноводческих помещениях, различного рода затворов в емкостях с запасами топлива и т.д. Чаще всего на практике приходится определять при этом не абсолютную силу давления, а силу и з б ы т о ч н о г о гидростатического давления непосредственно жидкости  $P_{ж}$  (рис. 2.1, а). Сила атмосферного давления, действующая встречно по обе стороны стенки, взаимноисключается.

Сила давления, действующая со стороны жидкости  $P_{ж}$  на некоторый участок рассматриваемой стенки  $S$  (рис. 2.1, а), расположенный под углом  $\alpha$  к горизонту, может быть найдена с помощью следующей формулы:

$$P_{ж} = p_c \cdot S, \text{ Н} \quad (2.1)$$

где  $p_c$  — избыточное гидростатическое давление в центре тяжести смоченной поверхности при  $p = p_{ат}$ , равное:

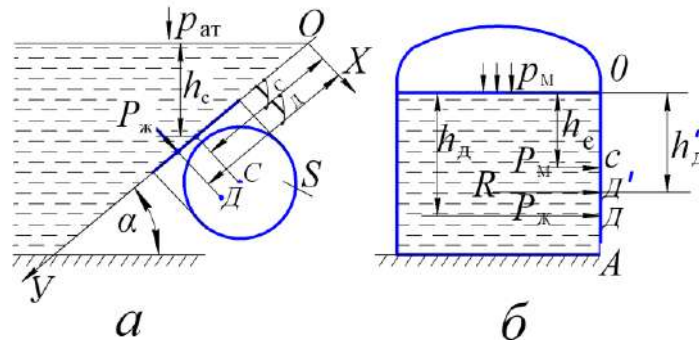
$$p_c = \rho g h_c, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$h_c$  – глубина погружения центра тяжести смоченного участка относительно свободной поверхности, м;

$S$  – площадь смоченной поверхности,  $\text{м}^2$ .



$a$  – открытый резервуар;  $b$  – закрытый резервуар

$P_m$  – сила внешнего давления;  $P_{ж}$  – сила гидростатического давления жидкости;  
 $R$  – результирующая сил давления; т.С – центр тяжести смоченной поверхности;  
т.Д – центр давления;  $h_c$  и  $h_d$  – соответственно глубины погружения центра тяжести  
и центра давления

Рисунок 2.1 – Схемы к определению силы давления жидкости на плоскую поверхность

Для инженерных расчетов важно знать не только величину силы давления жидкости, но и точку ее приложения. Данная точка называется центром давления. Координату центра давления  $y_d$  определяют по формуле:

$$y_d = y_c + I_0 / (y_c \cdot S), \quad (2.3)$$

где  $y_c$  – координата центра тяжести, м;

$I_0$  – центральный момент инерции площади стенки относительно оси, проходящей через центр тяжести площади,  $\text{м}^4$ . Формулы моментов инерции наиболее распространенных плоских фигур см. в Приложении 2.

Таким образом, точка приложения силы  $P_{ж}$  расположена ниже центра тяжести площади смоченной поверхности; расстояние между ними

$$\Delta y = I_0 / (y_c \cdot S), \quad (2.4)$$

Здесь  $y_c \cdot S$  – статический момент площадки,  $\text{м}^3$ .

Для вертикальной стенки (рис. 2.1, б) глубина погружения центра давления также находится ниже глубины центра тяжести:

$$h_d = h_c + I_0 / (h_c \cdot S), \text{ м} \quad (2.5)$$

и только для плоского горизонтального дна центр его тяжести и центр давления совпадают, то есть

$$h_c = h_d. \quad (2.6)$$

Для закрытой плоскости, на свободной поверхности которой имеет место давление, отличное от атмосферного, например, манометрическое  $p_m$  или вакуумметрическое  $p_{\text{вак}}$ , равнодействующую сил давления определяют из формул:



$$R = (p_m + \rho g h_c) S, \text{ Н} \quad (2.7)$$

$$R = (-p_{\text{вак}} + \rho g h_c) S, \text{ Н} \quad (2.8)$$

Точку приложения равнодействующей силы  $R$  в этом случае определяют по правилам механики, как точку приложения двух сил  $P_m (P_{\text{вак}})$  и  $P_{\text{ж}}$ .

Для случая (рис. 2.1, б) глубину погружения центра давления равнодействующей силы  $R$  определяют из уравнения моментов сил относительно точки  $O$ :

$$h_{\text{Д}}' = (P_{\text{ж}} \cdot h_{\text{Д}} + P_m \cdot h_m) / R, \quad (2.9)$$

где  $h_m$  – пьезометрическая высота, равная  $h_m = p_m / (\rho g)$ ;

$R$  – равнодействующая сил  $P_{\text{ж}}$  и  $P_m$ , равная

$$R = P_{\text{ж}} + P_m, \quad (2.10)$$

где  $P_{\text{ж}}$  – сила давления жидкости на боковую стенку  $OA$ ,

$$P_{\text{ж}} = \rho g h_c \cdot S,$$

$P_m$  – сила внешнего давления, равная

$$P_m = p_m \cdot S.$$

### Указания к решению задач

При решении задач, в которых заданы поршни или системы поршней, необходимо использовать уравнения равновесия, отражающие равенство нулю алгебраической суммы всех сил, действующих на поршень (систему поршней) в направлении выбранных осей координат:

$$\Sigma P_i = 0. \quad (2.11)$$

При решении задач, в которых по условию задачи имеется плоская стенка, установленная с возможностью вращения относительно некоторой оси, необходимо использовать уравнение равновесия, отражающее равенство нулю алгебраической суммы всех моментов сил, действующих на стенку относительно оси

$$\Sigma M_i = 0. \quad (2.12)$$

Каждый из моментов сил  $M_i$  определяется как произведение силы  $P_i$  на ее плечо  $l_i$ . Плечо силы  $l_i$  – это кратчайшее расстояние от центра вращения до направления действия силы  $P_i$ .

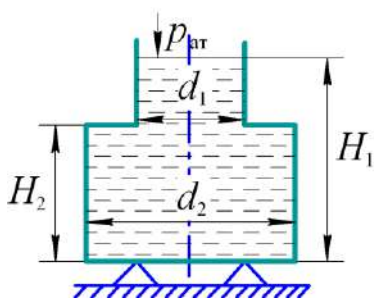


Рисунок 2.2 – К примеру 5

### Пример 5

Резервуар (рис. 2.2) выполнен из двух полых цилиндров: верхнего диаметром  $d_1 = 1$  м и нижнего диаметром  $d_2 = 3$  м, высотой  $H_2 = 3$  м и наполнен водой. Глубина наполнения резервуара  $H_1 = 4,5$  м. Собственный вес резервуара  $G = 10$  кН. Определить силу избыточного давления воды на дно резервуара и силу, действующую на опоры.

Решение

Определяем величину избыточного давления на днище резервуара:

$$p_{изб} = \rho g H_1 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4,5 = 44145 \text{ Па.}$$

Определяем силу избыточного давления на днище:

$$\begin{aligned} P_{изб} &= p_{изб} \cdot S_{дн} = p_{изб} \frac{\pi d_2^2}{4} = \\ &= 44145 \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} = 311880 \text{ Н} = 311,8 \text{ кН} \end{aligned}$$

Сила давления жидкости на днище резервуара  $P_{изб}$  является внутренней силой, и она не передается на опоры, на которых установлен резервуар. Опоры воспринимают вес резервуара и воды.

Находим вес воды:

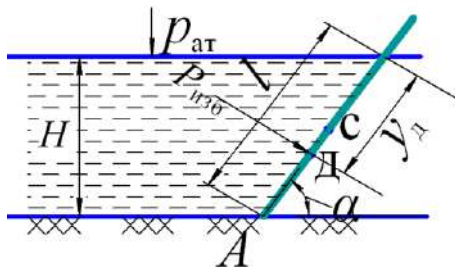
$$\begin{aligned} G_{в} &= \rho g \left[ \frac{\pi d_1^2}{4} (H_1 - H_2) + \frac{\pi d_2^2}{4} H_2 \right] = \\ &= 1000 \cdot 9,81 \left[ \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} (4,5 - 3) + \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} \cdot 3 \right] = 219470 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Вычисляем величину реакции опор:

$$R_{оп} = G + G_{в} = 10 + 219,47 = 229,4 \text{ кН,}$$

которая оказалась на 30% меньше силы избыточного гидростатического давления на днище  $P_{изб}$ .

### Пример 6



Определить величину и точку приложения силы давления на прямоугольный щит шириной  $b = 2 \text{ м}$ , наклоненный к горизонту под углом  $\alpha = 60^\circ$  (рис. 2.3). Глубина наполнения резервуара водой равна  $H = 4 \text{ м}$ .

точка  $C$  – центр тяжести (масс) щита; точка  $D$  – центр давления силы

$P_{изб}$

Рисунок 2.3 – К примеру 6

Решение

Находим величину площади смоченной поверхности:

$$S = b \cdot l = b \frac{H}{\sin 60^\circ} = 2 \cdot \frac{4}{\sin 60^\circ} = 9,24 \text{ м}^2.$$

Определяем глубину погружения центра тяжести прямоугольного щита:

$$h_c = \frac{H}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ м.}$$

Сила избыточного гидростатического давления  $P_{изб}$  по формуле (2.1) при числовых значениях  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $h_c = 2 \text{ м}$  и  $S = 9,24 \text{ м}^2$  равна:



$$P_{\text{изб}} = \rho g h_c S = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 9,24 = 181240 \text{ Н.}$$

Высота щита  $l$  (рис. 2.3):

$$l = \frac{H}{\sin 60^\circ} = \frac{4}{\sin 60^\circ} = 4,62 \text{ м.}$$

Координата центра давления, т.е. точка приложения силы  $P_{\text{изб}}$  на щит прямоугольной формы, полученная из решения формулы (2.3), равна:

$$y_D = y_c + \frac{I_0}{y_c \cdot S} = \frac{l}{2} + \frac{b \cdot l^3}{12 \cdot l \cdot b \cdot l} = \frac{l}{2} + \frac{l}{6} = \frac{2}{3}l = 3,1 \text{ м} \quad (2.13)$$

### Пример 7

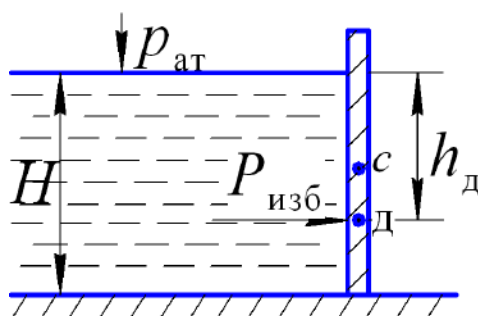


Рисунок 2.4 – К примеру 7

Определить величину и точку приложения силы избыточного гидростатического давления  $P_{\text{изб}}$  жидкости на вертикальный прямоугольный щит (рис. 2.4) шириной  $b = 2$  м, если глубина жидкости перед щитом  $H = 3$  м. Жидкость – вода.

Решение

При решении задачи применим формулы (2.1) и (2.2), принимая во внимание, что при угле наклона щита к горизонту  $\alpha = 90^\circ$  (вертикальный щит):  $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$ .

Имеем величину силы избыточного гидростатического давления

$$P_{\text{изб}} = \frac{\rho g H^2 \cdot b}{2 \sin \alpha} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 3^2 \cdot 2}{2 \cdot 1} = 88290 \text{ Н.}$$

Точка приложения данной силы расположена на вертикальной оси симметрии щита на глубине погружения

$$h_d = \frac{2}{3}H = \frac{2}{3} \cdot 3 = 2 \text{ м.}$$

### Пример 8

В боковой вертикальной стенке резервуара (рис. 2.5) имеется отверстие, перекрываемое плоским прямоугольным щитком с размерами  $a = 0,5$  м и  $b = 2$  м. Уровень воды в резервуаре  $H = 3$  м. Определить величину и точку приложения силы избыточного гидростатического давления, действующего на щиток.

Решение

Силу избыточного гидростатического давления на щит находим по формуле (2.1):

$$P_{\text{изб}} = \rho g h_c \cdot S_{\text{щ}}$$

где  $h_c$  – глубина погружения центра масс, равная:

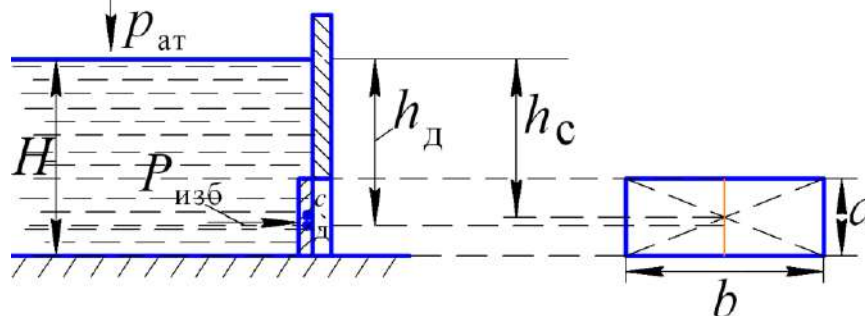
$$h_c = H - \frac{a}{2} = 3 - 0,25 = 2,75 \text{ м};$$

$S_{\text{щ}}$  – площадь прямоугольного щитка:

$$S_{\text{щ}} = a \cdot b = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ м}^2;$$

$\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$

$$P_{\text{изб}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,75 \cdot 1,0 = 26,98 \text{ кН}.$$



$H$  – глубина наполнения резервуара;  $a$  – высота щитка;  $b$  – ширина щитка;

$h_c$  – глубина погружения центра масс щитка;  $P_{\text{изб}}$  – сила избыточного гидростатического давления на щиток;  $h_d$  – глубина погружения центра давления

Рисунок 2.5– К примеру 8

Глубину погружения центра давления находим по формуле (2.5)

$$h_d = h_c + I_0 / (h_c \cdot S_{\text{щ}})$$

где  $I_0 = \frac{a^3 \cdot b}{12} = 0,021 \text{ м}^4$  – центральный момент инерции щитка;

$$h_d = 2,75 + \frac{0,021}{2,75 \cdot 1,0} = 2,77 \text{ м}.$$

### Пример 9

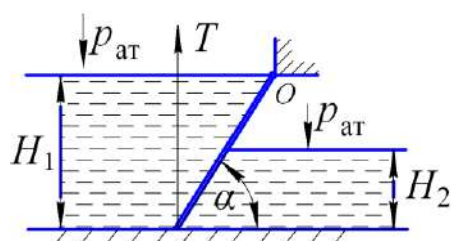


Рисунок 2.6 – Схема щита, перекрывающего канал

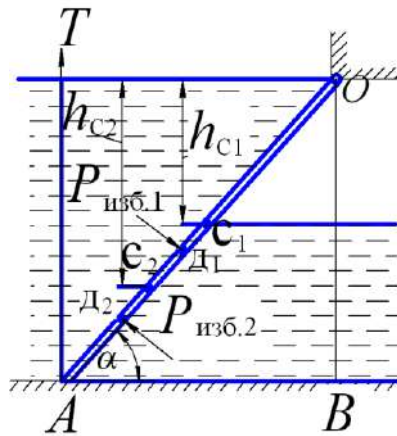
Прямоугольный щит, перекрывающий канал шириной  $b = 5 \text{ м}$ , закреплен шарнирно в точке  $O$  (рис. 2.6).

Определить усилие  $T$ , необходимое для подъема щита, если угол его наклона к горизонту  $\alpha = 60^\circ$ . Глубина воды слева от щита  $H_1 = 4 \text{ м}$ , а справа от щита равна  $H_2 = 2 \text{ м}$ . Весом

щита пренебречь.

Решение

Схему сил, действующих на щит, выполним на отдельном рисунке (рис. 2.7).



$D_1, D_2$  – центры давлений сил соответственно слева и справа;

$P_{изб.1}, P_{изб.2}$  – силы избыточного давления на щит соответственно слева и справа

Рисунок 2.7 – Схема сил, действующих на щит

Алгебраическая сумма моментов всех сил относительно точки  $O$  равна нулю (условие равновесия щита):

$$\Sigma M_i = 0;$$

$$P_{изб.1} \cdot OD_1 - P_{изб.2} \cdot OD_2 - T \cdot AB = 0, \quad (2.14)$$

где  $P_{изб.1}$  – сила избыточного гидростатического давления, действующего слева от щита;

$P_{изб.2}$  – сила избыточного гидростатического давления, действующего справа от щита;

$T$  – потребное усилие, прикладываемое к щиту;

$OD_1, OD_2$  и  $AB$  – плечи соответствующих сил.

Согласно равенства (2.14) искомое усилие можно определить по формуле:

$$T = \frac{P_{изб.1} \cdot OD_1 - P_{изб.2} \cdot OD_2}{AB}. \quad (2.15)$$

Найдем входящие в данное соотношение параметры.

Находим высоту щита:

$$AO = \frac{H_1}{\sin \alpha} = \frac{4}{\sin 60^\circ} = 4,62 \text{ м.}$$

Площади смоченной поверхности щита:

- слева  $S_1 = b \cdot AO = 5 \cdot 4,62 = 23,1 \text{ м}^2$ ,

- справа  $S_2 = 0,5 \cdot S_1 = 0,5 \cdot 23,1 = 11,55 \text{ м}^2$ .

Силы избыточного давления на щит:

- слева

$$P_{изб.1} = \rho g h_{c1} S_1 = \rho g \frac{H_1}{2} S_1 = 1000 \cdot 9,81 \frac{4}{2} \cdot 23,1 = 453,2 \text{ кН},$$

- справа

$$P_{изб.2} = \rho g \frac{H_2}{2} S_2 = 1000 \cdot 9,81 \frac{2}{2} \cdot 11,55 = 113,3 \text{ кН}.$$

Поскольку центры давления смоченных поверхностей для прямоугольных стенок погружены на глубину  $2/3$  их высоты, то плечи соответствующих сил равны:

$$OD_1 = \frac{2}{3} OA = \frac{2}{3} \cdot 4,62 = 3,08 \text{ м},$$

$$OD_2 = OA - \frac{1}{3} \cdot \frac{H_2}{\sin 60^\circ} = 4,62 - \frac{1 \cdot 2}{3 \sin 60^\circ} = 3,85 \text{ м}.$$

$$AB = H_1 \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) = 4 \cdot 0,58 = 2,31 \text{ м}.$$

С учетом результатов предыдущих вычислений

$$P_{\text{изб.1}} = 453,2 \text{ кН}; \quad P_{\text{изб.2}} = 113,3 \text{ кН}; \quad AO = 4,62 \text{ м};$$

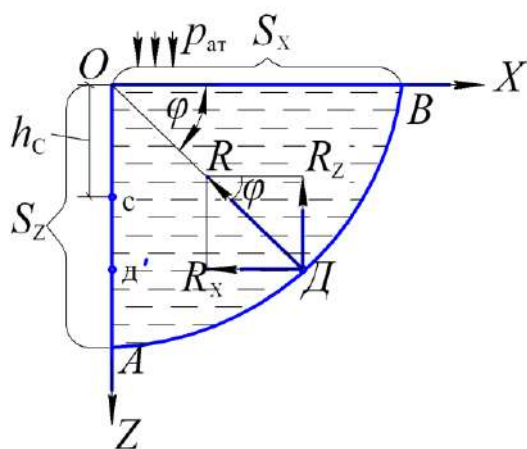
$$OD_2 = 3,85 \text{ м}; \quad OD_1 = 3,08 \text{ м}; \quad AB = 2,31 \text{ м}$$

по формуле (2.15) находим величину усилия  $T$ , необходимого для подъема щита:

$$T = \frac{453,2 \cdot 3,08 - 113,3 \cdot 3,85}{2,31} = 415,4 \text{ кН}.$$

## 2.2. Сила давления жидкости на криволинейные поверхности

В инженерной практике довольно часто приходится сталкиваться с расчетом покоящихся объемов жидкости, ограниченных криволинейными поверхностями. В качестве примера следует назвать запасные емкости для хранения чистой воды в системах водоснабжения; резервуары для хранения запасов нефтепродуктов на планируемый период в сельскохозяйственных предприятиях; баки водонапорных башен и т.д.



$R$  – реакция стенки, равная равнодействующей сил давления на криволинейную поверхность  $S$ ;  
 $R_x, R_z$  – составляющие сил реакции по координатным осям, соответственно равные  $P_x$  и  $P_z$ ;  
 $S_x, S_z$  – площади горизонтальной и вертикальной проекций криволинейной поверхности  $AB$ ;  
т.  $D'$  – центр давления горизонтальной составляющей  $R_x$ ;  
т.  $D$  – центр давления равнодействующей сил гидростатического давления на поверхность  $AB$ .

Рисунок 2.8 – Схема к определению силы давления на цилиндрическую поверхность  $AB$

В случае цилиндрической криволинейной поверхности (рис. 2.8) и давлении на свободной поверхности  $p_0 = p_{\text{ат}}$ , результирующая сил гидростатического давления  $P$  равна геометрической сумме горизонтальной  $P_x(R_x)$  и вертикальной  $P_z(R_z)$  ее составляющих, то есть:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}. \quad (2.16)$$

Здесь  $P_x$  – горизонтальная составляющая, равная

$$P_x = \rho g h_c S_z, \quad (2.17)$$

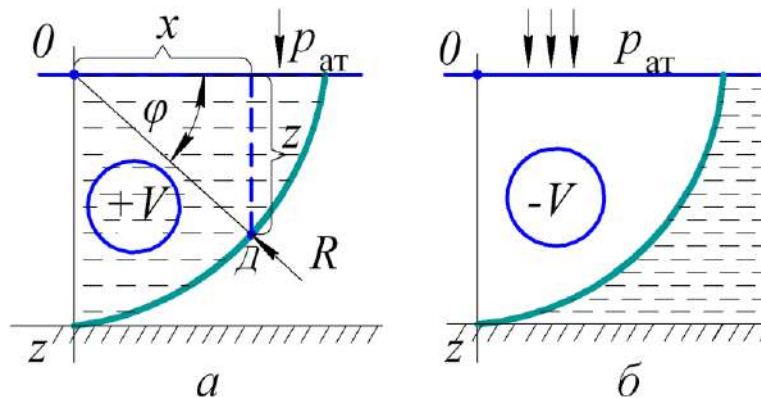
где  $h_c$  – глубина погружения центра тяжести проекции  $S_z$  относительно свободной поверхности, м;

$S_z$  – площадь вертикальной проекции поверхности  $AB$ ,  $\text{м}^2$ .

Вертикальная составляющая силы давления  $P_z$ , равна весу жидкости в объеме тела давления  $V$ :

$$P_z = \rho g V, \quad (2.18)$$

где  $V$  – объем тела давления (рис. 2.9), то есть объем жидкости реальный или мнимый, опирающийся сверху на криволинейную поверхность, ограниченный свободной поверхностью и двумя вертикальными плоскостями, проведенными через крайние образующие цилиндрической поверхности.



*a* – реальный; *б* – мнимый

Рисунок 2.9 – Примеры объемов тел давления

Равнодействующая сил давления  $R$  проходит через точку пересечения горизонтальной силы с вертикальной составляющей и центр окружности  $O$  (рис. 2.8). Координаты центра давления равнодействующей определяют следующим образом:

$$z/x = \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.19)$$

$$\text{откуда } z = x \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.20)$$

Здесь  $x$  и  $z$  – соответственно горизонтальная и вертикальная координата центра давления, м.

Подставив значение  $z$  (2.20) в уравнение окружности:

$$z^2 + x^2 = r^2 \quad (2.21)$$

получим следующее выражение:

$$(x \operatorname{tg} \varphi)^2 + x^2 = r^2, \quad (2.22)$$

где  $r$  – радиус цилиндрической поверхности, м.

$$\operatorname{tg} \varphi = P_z / P_x \quad (2.23)$$

определяют как отношение числовых значений составляющих сил давления, полученных их формул (2.18) и (2.17).

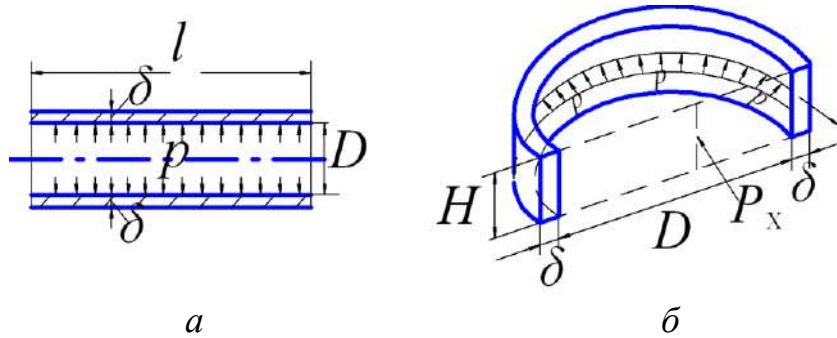
Таким образом, выполнив расчеты по формулам (2.17)...(2.23), находят значение горизонтальной и вертикальной координат центра давления, а также величину угла  $\varphi$ , равного

$$\varphi = \arctg (z/x). \quad (2.24)$$

Выполнив графические построения (рис. 2.9, а), определяют место приложения равнодействующей  $R$  к криволинейной поверхности – точку  $D$ .

Однако выполнение расчетов гидравлических устройств чаще всего связано не с определением величины результирующей силы гидростатического давления на криволинейную поверхность и нахождением точки ее приложения, а с расчетом только одной из составляющих сил давления:  $P_x$  или  $P_z$  (составляющая  $P_y$  при расчете цилиндрических поверхностей отсутствует). Значения этих составляющих чаще всего используют в расчетах на прочность стенок сосудов и емкостей, заполненных жидкостью, то есть определении толщины стенок сосудов.

Рассмотрим примеры расчета толщины стенок сосудов на примерах горизонтального трубопровода (рис. 2.10, а) и вертикального резервуара (рис. 2.10, б).



$D$  – внутренний диаметр, мм;  $H$  – высота сосуда, м;  $\delta$  – толщина стенки, мм;  
 $l$  – длина трубопровода;  $p$  – избыточное давление, Па;  $P_x$  – горизонтальная составляющая силы давления, Н

Рисунок 2.10 – К расчету толщины стенок сосудов

Пусть имеется горизонтальный трубопровод внутреннего диаметра  $D$ , заполненный жидкостью, находящийся под действием избыточного давления  $p$  (рис. 2.10, а). Под влиянием этого давления стенки трубопровода испытывают действие разрывающего усилия  $F_{\text{разр}}$ , стремящегося разорвать трубопровод по его образующей:

$$F_{\text{разр}} = pDl, \quad (2.25)$$

где  $D, l$  – соответственно внутренний диаметр и длина трубопровода.

Соответственно, разрывающие силы уравниваются силой сопротивления, возникающей в материале, из которого изготовлен трубопровод  $F_{\text{сопр}}$ :

$$F_{\text{сопр}} = [\sigma_p] \cdot f, \quad (2.26)$$

где  $[\sigma_p]$  – допускаемое напряжение на растяжение, МПа;

$f$  – площадь сечения стенок трубопровода, равная

$$f = 2\delta \cdot l, \quad (2.27)$$

где  $\delta$  – искомая толщина стенок трубопровода.

С учетом равенства сил  $F_{\text{разр}}$  и  $F_{\text{сопр}}$  получаем следующее выражение:

$$pDl = [\sigma_p] \cdot 2\delta l,$$

решая которое находим

$$\delta = pD / (2[\sigma_p]) \quad (2.28)$$

В случае вертикального цилиндрического сосуда диаметром  $D$ , высотой  $H$ , заполненного до краев жидкостью и испытывающего избыточное давление  $p$  (рис. 2.10, б) разрывающее усилие  $F'_{\text{разр}}$  определится как произведение горизонтальной составляющей избыточного давления  $p$  на проекцию цилиндрического сосуда на вертикальную плоскость:

$$F'_{\text{разр}} = p \cdot DH, \quad (2.29)$$

где  $p$  – наибольшее давление жидкости у основания сосуда, равное

$$p = \rho gH. \quad (2.30)$$

Таким образом, разрывающее усилие, действующее поперек оси сосуда, равно:

$$F'_{\text{разр}} = \rho gH^2 D. \quad (2.31)$$

Для определения толщины стенок сосуда имеем равенство сил:

$$\rho gH^2 D = 2H \cdot \delta[\sigma_p], \quad (2.32)$$

откуда

$$\delta = \rho gHD / (2[\sigma_p]). \quad (2.33)$$

Формула (2.33) справедлива для условия действия разрывающего усилия поперек оси сосуда. В случае действия разрывающего усилия, направленного вдоль оси сосуда, величина его определится умножением избыточного давления  $p$  в сосуде у его днища (или крышки) на площадь днища:

$$F''_{\text{разр}} = p \cdot \pi D^2 / 4 \quad (2.34)$$

Площадь сечения, по которой возможен отрыв днища от цилиндрической части сосуда, равна:

$$S_{\text{отр}} = \pi D \cdot \delta', \quad (2.35)$$

где  $\delta'$  – толщина стенок.

С учетом равенства сил разрыва и сопротивления имеем следующее выражение:

$$p\pi D^2 / 4 = \pi D \cdot \delta'[\sigma_p], \quad (2.36)$$

откуда

$$\delta' = pD / (4[\sigma_p]), \quad (2.37)$$

то есть толщина стенки, рассчитанная из условия сопротивления разрывающему усилию поперек оси сосуда, в два раза меньше, чем в первом случае.

Таким образом, наиболее опасным является разрыв трубопровода и сосуда в продольном направлении и поэтому толщину стенок следует определять из формулы (2.28), а выражение (2.37) использовать при расчете поперечных швов.

Недостатком вышеприведенной методики расчета толщины стенок сосудов является ее приближенный характер, не учитывающий особенностей конструкций сосудов и емкостей. С целью приведения в соответствие тео-

рии и практики по ГОСТ Р 52857.2 – 2007 «Сосуды и аппараты» толщину стенок гладких цилиндрических обечаек  $\delta$ , нагруженных внутренним избыточным давлением следует определять из неравенства:

$$\delta \geq \delta_p + c, \quad (2.38)$$

где расчетную толщину стенки определяют по формуле:

$$\delta_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p}. \quad (2.39)$$

Таким образом, в формулу (2.28) введены две поправки:  
*во-первых*,  $c$  – прибавка на коррозию и эрозию металла;  
*во-вторых*, учтена непрочность корпуса сосуда по причине наличия продольного сварного шва  $\varphi_p$  (при его отсутствии  $\varphi_p = 1,0$ ).

Обязательным для обеспечения прочности конструкции, является соблюдение следующих условий:

$$\frac{\delta - c}{D} \leq 0,1 \quad \text{для обечаек и труб при } D \geq 200\text{мм} \quad (2.40)$$

$$\frac{\delta - c}{D} \leq 0,3 \quad \text{для труб при } D < 200\text{мм} \quad (2.40a)$$

В соответствии с положениями ГОСТа [18] расчет *толщины* плоских крышек и днищ  $\delta_1$  следует выполнять по формуле:

$$\delta_1 \geq \delta_{1p} + c, \quad (2.41)$$

$$\text{где } \delta_{1p} = k \cdot k_o D_p \sqrt{\rho / (\varphi_p [\sigma])}, \quad (2.42)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий особенности конструкции днищ и крышек, в том числе способ присоединения к корпусу, см. таблицу 4 ГОСТа [18];

$D_p$  – расчетный диаметр крышки;

$\varphi_p$  – коэффициент прочности сварного шва, см. табл. 5 ГОСТа [18];

$k_o$  – коэффициент ослабления днищ и крышек отверстиями:

- при одном отверстии

$$k_o = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2} \quad (2.43)$$

- при нескольких отверстиях

$$k_o = \sqrt{\frac{1 - (\sum d_i / D_p)^3}{1 - \sum d_i / D_p}} \quad (2.44)$$

где  $d$  – диаметр отверстия, мм;

$\sum d_i$  – максимальная сумма диаметров отверстий и хорд в наиболее ослабленном сечении днища или крышки (определяется согласно расчетной схемы).

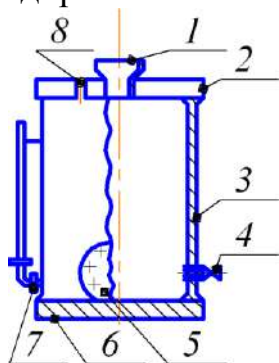


Формулы (2.41)...(2.44) применимы для расчета плоских круглых днищ и крышек при условии выполнения неравенства:

$$\frac{\delta_1 - c}{D_p} \leq 0,11. \quad (2.45)$$

### Пример

Требуется рассчитать толщину стенок корпуса, крышки и днища запасной емкости (рис. 2.11), предназначенной для хранения дизельного топлива плотностью  $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$  на территории нефтехозяйства сельскохозяйственного предприятия.



- 1 – заливная горловина; 2 – крышка; 3 – обечайка;  
4, 7 – отверстия соответственно для выпуска дизтоплива и  
присоединения уровнемера; 5 – смотровой люк; 6 – днище;  
8 – отверстие для предохранительного клапана

Рисунок 2.11 – Запасная емкость для хранения дизельного топлива

Корпус емкости 3 представляет собой сварную конструкцию из отдельных листов углеродистой стали ( $[\sigma] = 110 \text{ МПа}$ ), в нижней части которого два отверстия, соответственно для присоединения сливного крана 4 и уровнемера 7. В крышке 2 также имеются два отверстия – для заливной горловины 1 и предохранительного клапана 8. В нижней части поверхности корпуса имеется смотровой люк 5 для периодического техобслуживания емкости.

Размеры емкости: высота  $H = 5 \text{ м}$ ; внутренний диаметр  $D = 2,5 \text{ м}$ .

### Решение

Приняв во внимание особенности конструкции емкости, а также тот факт, что в летний период на свободной поверхности может возникать избыточное давление паров испаряющегося топлива  $p_m = 20 \text{ кПа}$ , определим величину возможного максимального давления на уровне дна бака  $p$ , кПа:

$$p = p_m + \rho g H,$$

$$p = 20 \cdot 10^3 + 0,86 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 5 = 62,2 \text{ кПа}.$$

По формуле (2.39) определяем толщину стенки резервуара  $\delta$ , мм:

$$\delta = pD / (2[\sigma]\varphi_p - p) + c,$$

где  $\varphi_p$  – коэффициент прочности продольных сварных швов,  $\varphi_p = 0,65$ ;

$c$  – запас на коррозию и эрозию материала стенки резервуара,  
 $c = 4 \text{ мм}$ .

$$\delta = 62,2 \cdot 10^3 \cdot 2,5 / (2 [110 \cdot 10^6] \cdot 0,65 - 62,2 \cdot 10^3) + 0,004 =$$

$$= 0,0011 + 0,004 = 0,0051 \text{ м}$$

Согласно неравенства (2.38) принимаем толщину стенки  $\delta = 6$  мм и проверяем правильность расчета:

$$\frac{\delta - c}{D} \leq 0,1$$

$$\frac{6 - 4}{2500} = 0,0008$$

Неравенство выполнено, так как  $0,0008 < 0,1$ .

Находим расчетную толщину крышки  $\delta_{кр}$  по формуле (2.42):

$$\delta_{кр} = k \cdot k_o D_p \sqrt{\rho / (\varphi[\sigma])} + c.$$

Здесь  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий условие закрепление крышки с корпусом емкости. Согласно таблицы 4 ГОСТа [18] принимаем  $k = 0,5$ ;

$k_o$  – коэффициент ослабления крышки по причине наличия в ней двух отверстий диаметрами  $d_{min} = 15$  мм и  $d_{max} = 100$  мм. согласно формуле (2.43) равен 1,02;

$D_p$  – диаметр крышки. Конструктивно принимаем  $D_p = D + 2a$ , где  $D = 2500$  мм (диаметр сосуда) и  $a = 20$  мм (полочка), в результате  $D_p = 2540$  мм;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва; принимаем  $\varphi = 0,9$  для поперечного сварного шва

$$\delta_{кр} = 0,5 \cdot 1,02 \cdot 2,54 \times$$

$$\times \sqrt{20 \cdot 10^3 / (0,9 \cdot 110 \cdot 10^6)} + 0,003 = 0,0185 + 0,003 = 0,021 \text{ м}$$

Принимаем толщину крышки  $\delta_{кр} = 25$  мм и проверяем выполнимость неравенства (2.45)

$$\frac{\delta_{кр} - c}{D_p} \leq 0,11; \quad \frac{25 - 3}{2540} = 0,009.$$

Да, неравенство справедливо, так как  $0,009 < 0,11$ .

Вычислим теперь толщину днища  $\delta_{дн}$  емкости, находящегося под давлением  $p = 62,2$  кПа, по формулам (2.41) и (2.42):

$$\delta_{кр} = k \cdot k_o D_p \sqrt{p / (\varphi[\sigma])} + c$$

Здесь  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий особенности конструкции днища и способ его соединения с поперечным сварным швом изнутри и снаружи. Согласно такого закрепления днищ из таблицы 4 ГОСТа [18]  $K = 0,5$ ;

$k_o$  – коэффициент ослабления плоского днища при наличии в нем отверстий.

Поскольку в данной конструкции они отсутствуют,  $K_o = 1,0$ ;

$D_p$  – расчетный диаметр днища,  $D_p = 2520$  мм ;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва; принимаем  $\varphi = 0,9$  согласно ГОСТа [18];

$c$  – запас на коррозию и эрозию металла,  $c = 3$  мм.

Подставляем значения параметров в формулу (2.42) и находим численное значение толщины днища:

$$\delta_{кр} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 2,52 \times \sqrt{62,2 \cdot 10^3 / (0,9 \cdot 110 \cdot 10^6)} + 0,003 = 0,032 + 0,003 = 0,035 \text{ м.}$$

Принимаем толщину днища емкости  $\delta_{кр} = 35$  мм и проверяем выполнение неравенства (2.44)

$$\frac{\delta_{дн} - c}{D_p} \leq 0,11; \quad \frac{0,035 - 0,003}{2,520} = 0,0127.$$

Да, неравенство (2.45) выполнено, так как  $0,0127 < 0,11$ .

Ответ: толщина стенки корпуса  $\delta = 6$  мм;

толщина крышки емкости  $\delta = 25$  мм;

толщина днища емкости  $\delta = 35$  мм.

**Задача 26** (рис. 2.13). Квадратное отверстие со стороной  $h$  в вертикальной стенке резервуара закрыто плоским щитом. Щит закрывается грузом массой  $m$  на плече  $x$ . Определить величину массы груза, необходимую для удержания глубины воды в резервуаре  $H$ , если задано расстояние  $a$ . Построить эпюру гидростатического давления на щит. Исходные данные к задаче приведены в табл. 26.

Таблица 26

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $h$             | м                 | 1                      | 1,5 | 0,8 | 2,0 | 1,8 |
| $H$             | м                 | 2,5                    | 3,4 | 2,0 | 5,0 | 4,5 |
| $a$             | м                 | 0,5                    | 0,9 | 0,7 | 2,0 | 1,5 |
| $x$             | м                 | 1,3                    | 1,5 | 1,0 | 2,7 | 2,2 |

**Задача 27** (рис. 2.14). В вертикальной стенке закрытого резервуара, заполненного жидкостью, имеется квадратное отверстие со стороной  $b$ . Определить величину и точку приложения силы давления жидкости на крышку, перекрывающую это отверстие, если заданы глубина  $H$  и показание ртутного  $U$ -образного манометра, подключенного к резервуару,  $h$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 27.

Таблица 27

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |     |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|-----|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3   | 4    | 5    |
| $\rho_{ж}$      | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 1000 | 880 | 850  | 910  |
| $H$             | м                 | 1                      | 1,5  | 2,0 | 1,25 | 0,9  |
| $h$             | мм                | 300                    | 250  | 320 | 295  | 310  |
| $b$             | м                 | 0,5                    | 0,7  | 1,2 | 0,75 | 0,45 |

**Задача 28** (рис. 2.15). Прямоугольный поворотный затвор размерами  $b \times a$  перекрывает выход из резервуара. На каком расстоянии необходимо расположить ось затвора  $O$ , чтобы при открывании его в начальный момент необходимо было преодолеть только трение в шарнирах, если глубина воды в резервуаре  $H$ ? Исходные данные к задаче приведены в табл. 28.

Таблица 28

| Исходные | Единицы | Значения для вариантов |
|----------|---------|------------------------|
|----------|---------|------------------------|

| данные            | измерения         | 1    | 2       | 3       | 4      | 5       |
|-------------------|-------------------|------|---------|---------|--------|---------|
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 1000 | 910     | 850     | 880    | 960     |
| $b \times a$      | м                 | 1×2  | 1,2×1,5 | 0,9×1,7 | 1,25×2 | 1,3×2,5 |
| $H$               | м                 | 3    | 3,5     | 4,0     | 3,2    | 3,8     |

**Задача 29** (рис.2.16). Труба прямоугольного сечения  $a \times b$  для выпуска жидкости из открытого хранилища закрывается откидным плоским клапаном, расположенным под углом  $\alpha$  к горизонту. Определить начальное подъемное усилие  $T$  троса, чтобы открыть клапан при глубине нефти  $h_1$ . построить эпюру гидростатического давления на клапан. Исходные данные к задаче приведены в таблице 29.

Таблица 29

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |         |          |         |         |
|-------------------|-------------------|------------------------|---------|----------|---------|---------|
|                   |                   | 1                      | 2       | 3        | 4       | 5       |
| $a \times b$      | м <sup>2</sup>    | 0,5×0,2                | 0,6×0,4 | 0,7×0,35 | 0,3×0,3 | 0,9×0,4 |
| $\alpha$          | ...°              | 60                     | 45      | 60       | 45      | 60      |
| $h_1$             | м                 | 2,8                    | 2,5     | 3,0      | 2,7     | 2,4     |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 960     | 1000     | 880     | 910     |

**Задача 30** (рис. 2.17). Для регулирования уровня жидкости в напорном резервуаре установлен поворачивающийся прямоугольный затвор  $AB$ , который открывает отверстие в вертикальной стенке. Определить начальное натяжение троса  $T$ , если заданы размеры клапана  $a \times b$ , глубина  $h$  и манометрическое давление на поверхности воды  $p_m$ . Трением в шарнирах пренебречь. Исходные данные к задаче приведены в табл. 30.

Таблица 30

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |         |         |         |
|-------------------|-------------------|------------------------|-------|---------|---------|---------|
|                   |                   | 1                      | 2     | 3       | 4       | 5       |
| $a \times b$      | м <sup>2</sup>    | 1×2                    | 1,5×3 | 1,2×2,0 | 0,8×1,5 | 1,2×2,4 |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 1000  | 860     | 910     | 850     |
| $p_m$             | кПа               | 8,7                    | 10    | 8,5     | 8,0     | 7,0     |
| $h$               | м                 | 2,9                    | 2,5   | 3,0     | 2,9     | 2,8     |

**Задача 31** (рис.2.18). Автоматическое регулирование уровня жидкости в напорном резервуаре осуществляется поворачивающимся щитом  $AB$ . Найти глубину  $h$  погружения оси поворота щита и силу гидростатического давления жидкости на него, если размеры щита  $a \times b$ , глубина  $h_1$  и манометрическое давление на свободной поверхности  $p_m$ . Трением в шарнире пренебречь. Построить эпюру гидростатического давления на щит. Исходные данные к задаче приведены в табл. 31.

Таблица 31

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |         |         |         |
|-------------------|-------------------|------------------------|-------|---------|---------|---------|
|                   |                   | 1                      | 2     | 3       | 4       | 5       |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 1000  | 860     | 910     | 850     |
| $a \times b$      | м <sup>2</sup>    | 1×2                    | 1,5×3 | 1,2×2,0 | 0,8×1,5 | 1,2×2,4 |
| $p_m$             | кПа               | 87                     | 100   | 85      | 80      | 70      |
| $h_1$             | м                 | 2,9                    | 2,5   | 3,0     | 2,9     | 2,8     |

Примечание: условие равновесия щита - сумма моментов относительно оси поворота принять равной 0.

**Задача 32** (рис. 2.19). В наклонной стенке резервуара для выпуска жидкости имеется прямоугольное отверстие с размерами  $a \times b$ . Определить силу гидростатического давления, которую воспринимают болты крепления крышки, координату центра давления. Построить эпюру гидростатического давления на крышку. Глубина до верхней кромки отверстия  $H$ , угол наклона стенки к горизонту равен  $\alpha$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 32.

Таблица 32

| Исходные | Единицы | Значения для вариантов |  |  |  |  |
|----------|---------|------------------------|--|--|--|--|
|----------|---------|------------------------|--|--|--|--|

| данные            | измерения         | 1       | 2       | 3   | 4        | 5       |
|-------------------|-------------------|---------|---------|-----|----------|---------|
| $\alpha$          | ...°              | 60      | 45      | 60  | 45       | 60      |
| $H$               | м                 | 3       | 2,5     | 2,8 | 2,7      | 2,6     |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 870     | 880     | 810 | 820      | 850     |
| $a \times b$      | м <sup>2</sup>    | 0,8×1,6 | 0,9×1,8 | 1×2 | 0,75×1,5 | 1,1×2,0 |

**Задача 33** (рис.2.20). Квадратное отверстие со стороной  $a$  в наклонной стенке резервуара с водой закрыто щитом. Определить натяжение каната  $T$  при следующих данных:  $H$  – глубина воды перед стенкой резервуара;  $b$  – расстояние от шарнира до точки крепления каната. Построить эпюру избыточного гидростатического давления на щит  $OA$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 33.

Таблица 33

| Исходные данные       | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                       |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $a$                   | м                 | 1,6                    | 0,8 | 1,2 | 0,9 | 1,2 |
| $b$                   | м                 | 0,8                    | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,8 |
| $H$                   | м                 | 2,1                    | 2,2 | 2,6 | 2,4 | 2,3 |
| $\alpha_1 = \alpha_2$ | ...°              | 60                     | 45  | 30  | 60  | 45  |

**Задача 34** (рис.2.21). В перегородке, разделяющей резервуар с водой на две части имеется квадратное отверстие со стороной  $a$ . Определить, какую силу  $T$  нужно приложить к тросу для поворота щита при следующих данных:  $H_1$  – глубина воды слева от перегородки;  $H_2$  – глубина воды справа от перегородки;  $\alpha$  – угол наклона троса к горизонту. Исходные данные к задаче приведены в табл. 34.

Таблица 34

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $a$             | м                 | 0,8                    | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 0,8 |
| $H_1$           | м                 | 1,8                    | 1,8 | 2,0 | 1,8 | 2,0 |
| $H_2$           | м                 | 1,0                    | 1,2 | 1,5 | 1,3 | 1,6 |
| $\alpha$        | ...°              | 60                     | 45  | 30  | 60  | 45  |

**Задача 35** (рис.2.22). Наклонный щит  $AB$  удерживает уровень воды  $H$  при угле наклона  $\alpha$  и ширине щита  $b$ . Требуется разделить щит по высоте на две части так, чтобы сила давления  $P_1$  на верхнюю часть его была равна силе давления  $P_2$  на нижнюю часть. Определить положение центров приложения этих сил. Исходные данные к задаче приведены в табл. 35.

Таблица 35

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| $H$             | м                 | 2,0                    | 1,5 | 1,2 | 3,0 | 2,5 | 2,7 |
| $\alpha$        | ...°              | 45                     | 60  | 55  | 50  | 65  | 70  |
| $b$             | м                 | 10                     | 5   | 15  | 20  | 12  | 24  |

**Задача 36** (рис.2.23). Определить силу  $F$  на штоке золотника, если известно показание вакуумметра, избыточное давление  $p_1$ , диаметры поршней  $D$  и  $d$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 36.

Таблица 36

| Исходные | Единицы | Значения для вариантов |  |  |  |  |  |
|----------|---------|------------------------|--|--|--|--|--|
|----------|---------|------------------------|--|--|--|--|--|

| данные            | измерения         | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
|-------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $p_{\text{вак}}$  | кПа               | 60  | 75  | 50  | 70  | 80  |
| $p_1$             | МПа               | 1   | 1,2 | 1,1 | 1,3 | 1,5 |
| $H$               | м                 | 3   | 2,5 | 3,5 | 2,8 | 3,2 |
| $D$               | мм                | 20  | 25  | 30  | 29  | 32  |
| $d$               | мм                | 15  | 20  | 25  | 21  | 29  |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 950 | 840 | 750 | 910 | 875 |

**Задача 37** (рис.2.24). Поворотный клапан закрывает выход из бензохранилища в трубу квадратного сечения. Определить, какую силу  $T$  необходимо приложить к тросу для открытия клапана, если заданы следующие исходные данные: глубины  $h$  и  $H$ , угол наклона клапана к горизонту  $\alpha$ , удельный вес бензина  $\gamma=6867 \text{ Н/м}^3$ , избыточное давление паров бензина в резервуаре  $p_{\text{м}}$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 37.

Таблица 37

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $h$             | м                 | 0,3                    | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,4 |
| $H$             | м                 | 0,85                   | 1,9 | 1,4 | 1,2 | 1,3 |
| $\alpha$        | ...°              | 45                     | 30  | 60  | 45  | 30  |
| $p_{\text{м}}$  | кПа               | 0,6                    | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |

**Задача 38** (рис.2.25). Определить диаметр гидроцилиндра  $D_2$ , необходимый для подъема задвижки, установленной на трубопроводе с избыточным давлением  $p_{\text{м}}$ , если диаметр трубы  $D_1$  и вес подвижных частей устройства  $G$ . Давление за задвижкой равно атмосферному. Коэффициент трения задвижки в направляющих равен  $f$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 38.

Таблица 38

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |     |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|-----|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    |
| $p_{\text{м}}$  | МПа               | 1,0                    | 1,25 | 1,2  | 1,5  | 1,4 | 1,29 |
| $G$             | кН                | 2,0                    | 1,5  | 2,2  | 1,75 | 3,0 | 2,5  |
| $D_1$           | м                 | 1,0                    | 1,1  | 0,9  | 1,2  | 0,8 | 1,0  |
| $f$             |                   | 0,3                    | 0,25 | 0,4  | 0,35 | 0,2 | 0,28 |
| $d_{\text{шт}}$ | м                 | 0,45                   | 0,45 | 0,35 | 0,5  | 0,3 | 0,45 |

**Задача 39** (рис. 2.26). Определить величину результирующего давления воды на круглую крышку люка диаметром  $d$ , закрывающую отверстие на наклонной плоской перегородке бассейна. Угол наклона перегородки к горизонту равен  $\alpha$ . Длина наклонной перегородки от уровня воды до верха люка равна  $\ell$ . В одной части бассейна поддерживается уровень воды на высоте  $H_1$ , а в другой на высоте  $H_2$ . Найти точку приложения результирующей силы давления воды на крышку и построить эпюру давления.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 39.

Таблица 39

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| $d$             | м                 | 1,45                   | 1,9 | 2,0 | 1,5 | 1,6 | 1,8 |
| $\ell$          | м                 | 2,6                    | 2,1 | 3,5 | 3,7 | 3,0 | 1,6 |
| $H_1$           | м                 | 5,0                    | 7,0 | 6,5 | 8,0 | 7,5 | 4,0 |
| $H_2$           | м                 | 4,0                    | 6,0 | 5,0 | 6,9 | 6,8 | 3,0 |
| $\alpha$        | ...°              | 45                     | 60  | 45  | 60  | 45  | 60  |

**Задача 40** (рис. 2.27). На вертикальной стенке резервуара, в котором хранится жидкое масло, устроено отверстие, перекрытое прямоугольным плоским затвором высотой  $a$ . Уровень масла находится на  $h$  выше верхней кромки затвора. Затвор вращается вокруг

шарнира  $A$ . Определить ширину затвора, чтобы при его закрытии сила  $F$ , приложенная к верхней кромке, не превышала значения, указанного в таблице исходных данных.

Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно шириной затвора в пределах  $0,2 \dots 0,45$  м. Исходные данные к задаче приведены в табл. 40.

Таблица 40

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |      |      |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|------|------|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5    | 6   |
| $F$             | Н                 | 155                    | 480 | 280 | 1500 | 600  | 640 |
| $a$             | м                 | 0,3                    | 0,4 | 0,4 | 0,7  | 0,5  | 0,6 |
| $h$             | м                 | 0,5                    | 0,7 | 0,6 | 0,9  | 0,75 | 0,7 |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 850 | 890 | 860  | 880  | 865 |

**Задача 41** (рис. 2.28). Резервуар разделен вертикальной перегородкой на два отсека. В правом отсеке глубина воды  $h_2$ , а в левом  $h_1$ . В перегородке устроено круглое отверстие диаметром  $d$ , центр которого расположен на расстоянии  $h$  от дна. Отверстие перекрыто круглым плоским затвором, который может вращаться вокруг шарнира, укрепленного в верхней точке затвора. Какое усилие  $F$  нужно приложить в нижней точке затвора, чтобы его закрыть? Исходные данные к задаче приведены в табл. 41.

Таблица 41

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |     |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|-----|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    |
| $h_1$           | м                 | 1,7                    | 1,5  | 1,9  | 2,1  | 2,5 | 2,2  |
| $h_2$           | м                 | 1,2                    | 0,9  | 1,5  | 1,8  | 2,0 | 1,9  |
| $d$             | м                 | 0,6                    | 0,5  | 0,75 | 0,9  | 1,0 | 0,8  |
| $h$             | м                 | 0,5                    | 0,45 | 0,5  | 0,75 | 1,1 | 0,65 |

**Задача 42** (рис. 2.29). Определить давление  $p_2$ , создаваемое насосом в системе гидравлического подъемника при подъеме задвижки на трубопроводе. Избыточное давление в трубопроводе  $p_1$ . Диаметр задвижки  $D$ , диаметр гидравлического цилиндра  $d$  и штока  $d_{шт}$ . Вес задвижки и подвижных частей равняются  $G$ . Коэффициент трения задвижки в направляющих поверхностях  $f$ . Трением в цилиндре пренебречь. Давление за задвижкой атмосферное. Исходные данные к задаче приведены в табл. 42.

Таблица 42

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |      |      |       |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|------|------|-------|------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    |
| $p_1$           | кПа               | 490,5                  | 196,2 | 294  | 245  | 198,1 | 343  |
| $G$             | кН                | 1,96                   | 2,5   | 2,8  | 3,0  | 1,9   | 1,7  |
| $D$             | м                 | 0,6                    | 0,5   | 0,55 | 0,65 | 0,7   | 0,4  |
| $d$             | мм                | 250                    | 225   | 200  | 200  | 200   | 250  |
| $d_{шт}$        | мм                | 120                    | 100   | 90   | 80   | 110   | 120  |
| $f$             |                   | 0,5                    | 0,3   | 0,25 | 0,27 | 0,29  | 0,35 |

**Задача 43** (рис. 2.30). Щит, перегораживающий канал, имеет прямоугольную форму шириной  $b$ . В нижней части он закреплен шарнирно, а вверху удерживается канатом. Какова будет сила натяжения каната  $F$ , если вода расположена по обе стороны от щита, причем уровни ее соответственно равны  $H_1$  и  $H_2$ ? Канат присоединен на расстоянии  $H_0$  от шарнира. Исходные данные к задаче приведены в табл. 43.

Таблица 43

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| $H_1$           | м                 | 4,7                    | 4,5 | 3,2 | 3,5 | 4,0 | 4,9 |
| $H_2$           | м                 | 2,4                    | 3,0 | 1,6 | 2,7 | 2,2 | 2,5 |
| $H$             | м                 | 5,25                   | 5   | 3,8 | 4   | 4,5 | 5,6 |
| $b$             | м                 | 5                      | 5   | 4   | 10  | 3   | 6   |

**Задача 44** (рис. 2.31). Круглое отверстие в дне резервуара, заполненного жидкостью, закрывается откидным клапаном 1. Глубина жидкости в резервуаре  $h$ . Плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}}$ . Показания манометра  $M$   $p_m$ . Определить усилие  $T$ , необходимое для открытия клапана. Построить эпюру гидростатического давления на поверхность  $AB$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 44.

Таблица 44

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |      |     |     |
|-------------------|-------------------|------------------------|-----|-----|------|-----|-----|
|                   |                   | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5   | 6   |
| $d$               | мм                | 200                    | 150 | 120 | 110  | 100 | 175 |
| $h$               | м                 | 2,0                    | 2,2 | 2,1 | 2,25 | 2,3 | 2,0 |
| $p_m$             | кПа               | 78,5                   | 80  | 76  | 82,5 | 79  | 85  |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 800                    | 885 | 920 | 810  | 820 | 845 |

**Задача 45** (рис. 2.32). Дроссельный затвор диаметром  $D$ , установленный на трубопроводе, проводящем воду к гидротурбине, может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси  $O-O$ . Глубина погружения центра тяжести затвора  $H$ . Определить силу гидростатического давления  $F$  на затвор, точку ее приложения, момент  $M_F$  силы  $F$  относительно оси вращения и момент  $M_{\text{тр}}$  силы трения, если диаметр цапф  $d$  и коэффициент трения  $f$ . Построить эпюру гидростатического давления на затвор. Исходные данные к задаче приведены в табл. 45.

Таблица 45

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|-----|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   |
| $D$             | м                 | 2,5                    | 1,9  | 2,25 | 2,0  | 2,3  | 2,6 |
| $H$             | м                 | 12                     | 10   | 14   | 12   | 10   | 11  |
| $d$             | мм                | 400                    | 200  | 375  | 210  | 380  | 425 |
| $f$             |                   | 0,5                    | 0,45 | 0,4  | 0,55 | 0,35 | 0,3 |

**Задача 46** (рис. 2.33). Труба квадратного сечения со стороной  $a$  для выпуска жидкости из открытого резервуара закрывается откидным плоским клапаном, расположенным под углом  $\alpha$  к горизонту. Определить усилие  $T$ , которое нужно приложить к тросу, чтобы открыть клапан, если ось трубы расположена на глубине  $H$  от свободной поверхности. Исходные данные к задаче приведены в табл. 46.

Таблица 46

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |     |
|-------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|-----|
|                   |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   |
| $a$               | м                 | 0,5                    | 0,4  | 0,6  | 0,55 | 0,45 | 0,5 |
| $H$               | м                 | 5                      | 7    | 9    | 6    | 8    | 10  |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 1000 | 1025 | 1245 | 925  | 880 |
| $\alpha$          | °                 | 45                     | 30   | 25   | 30   | 35   | 45  |

**Задача 47** (рис. 2.34). Прямоугольный щит длиной  $a$  и шириной  $b$  закреплен шарнирно в точке  $O$ . Определить усилие  $T$ , необходимое для подъема щита, если известно, что глубина воды перед щитом  $H_1$ , после щита  $H_2$ , угол наклона щита к горизонту  $\alpha$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 47



Таблица 47

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |    |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   |
| a               | м                 | 5                      | 7  | 6   | 8   | 4   | 9   |
| $H_1$           | м                 | 4,3                    | 5  | 3   | 7,5 | 3,8 | 8,1 |
| $H_2$           | м                 | 2                      | 3  | 1,5 | 4,0 | 2,0 | 5,0 |
| $\alpha$        | ...°              | 60                     | 45 | 30  | 70  | 55  | 65  |
| b               | м                 | 5                      | 15 | 10  | 2   | 4   | 6   |

**Задача 48** (рис. 2.35). Отверстие шлюза-регулятора закрыто плоским металлическим затвором шириной  $b$ . Вес затвора  $G$ , коэффициент трения скольжения затвора по направляющим  $f$ . Определить начальную силу тяги  $T$ , необходимую для подъема затвора, равнодействующую сил давления воды на затвор и положение точки ее приложения. Удельный вес воды  $\gamma_v=9,81 \text{ кН/м}^3$ . Построить эпюру гидростатического давления на поверхность  $AO$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 48.

Таблица 48

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |     |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|------|-----|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3    | 4   | 5    | 6    |
| $f$             |                   | 0,5                    | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,39 | 0,35 |
| $H_1$           | м                 | 3                      | 3   | 4    | 4   | 5    | 5    |
| $H_2$           | м                 | 1                      | 2   | 2    | 2,5 | 3    | 3,5  |
| $G$             | кН                | 4,9                    | 5,6 | 8,9  | 9,8 | 7,6  | 4,5  |
| b               | м                 | 4                      | 5   | 10   | 2   | 7    | 9    |

**Задача 49** (рис. 2.36). Для создания подпора в реке применяется плотина Шануана, представляющая собой плоский прямоугольный щит, который может вращаться вокруг горизонтальной оси  $O$ . Угол наклона щита  $\alpha$ , глубина воды перед щитом  $h_1$ , а за щитом  $h_2$ . Определить положение оси вращения щита ( $X_0$ ), при котором в случае увеличения верхнего уровня воды выше плотины щит опрокидывался бы под ее давлением. Исходные данные к задаче приведены в табл. 49.

Таблица 49

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |      |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|------|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5   | 6   |
| $h_1$           | м                 | 2                      | 3   | 2,5 | 2,8  | 2,4 | 3,2 |
| $h_2$           | м                 | 0,4                    | 0,8 | 0,6 | 0,55 | 0,5 | 1,0 |
| $\alpha$        | ...°              | 60                     | 45  | 30  | 60   | 45  | 30  |

**Задача 50** (рис. 2.37). Прямоугольный резервуар разделен на два отсека. Глубина воды в первом отсеке  $H_1$  и во втором  $H_2$ . Ширина резервуара  $b=1 \text{ м}$ . Определить силы давления  $P_1$  и  $P_2$ , действующие на щит слева и справа, и точки их приложения, а также величину равнодействующей  $R$  и точку ее приложения. Построить эпюру гидростатического давления на поверхность  $AO$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 50.

Таблица 50

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| $H_1$           | м                 | 1,2                    | 2,0 | 1,6 | 2,5 | 1,8 | 3,0 |
| $H_2$           | м                 | 0,8                    | 1,0 | 1,2 | 2,0 | 1,5 | 2,6 |

Рисунки 2.13...2.37 к задачам темы 2

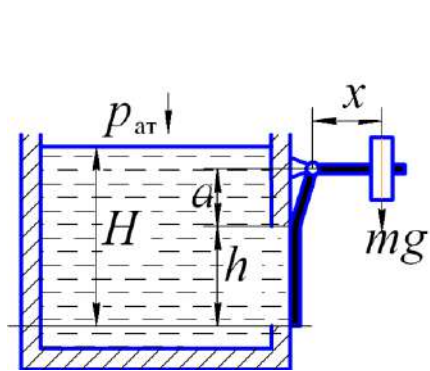


Рисунок 2.13

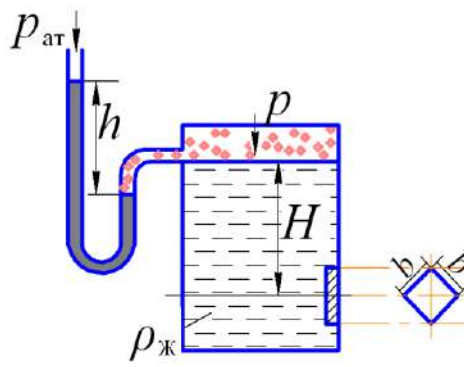


Рисунок 2.14

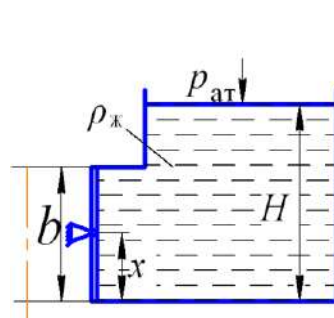


Рисунок 2.15

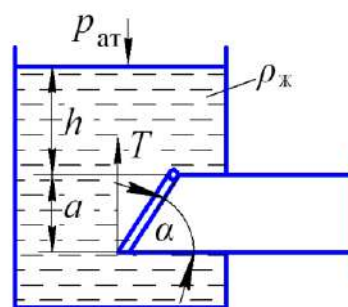


Рисунок 2.16

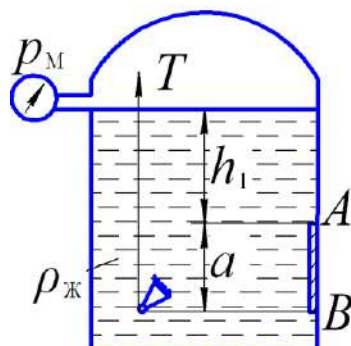


Рисунок 2.17

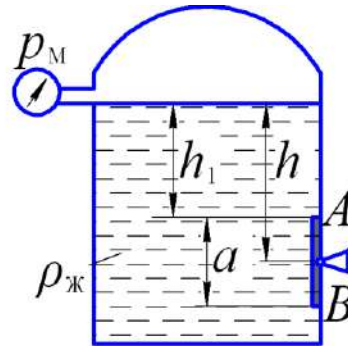


Рисунок 2.18

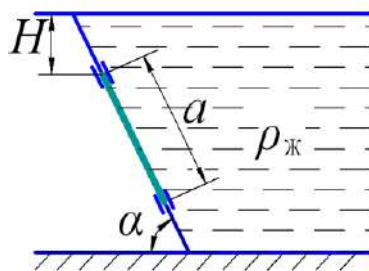


Рисунок 2.19

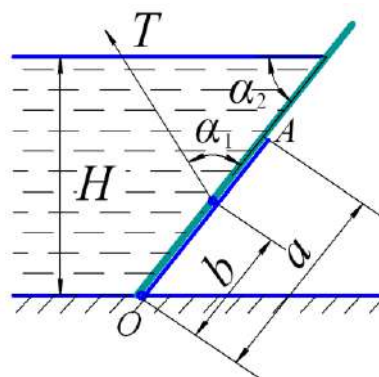


Рисунок 2.20

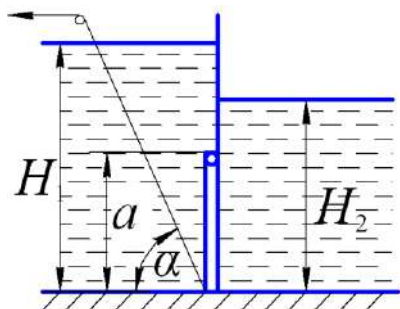


Рисунок 2.21

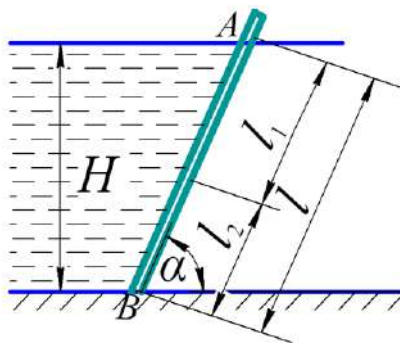


Рисунок 2.22

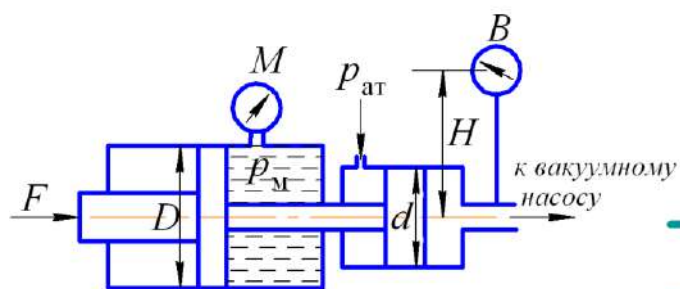


Рисунок 2.23

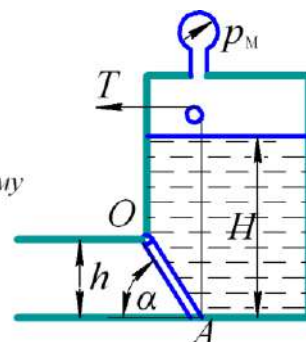


Рисунок 2.24

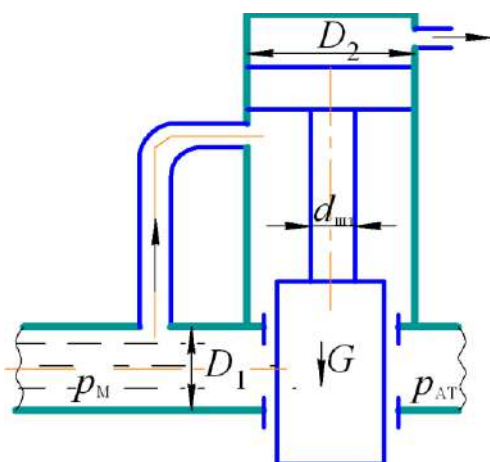


Рисунок 2.25

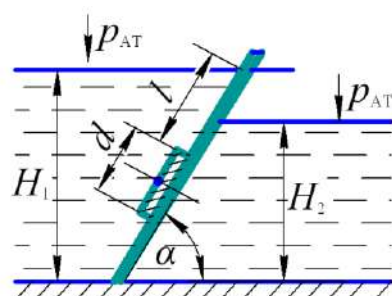


Рисунок 2.26

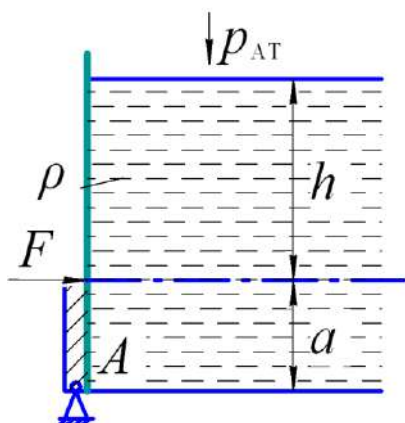


Рисунок 2.27

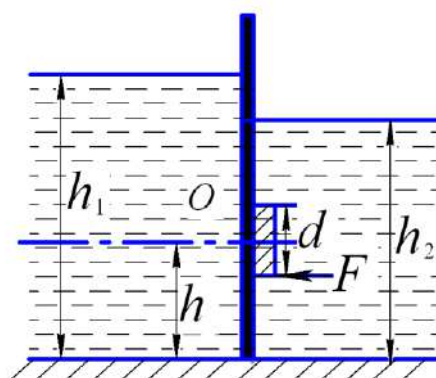


Рисунок 2.28

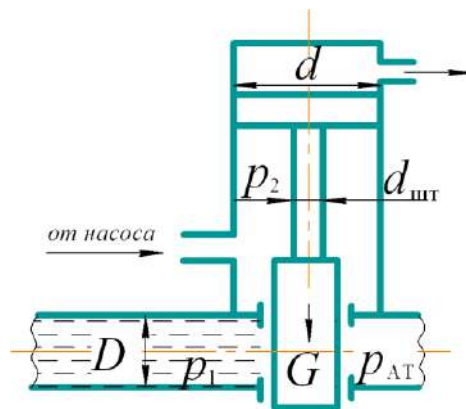


Рисунок 2.29

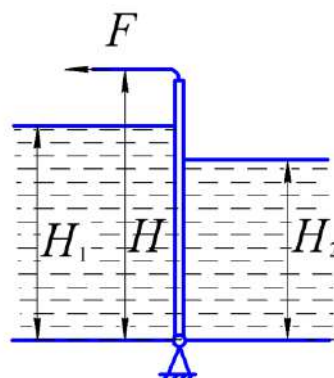


Рисунок 2.30

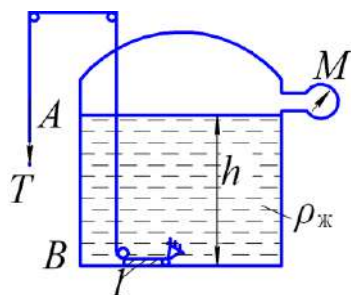


Рисунок 2.31

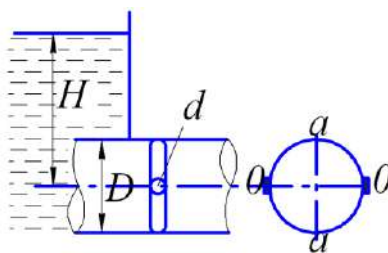


Рисунок 2.32

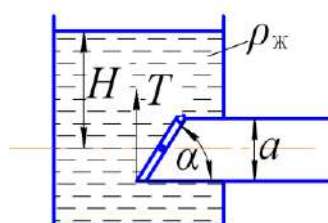


Рисунок 2.33

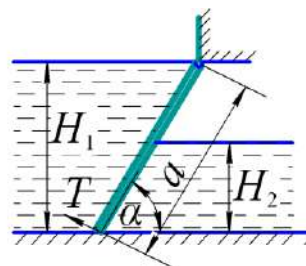


Рисунок 2.34

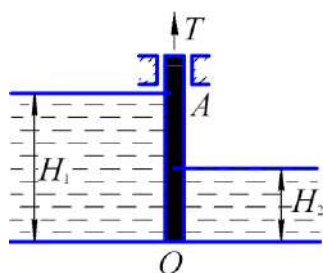


Рисунок 2.35

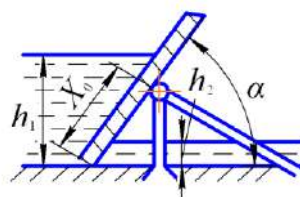


Рисунок 2.36

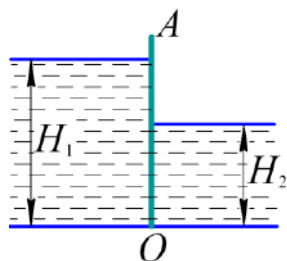


Рисунок 2.37

### ТЕМА 3. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Кинематика жидкости значительно отличается от кинематики твердого тела. Обусловлено это тем, что в отличие от твердого тела жидкость представляет собой сплошную массу из отдельных частиц, движущихся по различным траекториям и по своим законам. Изучение этих законов и их математическое описание связано с большими трудностями. Поэтому ввиду большого числа переменных величин, определяющих движение жидкости, в гидравлике использованы следующие упрощения:

- понятие *идеальной жидкости*, лишенной вязкости и имеющей во всех точках занимаемого объема постоянную плотность;
- *струйчатая модель движения*, согласно которой поток состоит из отдельных элементарных струек, изучение которых в отдельности дает возможность понять закономерности потока в целом;
- *средняя скорость*  $v$ , м/с в пределах рассматриваемого сечения потока, одинаковая для всех его точек.

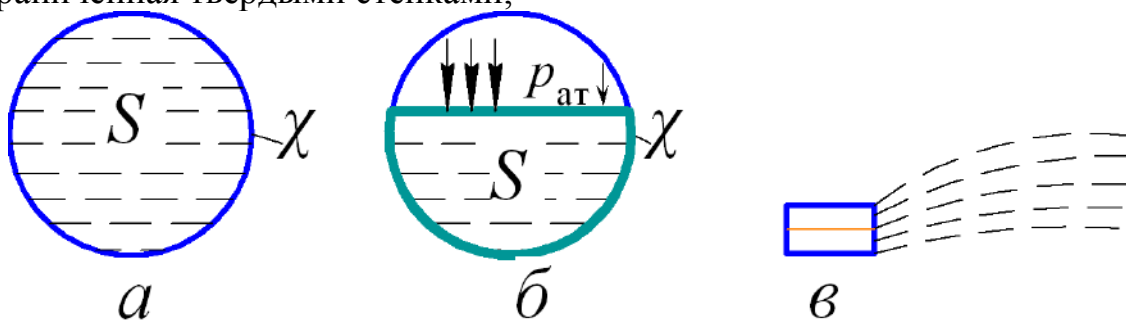
Различают следующие виды движения жидкости:

- в зависимости от фактора времени и пространственных координат – *установившееся* и *неустановившееся*;
- в зависимости от причин движения – *напорные*, *безнапорные* и *струи*.

Задачи, которые предстоит решать студентам в этой теме, связаны с расчетом параметров напорных потоков при установившемся движении.

Гидравлическими элементами потока жидкости (рис. 3.1) являются:

- *живое сечение*  $S$ , м<sup>2</sup>, то есть площадь поперечного сечения потока, нормальная к направлению течения;
- смоченный периметр  $\chi$ , м, то есть часть периметра живого сечения, ограниченная твердыми стенками;



а – напорное движение; б – безнапорное; в – струя  
 $S$  – живое сечение;  $\chi$  – смоченный периметр

Рисунок 3.1 – Гидравлические элементы потока

- гидравлический радиус  $R$ , то есть отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = S/\chi \quad (3.1)$$

- объемный расход  $Q$ , то есть объем жидкости  $V$ , протекающий через живое сечение потока в единицу времени  $t$ :

$$Q = V/t \quad (3.2)$$

Расход и средняя скорость связаны между собой формулами:

$$Q = v \cdot S, \quad (3.3)$$

$$\text{откуда } v = Q/S \quad (3.4)$$

Поскольку при установившемся движении расход в различных живых сечениях потока является величиной постоянной, то средние скорости и площади этих живых сечений связаны между собой *уравнением расхода для несжимаемой жидкости*:

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \dots v_n \cdot S_n = Q = \text{const}. \quad (3.5)$$

Другим, важнейшим уравнением гидродинамики, позволяющим решать задачи, связанные с расчетом параметров реальной жидкости, является уравнение Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\Sigma 1-2}, \quad (3.6)$$

члены которого имеют геометрический смысл, в том числе:

$z$  – геометрическая высота, то есть расстояние от произвольной горизонтальной плоскости сравнения до центра тяжести сечения потока, м;

$p/(\rho g)$  – абсолютная пьезометрическая высота, м;

$\alpha v^2/(2g)$  – скоростная высота, м;

$h_{\Sigma 1-2}$  – суммарная потеря напора между сечениями 1 и 2, обусловленная вязкостью жидкости, м;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока и представляющий собой отношение действительной кинетической энергии потока к кинетической энергии, вычисленной по средней скорости.

При установившемся движении жидкости различают два режима течения – *ламинарный* и *турбулентный*. Критерием, определяющим режим течения потока, служит неравенство:

$$Re \leq Re_{кр}, \quad (3.7)$$

где  $Re$  – действительное число Рейнольдса, равное для круглых напорных потоков

$$Re = vd/\nu, \quad (3.8)$$

а для потоков любой другой формы, в том числе, для безнапорных:

$$Re = v \cdot R/\nu, \quad (3.9)$$

где  $v$  – средняя скорость в сечении потока, м/с;

$d$  – диаметр трубы, м;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с. Для воды и других жидкостей величину  $\nu_{см.}$  в Приложении 3;

$Re_{кр}$  – критическое число Рейнольдса, при котором происходит смена режимов. Применительно к формуле (3.8)

$$Re_{кр} = 2300,$$

а применительно к формуле (3.9)

$$Re_{кр} = 580.$$

При условии выполнения неравенства

$$Re > Re_{кр}, \quad (3.10)$$

считают режим движения жидкости *турбулентным*, а при выполнении неравенства

$$Re < Re_{кр}, \quad (3.11)$$

*ламинарным*.

В общем случае четвертое слагаемое с правой части уравнения Бернулли (3.6) состоит из двух слагаемых:

- потери напора на местные сопротивления  $h_m$  (м), обусловленные вязкостью и преодолением местных гидравлических сопротивлений, создаваемых арматурой и прочим оборудованием трубопроводных сетей. Также местные потери вызывают места изменения формы и направления потока, где поток так или иначе деформируется – расширяется, сужается, искривляется или имеет место более сложная деформация. Местные потери напора выражают формулой Вейсбаха:

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g}, \quad (3.12)$$

где  $\zeta_m$  – безразмерный коэффициент местного сопротивления, см. Приложениеб;

$v$  – средняя скорость потока в сечении перед местным сопротивлением (при расширении) или за ним (при сужении) и в тех случаях, когда рассматривают потери напора в гидроарматуре различного назначения;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

- потери напора на трение  $h_l$  (м), обусловленные вязкостью и шероховатостью внутренних стенок трубопровода. Величина их прямо пропорциональна длине потока и определяется по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (3.13)$$

где  $l$ ,  $d$  – соответственно длина и диаметр потока, м;

$v^2/2g$  – скоростная высота;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, определяемый при ламинарном режиме по формуле:

$$\lambda = 64 / Re; \quad (3.14)$$

при турбулентном режиме  $\lambda$  помимо числа Рейнольдса зависит еще от относительной шероховатости  $\Delta_s/d$ , то есть

$$\lambda = f(Re, \Delta_s/d), \quad (3.15)$$

а также толщины ламинарного пристеночного слоя  $\delta$ , то есть области сопротивления. Здесь  $\Delta_3$  – эквивалентная шероховатость, см. Приложение 5.

При турбулентном движении различают три области гидравлического сопротивления:

- область гладких труб при выполнении неравенства:

$$Re_{кр} < Re < 20 \frac{d}{\Delta_3}, \quad (3.16)$$

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (3.17)$$

- область смешанного трения при условии выполнения неравенства:

$$20 \frac{d}{\Delta_3} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_3}; \quad (3.18)$$

$$\lambda = 0,11 (\Delta_3/d + 68/Re)^{0,25}; \quad (3.19)$$

- квадратичная область сопротивления при

$$Re > 500 \frac{d}{\Delta_3}; \quad (3.20)$$

$$\lambda = 0,11 (\Delta_3/d)^{0,25}. \quad (3.21)$$

Таким образом, в общем случае суммарные потери напора равны:

$$h_{\Sigma 1-2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \zeta_m \frac{v^2}{2g} \quad (3.22)$$

или

$$h_{\Sigma 1-2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum_{i=1}^n h_{mi} \quad (3.23)$$

при наличии в потоке нескольких местных сопротивлений и соблюдении условия:

$$l > (30 \dots 40)d, \quad (3.24)$$

где  $l$  – расстояние между местными сопротивлениями, м;

$d$  – диаметр трубопровода, м.

### Указания к решению задач

Задачи этой темы рассчитаны на применение уравнения Бернулли для реального потока жидкости, то есть с учетом гидравлических потерь и коэффициента Кориолиса  $\alpha$ .

Коэффициент Кориолиса при ламинарном режиме течения  $\alpha = 2$ . Для турбулентных потоков можно принимать  $\alpha = 1$ .

Общая схема использования уравнения Бернулли сводится к следующему:



- важно правильно выбрать те два сечения, для которых оно записывается. В качестве сечений рекомендуется брать:
  - свободную поверхность жидкости в резервуаре, где  $v \approx 0$ ;
  - выход в атмосферу, где  $p_m = 0$ ; то есть  $p_a = p_{ат}$ ;
  - сечение, где присоединен прибор (манометр, пьезометр, вакуумметр);
- намечают горизонтальную плоскость сравнения таким образом, чтобы  $z_1$  или  $z_2$  входящие в уравнение Бернулли, обратилось в нуль;
- сначала уравнение Бернулли записывают в общем виде (3.6) и устанавливают значения отдельных слагаемых с учетом исходных данных, а также исключают из него члены, равные нулю;
- подставляют найденные выражения для отдельных слагаемых в уравнение Бернулли (3.6), производят соответствующие преобразования и решают его относительно искомой величины;
- величина  $h_{\Sigma 1-2}$  в общем случае складывается из местных потерь, выраженных формулой Вейсбаха (3.12), и потерь напора на трение по длине, определяемых формулой Дарси-Вейсбаха (3.13).

Если в условии задачи не задана величина коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ , то порядок ее определения следующий:

- находят действительное число Рейнольдса по формуле (3.8) и устанавливают режим течения путем сравнения его с критическим, то есть проверяют выполнимость неравенств (3.10) и (3.11);

- устанавливают область гидравлического трения путем проверки выполнимости неравенств (3.16), (3.18) или (3.20), предварительно рассчитав границы областей

$$20 d/\Delta_{\text{э}} \quad (3.25)$$

$$\text{и } 500 d/\Delta_{\text{э}} \quad (3.26)$$

где  $d$  – внутренний диаметр потока, м;

$\Delta_{\text{э}}$  – абсолютная (эквивалентная) шероховатость стенок трубы, м. См. Приложение 5;

- вычисляют величину  $\lambda$  по одной из формул:

при ламинарном режиме – по формуле (3.14),

при турбулентном режиме:

- по ф. (3.17) в области гладких труб,

- по ф. (3.19) в области смешанного трения,

- по ф. (3.21) в квадратичной области сопротивления, по алгоритму, приведенному на рис. 3.2.

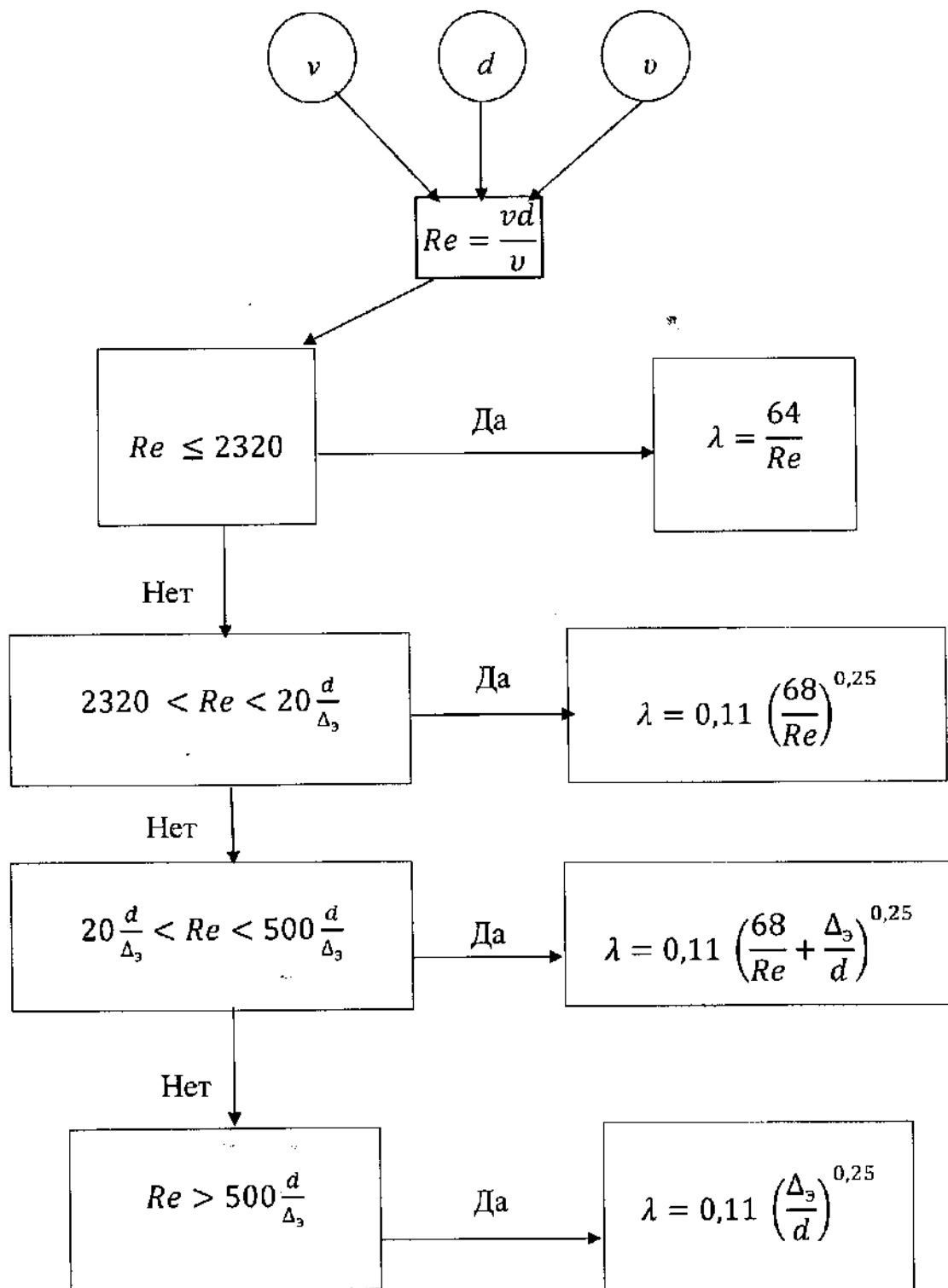


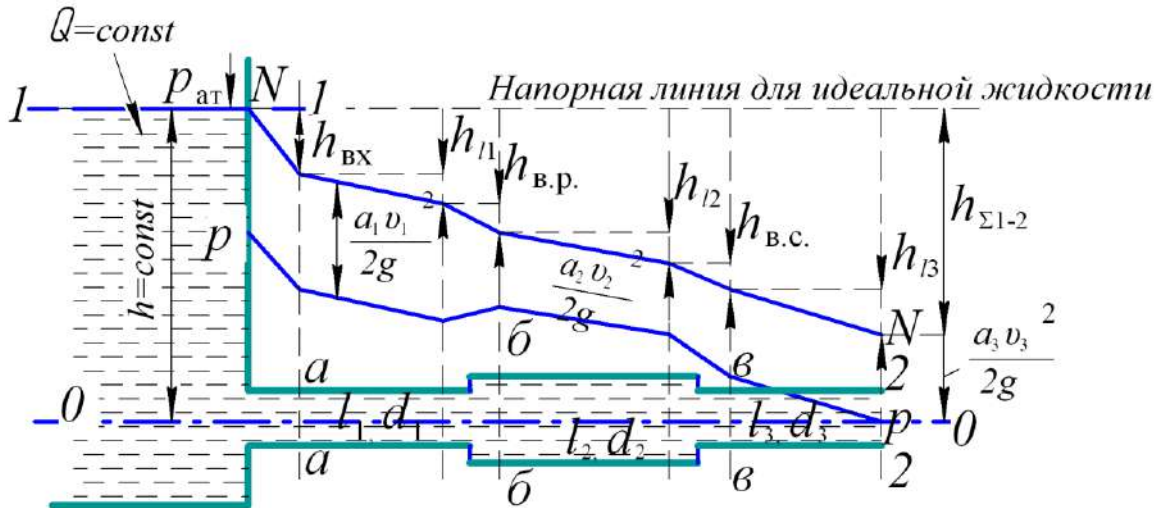
Рисунок 3.2 – Алгоритм определения гидравлического коэффициента трения

Графически уравнение Бернулли для потока реальной жидкости представляют в виде диаграммы (рис. 3.3). Судя по графику, уравнение Бернулли представляют тремя линиями:

- напорной линией для идеальной жидкости (теоретической напорной линией), параллельной оси  $OX$ ;

- действительной напорной линией  $N-N$ , имеющей падающий характер, ввиду учета всех видов потерь напора вдоль потока;
- пьезометрической линией ( $p - p$ ), которая в любом сечении ниже действительной напорной линии на величину скоростной высоты  $v_i^2/(2g)$ .

Таким образом, перед построением диаграммы производят вычисления всех слагаемых уравнения Бернулли и затем в масштабе делают ее построение.



1-1 и 2-2 – сечения потока, связанные уравнением Бернулли;

0-0 – плоскость сравнения;

$a - a$ ,  $б - б$ ,  $в - в$  – характерные сечения, обусловленные местными сопротивлениями, соответственно: вход в трубу, внезапное расширение и внезапное сужение потока;

$N-N$  – действительная напорная линия;  $p-p$  – пьезометрическая линия

Рисунок 3.3 – Диаграмма уравнения Бернулли для потока реальной жидкости

### Пример 10

По горизонтальной трубе постоянного сечения длиной 50 м и диаметром 100 мм из открытого резервуара вода вытекает в атмосферу при постоянном напоре  $H = 5$  м (рис. 3.4).

Определить скорость и расход вытекающей воды, если заданы коэффициенты местных сопротивлений: входа в трубу  $\zeta_{вх} = 0,5$  и крана  $\zeta_{кр} = 5$ , а также коэффициент гидравлического трения  $\lambda = 0,02$ .

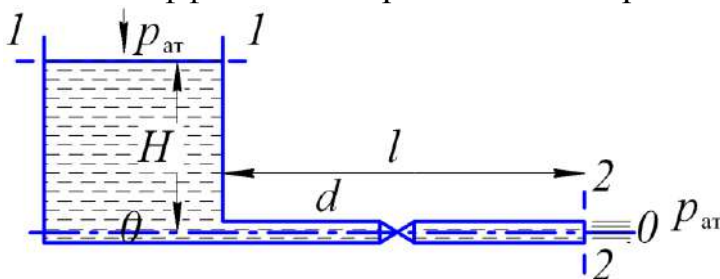


Рисунок 3.4 – Расчетная схема к примеру 10

Намечаем на расчетной схеме (рис. 3.4) сечения потока 1-1 и 2-2. Плоскость сравнения 0-0, совмещаем с осью симметрии потока.

Первое сечение совмещено со свободной поверхностью в напорном резервуаре, а второе – с истечением воды в атмосферу.

чением воды в атмосферу.

Записываем уравнение Бернулли для выбранных сечений потока жидкости:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\Sigma 1-2}$$

и устанавливаем значения слагаемых, входящих в его левую и правую часть:

$$z_1 = H; \quad \frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g}; \quad v_1 \simeq 0,$$

так как скорость на свободной поверхности резервуара при  $H = \text{const}$  очень мала;

$$z_2 = 0; \quad \frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g}; \quad \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - ? \quad h_{\Sigma 1-2} = h_l + h_{\text{вх}} + h_{\text{кр}}$$

Коэффициент Кориолиса при турбулентном течении маловязкой жидкости (воды) принимаем  $\alpha = 1,0$ .

Подставляем найденные выражения для отдельных слагаемых в уравнение Бернулли:

$$H + \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \zeta_{\text{вх}} \frac{v^2}{2g} + \zeta_{\text{кр}} \frac{v^2}{2g}.$$

После математических преобразований получили выражение следующего вида:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left( 1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{кр}} \right),$$

где неизвестным параметром является скорость истечения воды из трубы  $v$ .

Решаем полученное выражение относительно искомой величины:

$$v = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{кр}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 5}{1 + 0,02 \cdot \frac{50}{0,1} + 0,5 + 5,0}} = 2,44 \text{ м/с}$$

Определяем расход вытекающей из трубопровода воды  $Q$ :

$$Q = v \cdot S = 2,44 \cdot \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} = 0,019 \text{ м}^3/\text{с}.$$

### Пример 11

По данным примера 10 построить диаграмму уравнения Бернулли. Кран установлен посередине трубопровода (рис. 3.4).

Решение

Находим числовые значения слагаемых уравнения Бернулли с учетом исходных и расчетных данных примера 10:

$z_1 = H = 5 \text{ м}$  – геометрическая высота в сечении 1-1;

$p_{\text{изб.1}}/(\rho g) = 0$  – пьезометрическая высота в сечении 1-1, поскольку избыточное давление на свободной поверхности резервуара равно нулю;

$v_1^2/(2g) = 0$  – скоростная высота в первом сечении равна нулю, что обусловлено малой скоростью движения воды в пре-

делах свободной поверхности;

$z_2 = 0$  – геометрическая высота в сечении 2-2 равна нулю, так как совпали центр тяжести этого сечения с плоскостью сравнения 0-0;

$p_{изб.2}/(\rho g) = 0$  – пьезометрическая высота во втором сечении равна нулю, поскольку жидкость вытекает в атмосферу;

$v_2^2/(2g)$  – скоростная высота в сечении 2-2:

$$v_2^2/(2g) = 2,44^2/(2 \cdot 9,81) = 0,3 \text{ м};$$

$h_l$  – потери напора на трение по всей длине трубопровода. Согласно формулы Дарси-Вейсбаха (3.13) равны:

$$h_l = 0,02 \cdot 50/(0,1 \cdot 2,44^2)/(2 \cdot 9,81) = 3,03 \text{ м}.$$

Поскольку кран установлен посередине трубопровода, то потери напора на трение до него и после будут одинаковыми и составлять  $0,5 h_l$ , то есть 1,515 м;

$h_{вх}$  – потери напора на вход в трубу. Согласно формулы Вейсбаха (3.12) равны:

$$h_{вх} = \zeta_{вх} \cdot v^2/2g = 0,5 \cdot 2,44^2/2 \cdot 9,81 = 0,15 \text{ м};$$

$h_{кр}$  – потери напора на кран, определяемые также из формулы Вейсбаха:

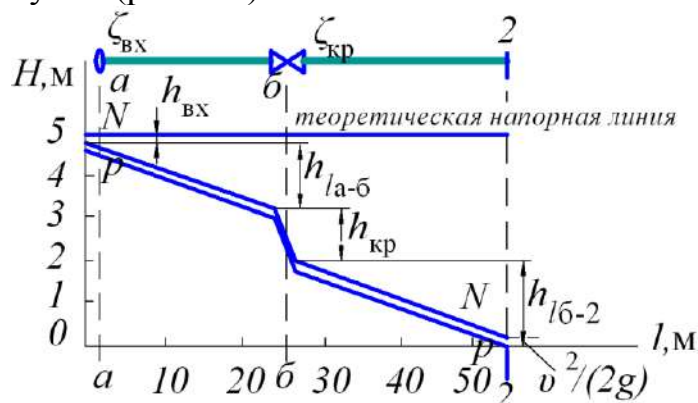
$$h_{кр} = \zeta_{кр} \cdot v^2/2g = 5,0 \cdot 2,44^2/2 \cdot 9,81 = 1,52 \text{ м}.$$

Сумма вычисленных потерь напора с учетом скоростной высоты во втором сечении составляет:

$$\frac{v_2^2}{2g} + h_{\Sigma 1-2} = 0,3 + 0,3 + 0,15 + 1,52 = 5,0 \text{ м},$$

то есть равна располагаемому напору  $H = 5,0$  м.

По данным выполненных расчетов строим диаграмму уравнения Бернулли (рис. 3.5).



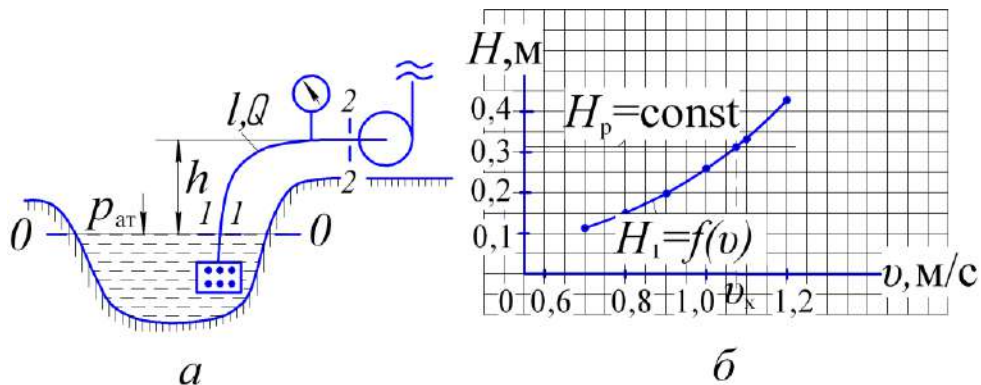
$N-N$  – действительная напорная линия;

$p-p$  – пьезометрическая линия  
 $a-a$ ,  $b-b$  – характерные сечения, в которых задействованы местные сопротивления

Рисунок 3.5 – Диаграмма уравнения Бернулли к примеру 11

### Пример 12

По чугунному трубопроводу длиной  $l = 20$  м и диаметром  $d$  на высоту  $h = 4,25$  м насосом подается вода при  $Q = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 3.6) и  $p_{\text{вак}} = 45 \text{ кПа}$ .



а – расчетная схема; б – графическое определение скорости  
во всасывающей трубе насосной установки

Рисунок 3.6 – К примеру 12

Определить диаметр всасывающей трубы с учетом допускаемой скорости движения воды  $v = 0,7 \dots 1,2$  м/с.

Потерями напора на местные сопротивления пренебречь.

Решение

Намечаем на расчетной схеме (рис. 3.6, а) сечения потока 1-1 и 2-2 с одновременным указанием плоскости сравнения 0-0. В данном случае она совмещена с сечением 1-1, то есть свободной поверхностью, где  $p = p_{\text{ат}}$ .

Записываем уравнение Бернулли для выбранных сечений потока:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{l1-2}$$

и устанавливаем значение слагаемых с учетом места положений сечений и плоскости сравнения.

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; \quad \frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g}; \quad \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \simeq 0, \quad \text{ввиду малого значения } v_1; \\ z_2 &= h; \quad \frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} - \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g}; \quad \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - ? \quad h_{l1-2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} - ? \end{aligned}$$

Здесь принимаем коэффициент Кориолиса  $\alpha_2 \simeq 1,0$ .

Подставляем полученные выражения слагаемых в уравнение Бернулли:

$$\frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} = h + \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} - \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \left( 1 + \lambda \frac{l}{d} \right).$$

Введем обозначения:

- вакуумметрический напор

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g},$$

где  $\rho$  – плотность воды при температуре  $10^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1005$  кг/м<sup>3</sup>;

- располагаемый напор

$$H_p = h_{\text{вак}} - h = \frac{45 \cdot 10^3}{1005 \cdot 9,81} - 4,25 = 0,31 \text{ м};$$

- расчетный напор

$$H_1 = \left(1 + \lambda \frac{l}{d}\right) \frac{v^2}{2g}.$$

Тогда с учетом введенных обозначений уравнение Бернулли принимает следующий вид:

$$H_p = H_1 = \left(1 + \lambda \frac{l}{d}\right) \frac{v^2}{2g},$$

то есть получено выражение, в котором неизвестны три параметра, в том числе:

- коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ ;
- диаметр всасывающей трубы  $d$ ;
- средняя скорость течения воды  $v$ .

Поэтому для решения задачи рекомендуется метод последовательного приближения, суть которого сводится к следующему:

- произвольно задаются рядом значений одного из вышеперечисленных неизвестных параметров. В данном случае, например скоростью  $v$  в диапазоне допустимых скоростей 0,7...1,2 м/с;
- затем с учетом принятых значений  $v$  вычисляют значения других неизвестных параметров, то есть диаметра всасывающей трубы  $d$  и коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ ;
- полученные расчетные данные позволяют определить ряд значений расчетного напора и построить график зависимости  $H_1 = f(v)$ , (см. рис. 3.6, б);
- на этот же график наносят значение располагаемого напора  $H_p = \text{const}$  в виде прямой линии, параллельной оси  $O_x$ ;
- значение скорости, соответствующее точке пересечения графиков  $H_p = \text{const}$  и  $H_1 = f(v)$ , является решением задачи.

Результаты вычислений сводят в таблицу.

| Расчетные параметры   | Результаты расчетов |        |        |        |        |        |
|---|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Задается $v$ , м/с  | 0,7                 | 0,8    | 0,9    | 1,0    | 1,1    | 1,2    |
| Диаметр $d = \sqrt{4Q/(\pi v)}$ , м   | 0,19                | 0,17   | 0,16   | 0,156  | 0,15   | 0,14   |
| Число Рейнольдса $Re = v \cdot d/\nu$   | 99654               | 106534 | 112996 | 119109 | 124922 | 130477 |
| Коэффициент гидравлического трения<br>$\lambda = 0,11(68/Re + \Delta/d)^{0,25}$ | 0,031               | 0,0311 | 0,0315 | 0,0318 | 0,032  | 0,0325 |
| Расчетный напор<br>$H_1 = (1 + \lambda l/d) v^2/2g$ , м                         | 0,11                | 0,15   | 0,2    | 0,26   | 0,325  | 0,415  |

В данном примере пересечение графиков имеет место при  $v = 1,08$  м/с. Полученное значение  $v$  дает возможность ответить на главный вопрос задачи, то есть найти значение внутреннего диаметра всасывающей трубы  $d$ :

$$d = \sqrt{4 \cdot 0,015 / (\pi \cdot 1,08)} = 0,151 \text{ м.}$$

В соответствии с ГОСТ 3262-75 (Приложение 8) принимаем стандартное значение диаметра трубы  $d = 150$  мм.

**Задача 51** (рис.3.7). Всасывающий трубопровод насоса имеет длину  $\ell$  и диаметр  $d$ . Высота всасывания насоса  $h$  при расходе  $Q$ . Определить абсолютное давление  $p$  перед входом в насос. Коэффициенты местных сопротивлений: приёмный клапан с сеткой  $\zeta_1$ , плавный поворот  $\zeta_2$  и вентиль  $\zeta_3$  см. в Приложении 6 – труба стальная бесшовная новая. Исходные данные к задаче приведены в табл. 51.

Таблица 51

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значение для вариантов |     |     |      |      |
|-----------------|--------------------|------------------------|-----|-----|------|------|
|                 |                    | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5    |
| $Q$             | л/мин              | 50                     | 80  | 120 | 180  | 200  |
| $\ell$          | м                  | 5                      | 6   | 10  | 8    | 9    |
| $d$             | мм                 | 32                     | 60  | 80  | 100  | 125  |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup>  | 890                    | 845 | 910 | 850  | 900  |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 0,1                    | 0,3 | 0,5 | 0,1  | 0,3  |
| $h$             | м                  | 0,8                    | 0,7 | 0,6 | 0,75 | 0,65 |

**Задача 52** (рис.3.7). По условиям предыдущей задачи определить предельную максимальную высоту установки насоса над водоисточником, если задан максимально допустимый вакуум перед входом в насос  $p_{\text{вак}}$ . Трубу считать гидравлически гладкой. Коэффициенты местных сопротивлений: приёмный клапан с сеткой  $\zeta_1$ , плавный поворот  $\zeta_2$  и вентиль  $\zeta_3$  см. в Приложении 6. Исходные данные к задаче приведены в табл. 52.

Таблица 52

| Исходные данные  | Единицы измерения  | Значение для вариантов |        |        |        |        |
|------------------|--------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                  |                    | 1                      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| $Q$              | л/с                | 8                      | 5      | 15     | 25     | 20     |
| $\ell$           | м                  | 9                      | 5      | 10     | 8      | 6      |
| $d$              | мм                 | 100                    | 80     | 125    | 200    | 150    |
| $\nu$            | см <sup>2</sup> /с | 0,01                   | 0,0083 | 0,0094 | 0,0086 | 0,0106 |
| $p_{\text{вак}}$ | кПа                | 60                     | 65     | 70     | 68     | 75     |

**Задача 53** (рис.3.7). Определить минимально возможный диаметр всасывающего трубопровода, если заданы: подача насоса  $Q$ ; высота над водоисточником  $h$ ; длина трубопровода  $\ell$ ; шероховатость трубы  $\Delta$  и максимально допустимый вакуум перед входом в насос  $p_{\text{вак}}$ . Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись скоростью потока  $\nu = 0,9 \dots 1,8$  м/с. Коэффициенты местных сопротивлений: приёмный клапан с сеткой  $\zeta_1$ , плавный поворот  $\zeta_2$  и вентиль  $\zeta_3$  см. в Приложении 6. Исходные данные к задаче приведены в табл. 53.

Таблица 53

| Исходные данные  | Единицы измерения  | Значение для вариантов |        |        |        |      |
|------------------|--------------------|------------------------|--------|--------|--------|------|
|                  |                    | 1                      | 2      | 3      | 4      | 5    |
| $Q \cdot 10^3$   | м <sup>3</sup> /с  | 3,5                    | 4,75   | 6,3    | 4,8    | 2,8  |
| $h$              | м                  | 3,2                    | 3,6    | 4,1    | 5,4    | 4,8  |
| $\ell$           | м                  | 5                      | 7,5    | 10     | 12,5   | 9    |
| $\Delta$         | мм                 | 0,015                  | 0,03   | 0,05   | 0,1    | 0,05 |
| $p_{\text{вак}}$ | кПа                | 40                     | 50     | 55     | 60     | 58   |
| $\nu$            | см <sup>2</sup> /с | 0,0131                 | 0,0124 | 0,0117 | 0,0112 | 0,01 |

**Задача 54** (рис.3.8). Вода из верхнего резервуара подается в нижний резервуар по стальному новому трубопроводу диаметром  $d$  и длиной  $\ell$ , имеющему два резких поворота на углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Разность уровней в резервуарах  $H$ , температура воды  $t$ . Определить расход воды в трубопроводе.

Задачу решить методом последовательного приближения, задаваясь скоростью жидкости  $2 \dots 4$  м/с.

Коэффициенты местных сопротивлений: приёмный клапан с сеткой  $\zeta_1$ , резкие повороты  $\zeta_2$  и  $\zeta_3$  см. в Приложении 6. Исходные данные к задаче приведены в табл. 54.



Таблица 54

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |     |     |    |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4  | 5   |
| $\ell$          | м                 | 30                     | 35  | 40  | 25 | 20  |
| $d$             | мм                | 80                     | 100 | 125 | 75 | 50  |
| $\beta_1$       | ...°              | 90                     | 120 | 120 | 90 | 90  |
| $\beta_2$       | ...°              | 45                     | 45  | 60  | 30 | 60  |
| $H$             | м                 | 2,5                    | 3   | 3,5 | 2  | 2,4 |
| $t$             | °C                | 20                     | 19  | 18  | 20 | 18  |

**Задача 55** (рис.3.8). Определить внутренний диаметр  $d$  сифона, предназначенного для переброски воды из верхнего резервуара в нижний при постоянной разности уровней  $H$  и расходе  $Q$ . Температура воды  $t$ . Значения коэффициентов местных сопротивлений: приёмный клапан с сеткой  $\zeta_1$ , резкие повороты  $\zeta_2$  и  $\zeta_3$  см. в Приложении 6.

Задачу решить методом последовательного приближения, задаваясь диаметром сифона  $d=50\dots60$  мм. Исходные данные к задаче приведены в табл. 55.

Таблица 55

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |      |     |      |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|-----|------|-----|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3   | 4    | 5   |
| $H$             | м                 | 2,5                    | 3    | 4,9 | 2    | 4   |
| $Q$             | л/с               | 5                      | 6    | 7   | 4    | 7   |
| $\ell$          | м                 | 25                     | 30   | 28  | 34   | 25  |
| $t$             | °C                | 25                     | 20   | 24  | 18   | 20  |
| $\beta_1$       | ...°              | 90                     | 90   | 120 | 120  | 90  |
| $\beta_2$       | ...°              | 45                     | 60   | 45  | 60   | 60  |
| $\Delta$        | мм                | 0,4                    | 0,05 | 0,2 | 0,05 | 0,1 |

**Задача 56** (рис.3.9). Насос подает воду на высоту  $h$  по трубопроводу диаметром  $d$  и длиной  $\ell$ , на котором имеются вентиль с прямым затвором, два резких поворота на углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  при расходе  $Q$ . Давление в конце трубопровода  $p_2$ , температура воды  $t$ . Определить давление  $p_1$  на выходе из насоса. Трубопровод считать гидравлически гладким. Коэффициенты местных сопротивлений: кран проходной  $\zeta_{кр}$ , и два поворота без скругления  $\zeta_{пов1}$ ,  $\zeta_{пов2}$  см. в Приложении 6. Исходные данные к задаче приведены в табл. 56.

Таблица 56

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $Q$             | л/с               | 2,5                    | 5,0 | 9,0 | 8,0 | 10  |
| $h$             | м                 | 8                      | 10  | 12  | 9   | 15  |
| $d$             | мм                | 50                     | 80  | 100 | 75  | 125 |
| $\ell$          | м                 | 20                     | 25  | 23  | 20  | 22  |
| $p_2$           | кПа               | 150                    | 200 | 200 | 150 | 100 |
| $t$             | °C                | 15                     | 18  | 20  | 16  | 18  |
| $\beta_1$       | ...°              | 60                     | 65  | 60  | 70  | 65  |
| $\beta_2$       | ...°              | 30                     | 40  | 40  | 45  | 35  |

**Задача 57** (рис.3.10). Из резервуара  $A$  жидкость выливается в резервуар  $B$  по трубе диаметром  $d$ , в конце которой имеется пробковый кран с сопротивлением  $\zeta_2 = 0,5$ . Определить, за какое время заполнится резервуар  $B$  объемом  $V$ .

Задачу решить методом последовательного приближения, задаваясь  $\lambda = 0,04\dots0,15$ . Коэффициент поворота без скругления  $\zeta_1$  принять равным 1,19. Исходные данные к задаче приведены в табл. 57.

Таблица 57

| Исходные данные   | Единицы измерения  | Значение для вариантов |      |      |      |      |
|-------------------|--------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                   |                    | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $\ell$            | м                  | 3,2                    | 4    | 5,5  | 4,6  | 5    |
| $d$               | мм                 | 20                     | 40   | 50   | 32   | 20   |
| $H$               | м                  | 1,5                    | 0,35 | 0,65 | 1,8  | 2    |
| $V$               | м <sup>3</sup>     | 10                     | 12   | 15   | 8    | 16   |
| $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м <sup>3</sup>  | 890                    | 884  | 808  | 745  | 820  |
| $\nu$             | см <sup>2</sup> /с | 0,5                    | 0,3  | 0,5  | 0,4  | 0,3  |
| $\Delta$          | мм                 | 0,1                    | 0,5  | 0,2  | 0,05 | 0,05 |

**Задача 58** (рис.3.11). Определить расход воды в трубопроводе постоянного сечения диаметром  $d$  и длиной  $\ell$ , если выходное отверстие трубопровода расположено ниже входного отверстия на величину  $Z$ . Напор над центром тяжести поддерживается постоянным и равным  $H$ . Коэффициенты местных сопротивлений и гидравлического трения приведены в табл. 58. Построить пьезометрическую и напорную линии.

Таблица 58

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значение для вариантов |     |      |      |     |      |
|---------------------|-------------------|------------------------|-----|------|------|-----|------|
|                     |                   | 1                      | 2   | 3    | 4    | 5   | 6    |
| $d$                 | мм                | 75                     | 100 | 125  | 75   | 100 | 120  |
| $\ell$              | м                 | 35                     | 40  | 45   | 50   | 55  | 60   |
| $z$                 | м                 | 3                      | 2,5 | 2    | 1,5  | 1,0 | 1,75 |
| $\zeta_{\text{вх}}$ |                   | 0,45                   | 0,4 | 0,55 | 0,48 | 0,5 | 0,6  |
| $\zeta_{\text{кр}}$ |                   | 5                      | 4   | 4,5  | 4    | 4,8 | 5    |
| $\lambda, 10^{-3}$  |                   | 19                     | 18  | 21   | 17   | 23  | 22   |
| $H$                 | м                 | 4                      | 3   | 5    | 3,5  | 4,5 | 5    |

**Задача 59** (рис.3.11). Определить постоянный напор  $H$  над центром тяжести трубопровода длиной  $\ell$  и диаметром  $d$ , присоединенного к открытому резервуару. Вода вытекает в атмосферу при расходе  $Q$ . Построить пьезометрическую и напорную линии. Исходные данные к задаче приведены в табл. 59.

Таблица 59

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значение для вариантов |     |     |      |      |     |
|---------------------|-------------------|------------------------|-----|-----|------|------|-----|
|                     |                   | 1                      | 2   | 3   | 4    | 5    | 6   |
| $\ell$              | м                 | 25                     | 40  | 15  | 20   | 25   | 35  |
| $d$                 | мм                | 50                     | 75  | 32  | 40   | 55   | 60  |
| $z$                 | м                 | 2                      | 1,5 | 3,0 | 3,5  | 4,0  | 4,5 |
| $\zeta_{\text{вх}}$ |                   | 0,6                    | 0,5 | 0,4 | 0,45 | 0,55 | 0,6 |
| $\zeta_{\text{кр}}$ |                   | 4                      | 5   | 5   | 4    | 4,5  | 5,5 |
| $\lambda, 10^{-3}$  |                   | 43                     | 46  | 49  | 45   | 42   | 44  |
| $Q$                 | л/с               | 5                      | 12  | 3   | 4    | 6    | 8   |

**Задача 60** (рис.3.11). Определить диаметр гидравлически короткого трубопровода, по которому вода вытекает из открытого напорного резервуара в атмосферу. Напор над центром тяжести трубопровода поддерживается постоянным. Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись диаметром трубы 50...75 мм. Построить пьезометрическую и напорную линии. Исходные данные к задаче приведены в табл. 60.

Таблица 60

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значение для вариантов |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $Q$                 | л/с               | 5                      | 6     | 5,5   | 6,5   | 7     | 8     |
| $\ell$              | м                 | 40                     | 50    | 60    | 55    | 45    | 35    |
| $z$                 | м                 | 1                      | 1,5   | 2     | 2,5   | 3     | 3,5   |
| $\lambda$           |                   | 0,025                  | 0,027 | 0,029 | 0,031 | 0,033 | 0,035 |
| $\zeta_{\text{кр}}$ |                   | 0,4                    | 0,5   | 0,4   | 0,5   | 0,4   | 0,5   |
| $\zeta_{\text{вх}}$ |                   | 5                      | 4     | 4     | 5     | 5     | 4     |
| $H$                 | м                 | 7                      | 0,7   | 2,35  | 3,5   | 7,0   | 6,9   |

**Задача 61** (рис.3.12). Из закрытого резервуара  $A$ , на свободной поверхности которого действует избыточное давление  $p_m$ , вода нагнетается по вертикальному трубопроводу постоянного сечения диаметром  $d$  и длиной  $\ell$  в резервуар  $B$ .

Определить:

1. Скорость, с которой вода движется по нагнетательному трубопроводу, если заданы коэффициенты местных сопротивлений: входа в трубу  $\zeta_{вх}$ , вентиля  $\zeta_{вент}$  и колена с закруглением  $\zeta_{кол}$ .
2. Расход воды в трубопроводе  $Q$ .

Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно значением скорости движения  $v = 5 \dots 8$  м/с. Абсолютную шероховатость стенок трубопровода принять равной  $\Delta = 0,6$  мм. Исходные данные к задаче приведены в табл. 61.

Таблица 61

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |      |       |      |       |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|-------|------|-------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3     | 4    | 5     | 6    |
| $H$             | м                 | 4,2                    | 3,5  | 1,75  | 2,5  | 4     | 3,75 |
| $p_m$           | кПа               | 250                    | 200  | 180   | 190  | 150   | 220  |
| $\ell$          | м                 | 6                      | 8    | 10    | 8    | 7     | 12   |
| $d$             | мм                | 80                     | 90   | 50    | 75   | 100   | 60   |
| $t$             | °C                | 10                     | 14   | 19    | 20   | 25    | 5    |
| $\zeta_{вх}$    |                   | 0,4                    | 0,5  | 0,525 | 0,55 | 0,475 | 0,46 |
| $\zeta_{кол}$   |                   | 0,14                   | 0,12 | 0,1   | 0,13 | 0,15  | 0,12 |
| $\zeta_{вент}$  |                   | 3,5                    | 4    | 3,8   | 3,75 | 3,25  | 4    |

**Задача 62** (рис.3.13). Для автоматической перекачки воды из верхнего водоема в нижний установлена сифонная труба длиной  $\ell$  и диаметром  $d$ . Определить расход и вакуум в сечении  $a-a$ , если разность уровней верхнего и нижнего водоема  $H$ . Длина сифона до сечения  $a-a$  равна  $\ell_1$ . Горизонтальный участок сифона расположен над уровнем воды верхнего водоема на высоте  $h$ . Коэффициент трения определить по зависимости квадратичной области турбулентного режима, приняв абсолютную шероховатость стенок  $\Delta$ . Коэффициенты местных сопротивлений и исходные данные к задаче приведены в табл. 62.

Таблица 62

| Исходные данные | Единицы и измерения | Значение для вариантов |       |      |      |      |      |
|-----------------|---------------------|------------------------|-------|------|------|------|------|
|                 |                     | 1                      | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $H$             | м                   | 2,0                    | 2,5   | 1,8  | 1,9  | 1,5  | 2,2  |
| $\ell$          | м                   | 30                     | 40    | 50   | 45   | 35   | 55   |
| $d$             | мм                  | 200                    | 150   | 75   | 100  | 50   | 125  |
| $\ell_1$        | м                   | 20                     | 20    | 25   | 23   | 18   | 28   |
| $h$             | м                   | 1,0                    | 1,3   | 1,0  | 1,1  | 0,8  | 1,1  |
| $\Delta$        | мм                  | 0,2                    | 0,075 | 0,1  | 0,16 | 0,2  | 0,45 |
| $\zeta_{сетка}$ |                     | 5                      | 7     | 9,7  | 9,5  | 10   | 8,5  |
| $\zeta_{пов}$   |                     | 0,37                   | 0,37  | 0,58 | 0,39 | 0,76 | 0,38 |

**Задача 63** (рис.3.14). Вода из резервуара по короткому трубопроводу вытекает в атмосферу через сопло. Диаметр сопла  $d_c = 0,5d$ . Температура воды  $t$  °C. Истечение происходит при постоянном напоре над центром тяжести потока  $H$ .

Определить:

1. Скорость истечения из сопла  $v$ , если заданы коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta_{вх}$  и  $\zeta_{кр}$ ;
2. Расход в трубопроводе  $Q$ .

Задачу решить методом последовательного приближения, для чего следует задаться ориентировочным значением скорости в трубопроводе  $v = 1 \dots 2$  м/с. Коэффициент сопротивления сопла принять соизмеримым с коэффициентом внезапного сужения потока.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 63.

Таблица 63

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значение для вариантов |      |      |      |       |      |
|---------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|-------|------|
|                     |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5     | 6    |
| $H$                 | м                 | 4                      | 2,5  | 1,4  | 1,5  | 2,5   | 2,75 |
| $\ell$              | м                 | 10                     | 5    | 7,5  | 9    | 11    | 12   |
| $d$                 | мм                | 100                    | 150  | 125  | 110  | 80    | 75   |
| $\Delta$            | мм                | 0,1                    | 0,15 | 0,12 | 0,14 | 0,12  | 0,1  |
| $t$                 | °C                | 18                     | 20   | 25   | 15   | 10    | 7    |
| $\zeta_{\text{вх}}$ |                   | 0,42                   | 0,4  | 0,5  | 0,45 | 0,475 | 0,5  |
| $\zeta_{\text{кр}}$ |                   | 2,5                    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5     | 2,5  |

**Задача 64** (рис.3.12). Из резервуара  $A$ , на свободной поверхности которого избыточное давление  $p_m$ , вытекает вода по короткому трубопроводу и заполняет резервуар  $B$  водой. Определить время заполнения водой резервуара  $B$  объемом  $V$  и расход  $Q$ , если заданы размеры трубопровода  $\ell$  и  $d$ , а также коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta_{\text{вх}}$  и  $\zeta_{\text{кол}}$ . Температура воды  $t$ °C. Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно значением скорости движения воды в трубопроводе  $v = 5 \dots 8$  м/с при эквивалентной шероховатости его стенок  $\Delta = 0,1$  мм. Исходные данные к задаче приведены в табл. 64.

Таблица 64

| Исходные данные      | Единицы измерения | Значение для вариантов |      |      |      |      |      |
|----------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                      |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $p_m$                | кПа               | 100                    | 90   | 120  | 100  | 75   | 130  |
| $H$                  | м                 | 4                      | 2,5  | 4,5  | 3    | 2    | 3,5  |
| $\ell$               | м                 | 10                     | 8    | 9    | 6    | 5    | 7    |
| $d$                  | мм                | 125                    | 80   | 70   | 90   | 100  | 110  |
| $V$                  | м³                | 3                      | 2,5  | 2    | 5    | 7,5  | 10   |
| $t$                  | °C                | 7                      | 15   | 20   | 25   | 10   | 5    |
| $\zeta_{\text{вх}}$  |                   | 0,6                    | 0,52 | 0,55 | 0,5  | 0,45 | 0,4  |
| $\zeta_{\text{кол}}$ |                   | 0,2                    | 0,1  | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 0,15 |

**Задача 65** (рис.3.15). Насос нагнетает воду с расходом  $Q$ . Длина всасывающей трубы  $\ell$ , диаметр трубы  $d$ . Определить предельную высоту всасывания  $h$ , если известны допустимая вакуумметрическая высота, а также коэффициенты местных сопротивлений (клапан с сеткой и плавный поворот). Труба стальная бесшовная после нескольких лет эксплуатации. Исходные данные к задаче приведены в табл. 65.

Таблица 65

| Исходные данные        | Единицы измерения | Значение для вариантов |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                        |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $Q$                    | л/с               | 1,5                    | 10   | 7    | 4,2  | 19,4 | 30   |
| $\ell$                 | м                 | 12                     | 9    | 10   | 9,5  | 15   | 10   |
| $d$                    | мм                | 50                     | 125  | 100  | 75   | 150  | 200  |
| $\zeta_{\text{сетка}}$ |                   | 6                      | 10   | 6    | 10   | 6    | 10   |
| $\zeta_{\text{пов}}$   |                   | 0,76                   | 0,38 | 0,39 | 0,58 | 0,37 | 0,37 |
| $h_{\text{доп. вак}}$  | м                 | 4,5                    | 5,0  | 6,5  | 6,0  | 6,5  | 6,0  |
| $t$                    | °C                | 8                      | 10   | 7    | 15   | 20   | 10   |

**Задача 66** (рис.3.16). Определить диаметр трубопровода, присоединенного к напорному резервуару. По трубе вода вытекает в атмосферу. Напор над центром тяжести потока поддерживается постоянным и равным  $H$ . На трубопроводе имеются местные сопротивления  $\zeta_{\text{вх}}$  и  $\zeta_{\text{зав.}}$ . Построить пьезометрическую и напорную линии. Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно значением диаметра трубопровода в диапазоне 40...55 мм. Исходные данные к задаче приведены в табл. 66.

Таблица 66

| Исходные данные      | Единицы измерения | Значение для вариантов |       |       |       |      |       |
|----------------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
|                      |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5    | 6     |
| $H$                  | м                 | 3                      | 5     | 3     | 2     | 3,5  | 4     |
| $\ell$               | м                 | 15                     | 20    | 18    | 25    | 24   | 22    |
| $Q$                  | л/с               | 2,5                    | 3     | 3,5   | 4     | 4,5  | 5     |
| $\zeta_{\text{вх}}$  |                   | 0,55                   | 0,5   | 0,4   | 0,35  | 0,55 | 0,5   |
| $\zeta_{\text{зав}}$ |                   | 6                      | 5     | 4     | 3     | 2    | 2,5   |
| $\lambda$            |                   | 0,017                  | 0,021 | 0,019 | 0,023 | 0,02 | 0,018 |

**Задача 67** (рис.3.17). В баке  $A$  жидкость подогревается до определенной температуры  $t^\circ\text{C}$  и самотеком по трубопроводу длиной  $\ell$  попадает в кормоцех. Напор в баке равен  $H$ . Каким должен быть диаметр трубопровода, чтобы обеспечивать расход  $Q$  при манометрическом давлении в конце трубопровода не ниже  $p_m$ ? Построить пьезометрическую и напорную линии. Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно значением диаметра трубопровода в диапазоне 35...55 мм. Коэффициент  $\lambda$  находить из формулы Пуазейля при  $Re < 2300$  и формулы Блазиуса при  $Re > 2300$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 67.

Таблица 67

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значение для вариантов |        |      |       |        |      |
|-----------------|--------------------|------------------------|--------|------|-------|--------|------|
|                 |                    | 1                      | 2      | 3    | 4     | 5      | 6    |
| $H$             | м                  | 6,2                    | 7      | 5,8  | 6,4   | 6,7    | 6    |
| $\ell$          | м                  | 34                     | 65     | 40   | 38    | 24     | 42   |
| $p_m$           | кПа                | 23                     | 18     | 15   | 20    | 22     | 23   |
| $Q$             | л/с                | 2,1                    | 3,2    | 1,4  | 1,7   | 2      | 3,5  |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup>  | 885                    | 1000   | 960  | 890   | 745    | 820  |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 0,048                  | 0,0047 | 0,25 | 0,098 | 0,0049 | 0,01 |

**Задача 68** (рис.3.18). Какое давление  $p_1$  должен развивать бензонасос, подающий бензин в поплавковую камеру, вход в которую перекрыт иглой, открывающейся при заданном избыточном давлении под иглой  $p_m$ . Высота дна камеры над осью насоса  $Z$ . Значение длины  $\ell$  и диаметра нагнетательной линии  $d$ , расход бензина  $Q$  и давление  $p_m$  принять по данным, приведенным в табл. 68. Абсолютная шероховатость стенок нагнетательной трубы  $\Delta = 0,015$  мм.

Таблица 68

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значение для вариантов |       |        |       |        |       |
|-----------------|--------------------|------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                 |                    | 1                      | 2     | 3      | 4     | 5      | 6     |
| $\ell$          | м                  | 4                      | 3     | 8      | 6     | 7      | 8     |
| $d$             | мм                 | 3                      | 3     | 4,5    | 4,5   | 6      | 6     |
| $Q$             | л/с                | 8                      | 8,5   | 9      | 10    | 12     | 14    |
| $p_m$           | кПа                | 49,1                   | 54,0  | 58,9   | 63,8  | 68,7   | 73,6  |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup>  | 710                    | 710   | 720    | 720   | 740    | 740   |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 0,0055                 | 0,006 | 0,0055 | 0,006 | 0,0065 | 0,007 |
| $z$             | м                  | 0,5                    | 0,35  | 0,45   | 0,4   | 0,47   | 0,33  |

Рисунки 3.7...3.18 к задачам темы 3

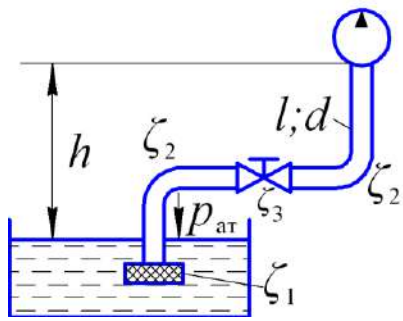


Рисунок 3.7

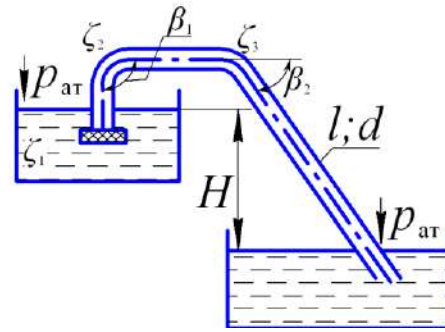


Рисунок 3.8

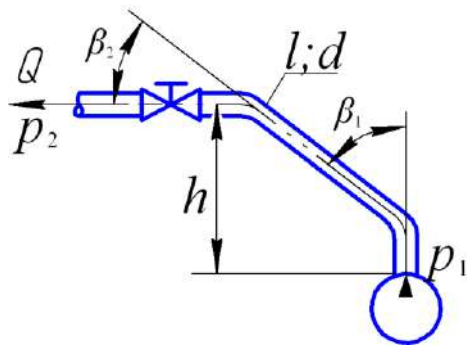


Рисунок 3.9

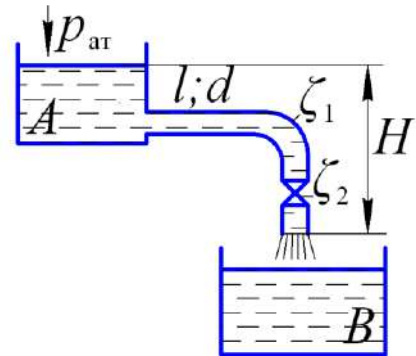


Рисунок 3.10

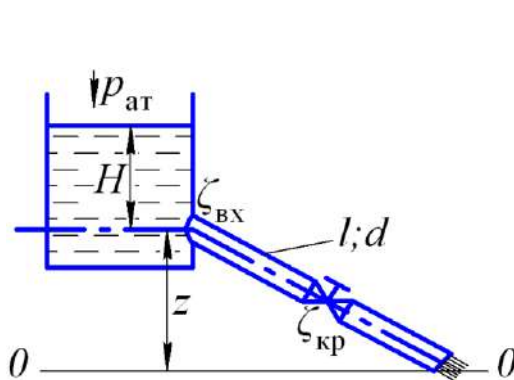


Рисунок 3.11

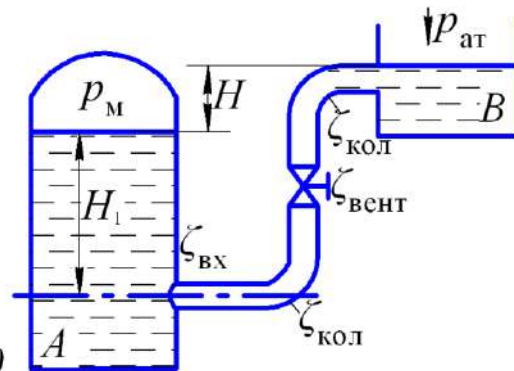


Рисунок 3.12

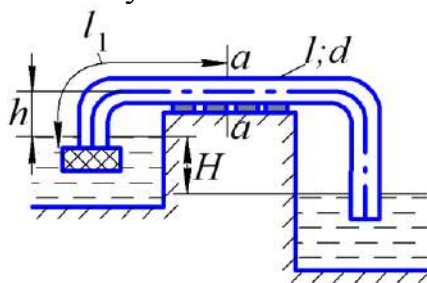


Рисунок 3.13

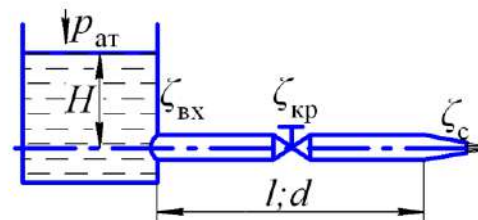


Рисунок 3.14

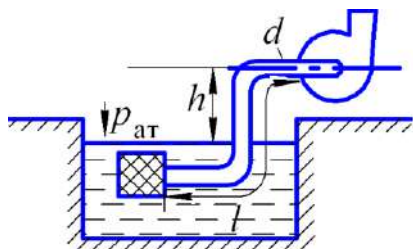


Рисунок 3.15

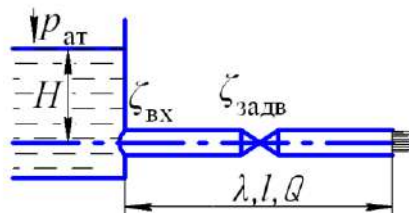


Рисунок 3.16

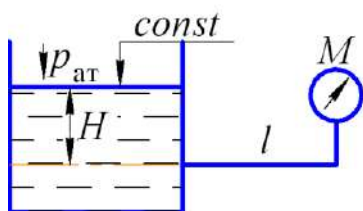
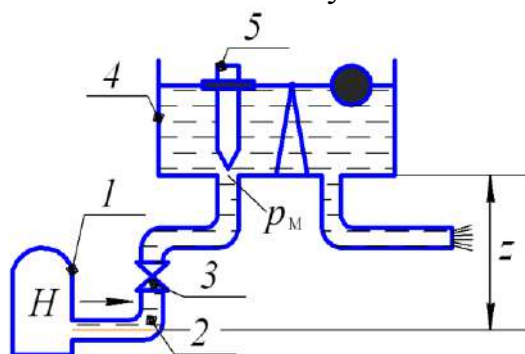


Рисунок 3.17



1 – насос; 2 – нагнетательная линия;  
3 – кран; 4 – поплавковая камера; 5 – игла

Рисунок 3.18

## ТЕМА 4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводом называют конструктивную единицу, предназначенную для транспортирования капельных или газообразных жидкостей.

Все многообразие трубопроводов, используемых в современной технике и инженерных коммуникациях, классифицируют по следующим признакам:

- в зависимости от отсутствия и наличия свободной поверхности: *напорные* и *безнапорные*. В напорных трубопроводах свободная поверхность отсутствует и трубопроводы работают полными сечениями;
- в общем случае: *простые* и *сложные*. Простой трубопровод – это напорный трубопровод постоянного внутреннего диаметра, выполненный из одного и того же материала без ответвлений.

Все остальные трубопроводы являются сложными.

- в зависимости от соотношения потерь напора

$$h_l \leq h_m \quad (4.1)$$

различают *гидравлически длинные* и *гидравлически короткие*:

- гидравлически длинными считают трубопроводы, в которых влияние местных потерь напора невелико и ими можно пренебречь или принять приближенно

$$h_m = (0,05 \dots 0,07)h_l, \quad (4.2)$$

тогда  $\Sigma h = (1,05 \dots 1,1)h_l. \quad (4.3)$

- гидравлически короткими считают трубопроводы, в которых местные потери напора соизмеримы или превышают потери напора на трение:

$$h_m \geq h_l. \quad (4.4)$$

В формулах (4.3) и (4.4) потери напора на трение  $h_l$  определяют по формуле Дарси-Вейсбаха, а местные  $h_m$ , пользуясь формулой Вейсбаха.

- вида материала стенок трубопровода:
  - металлические (стальные, чугунные, из алюминиевых сплавов и т.д.);
  - неметаллические (асбестоцементные, полипропиленовые, стеклянные и т.д.);
- вида транспортируемой жидкости: бензопроводы, топливопроводы, водопроводы, молокопроводы и т.д.

#### 4.1. Расчет простого трубопровода

Уравнения, которыми пользуются при его расчете, следующие:

- уравнение Бернулли, являющегося уравнением баланса удельных энергий (м):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Sigma h, \quad (4.5)$$

где  $\Sigma h = h_l$ , поскольку местные потери напора малы  $h_m = 0$ ;

- уравнение неразрывности, являющегося балансом расхода ( $\text{м}^3/\text{с}$ ):

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \dots v_n \cdot S_n = Q = \text{const} \quad (4.6)$$

- уравнение Дарси-Вейсбаха для определения потерь напора на трения (м):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (4.7)$$

После введения следующих обозначений в уравнение Бернулли :

$$\text{- потребный напор} \quad H_{\text{потр}} = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}, \text{ м}; \quad (4.8)$$

$$\text{- статический напор} \quad H_{\text{ст}} = z_1 - z_2, \text{ м}, \quad (4.9)$$

а также выразив скоростную высоту в уравнении Дарси-Вейсбаха через расход  $Q$  с последующей подстановкой в уравнение (4.6) получим окончательное решение уравнения Бернулли:

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + AlQ^m, \quad (4.10)$$

$$\text{где} \quad A = \frac{8\lambda}{\pi^2 d^4 g} \quad \text{— удельное сопротивление трубопровода (с}^2/\text{м}^6\text{)}, \quad (4.11)$$

$l$  — длина трубопровода, м;

$Q$  — расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$m$  — показатель степени, зависящий от режима течения жидкости:

- при ламинарном  $m = 1$ ,
- при турбулентном в области квадратичного сопротивления, т.е. при  $Re \rightarrow \infty$ ,  $m = 2$ .



Формула (4.11), как и значение  $A$  в ней справедливы для турбулентного режима в области квадратичного сопротивления, то есть при условии выполнения неравенства:

$$v \geq v_{\text{кв}}. \quad (4.12)$$

Значения предельных скоростей  $v_{\text{кв}}$  в зависимости от величины расхода и материала труб приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

Значения предельных скоростей в зависимости от материала труб

| Трубы            | Предельные скорости<br>$v_{\text{кв}}$ , м/с при $Q = 2 \dots 100 \text{ дм}^3/\text{с}$ |
|------------------|--|
| Стальные         | 1...1,3  |
| Чугунные         | 1,1...1,5  |
| Асбестоцементные | 1,1...1,7  |
| Полиэтиленовые   | 1...2  |

При условии невыполнения неравенства (4.12) в формулу (4.10) при турбулентном режиме вводят поправку:

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + AKlQ^2, \quad (4.13)$$

где  $K$  – поправочный коэффициент на неквадратичность сопротивления, равный:

$$K = \left(1 + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}. \quad (4.14)$$

При расчете простых трубопроводов в области квадратичного сопротивления и  $h_{\text{м}}=0$  возможны три основные задачи:

**Задача 1.** Исходные данные: расход  $Q$ , длина  $l$  и диаметр трубы  $d$ , а также материал трубы. Найти потребный напор  $H_{\text{потр}}$ .

*Решение.* По заданному  $d$  и материалу трубы по таблицам Приложений 8, 9, 10 определяют величину удельного сопротивления  $A$ ,  $\text{с}^2/\text{м}^6$ .

Для горизонтального трубопровода  $H_{\text{ст}}=0$ , значит

$$H_{\text{потр}} = AlQ^2, \text{ м} \quad (4.15)$$

Для негоризонтальных трубопроводов, то есть  $H_{\text{ст}} \neq 0$

$$H_{\text{потр}} = AlQ^2 \pm H_{\text{ст}}, \text{ м} \quad (4.16)$$

**Задача 2.** Исходные данные: располагаемый напор  $H_{\text{р}}$ , длина  $l$ , диаметр трубы  $d$  и материал трубы. Найти расход  $Q$ .

*Решение.* По заданному  $d$  и материалу трубы по таблицам Приложений 8, 9, 10 определяют величину удельного сопротивления  $A$ ,  $\text{с}^2/\text{м}^6$ .

Тогда при квадратичном режиме сопротивления:

$$Q = \sqrt{\frac{H_{\text{р}}}{Al}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.17)$$

**Задача 3.** Исходные данные: расход  $Q$ , располагаемый напор  $H_{\text{р}}$ , длина  $l$  и материал трубы;  $H_{\text{ст}}=0$ . Найти диаметр трубы  $d$ .

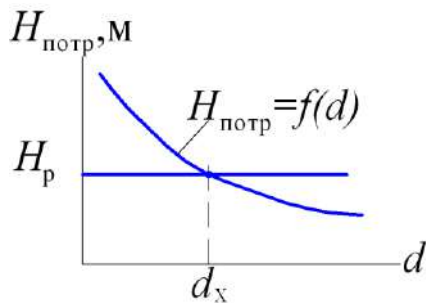


Рисунок 4.1 – Графическое определение диаметра трубы

### Решение

Задают произвольно несколько (3...5) значений  $d$ , для которых по таблицам Приложений 8, 9, 10 определяют величины соответствующих значений  $A$ . Затем вычисляют ряд значений потребного напора и строят график зависимости  $H_{\text{потр}} = f(d)$ . Графически при заданном значении располагаемого напора  $H_p$  по кривой определяют  $d_x$  (рис. 4.1). В соответствии с ГОСТ выбирают ближайший стандартный диаметр  $d$  большего расчетного значения и уточняют  $H_{\text{потр}}$  на выполнение неравенства:

$$H_{\text{потр}} \leq H_p.$$

При расчете простого гидравлически короткого трубопровода суммарные потери напора складываются из потерь напора на трение по длине и местных потерь:

$$\Sigma h = h_l + h_m. \quad (4.18)$$

Для принятых ранее обозначений (4.9) и (4.10) уравнение Бернулли в общем случае примет вид:

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + kQ^m, \quad (4.19)$$

где для турбулентного течения:

$$k = \left( \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \zeta \right) \frac{8}{g\pi^2 d^5}, \quad m = 2, \quad (4.20)$$

для ламинарного течения:

$$k = \frac{128\nu l}{\pi g d^4}, \quad m = 1, \quad (4.21)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости транспортируемой жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$l$  – длина трубопровода, м;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

В принятой практике расчета гидравлически коротких трубопроводов местные потери принято заменять эквивалентной длиной  $l_э$ , равной:

$$l_э = 0,082 \frac{\Sigma \zeta}{A d^4}, \quad (4.22)$$

где  $\Sigma \zeta$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений, значения которых определяют по данным Приложения 6;

$A$  – удельное сопротивление трубы, которое при квадратичном законе сопротивления

$$A = A_{\text{кв.}}. \quad (4.23)$$

При неквадратичном законе сопротивления:

$$A = K \cdot A_{\text{кв.}}, \quad (4.23)$$

где  $K$  определяют по формуле (4.14).

С учетом эквивалентной длины потребный напор в неквадратичной области сопротивления для *гидравлически коротких* трубопроводов равен:

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + AK(l+l_3)Q^2. \quad (4.25)$$

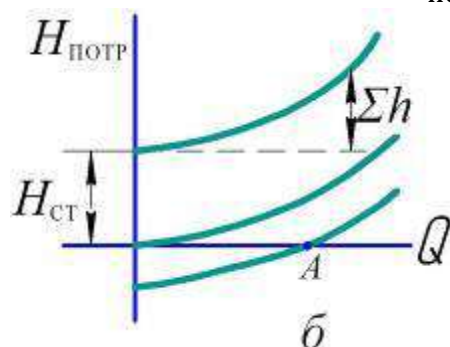


Рисунок 4.2 – Кривые потребного напора

Расчет простых гидравлически коротких трубопроводов аналогичен расчету гидравлически длинных трубопроводов и в основном сводится к решению тех же трех задач. Согласно формул (4.17)...(4.19) зависимость  $H_{\text{потр}} = f(Q)$ , называемая *кривой потребного напора*, приведена на рисунке 4.2.

## 4.2. Расчет сложных трубопроводов

Расчет сложных трубопроводов рассматривают обычно в специальных курсах. Здесь представлены только простейшие примеры и приведены основы их гидравлического расчета. Все решения даны применительно к квадратичному закону сопротивления. Местные потери напора не учитываются.

При *последовательном соединении* ряда отдельных участков (рис. 4.3, а) различной длины и различных диаметров потери напора на трение на всем протяжении, от начальной точки *A* до конечной точки *B*, представляют собой сумму потерь напора по длине на отдельных участках.

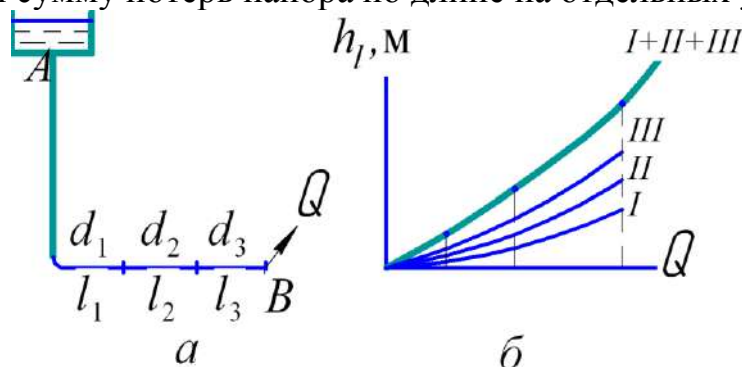


Рисунок 4.3 – К расчету трубопровода с последовательным соединением участков

$$\Sigma h_l = h_{l1} + h_{l2} + h_{l3} \quad (4.26)$$

или 
$$\Sigma h_l = (A_1 l_1 + A_2 l_2 + A_3 l_3) Q^2, \text{ м} \quad (4.27)$$

Здесь  $l_1, l_2, l_3$  – длины соответственно первого, второго и третьего участков трубопровода, м;

$A_1, A_2, A_3$  – удельное сопротивление труб соответствующих участков,  $\text{с}^2/\text{м}^6$ ;

$Q$  – постоянный по потоку расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (4.28)$$

Для построения характеристики всего последовательного соединения *A-B*, следует в соответствии с выражением (4.27) сложить потери напора при

одинаковых расходах, то есть сложить ординаты всех трех кривых при равных абсциссах.

При *параллельном соединении* нескольких простых трубопроводов (например 1, 2, 3) между точками *a* и *б* (рис. 4.4, а) при условии, что все они расположены в горизонтальной плоскости, очевидным является тот факт, что потери напора на участках будут одинаковыми, то есть

$$h_{l1} = h_{l2} = h_{l3} \quad (4.29)$$

$$\text{или} \quad A_1 l_1 Q_1^2 = A_2 l_2 Q_2^2 = A_3 l_3 Q_3^2, \quad (4.30)$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3$  – расходы на соответствующих участках, м<sup>3</sup>/с, равные

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q \quad (4.31)$$

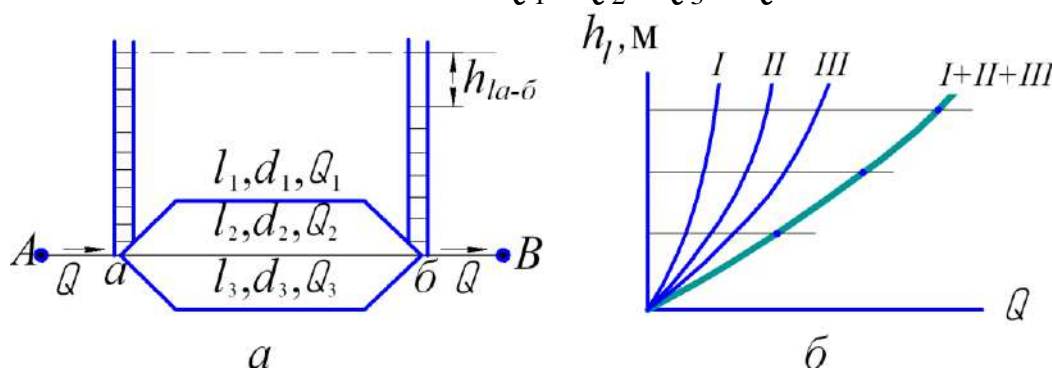


Рисунок 4.4 – К расчету трубопровода с параллельным соединением

Из совместного решения выражений (4.30) и (4.31) расходы в отдельных ветвях равны:

$$Q_1 = \frac{Q}{1 + \sqrt{A_1 l_1 / (A_2 l_2)} + \sqrt{A_1 l_1 / (A_3 l_3)}}, \quad (4.32)$$

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{A_1 l_1 / (A_2 l_2)}, \quad (4.33)$$

$$Q_3 = Q_1 \sqrt{A_1 l_1 / (A_3 l_3)}. \quad (4.34)$$

Для графического построения суммарной характеристики трубопровода с параллельным соединением участков сети *a-б*, необходимо в соответствии с выражением (4.31) сложить расходы при одинаковых потерях напора, то есть сложить абсциссы всех трех кривых при равных ординатах (рис. 4.4, б).

### 4.3. Трубопровод с непрерывной раздачей жидкости по пути

В вышерассмотренных случаях объемный расход  $Q$  подавался сосредоточенно в начале трубопровода и проходил без изменения до конца трубопровода, то есть расход проходил по трубопроводу транзитом.

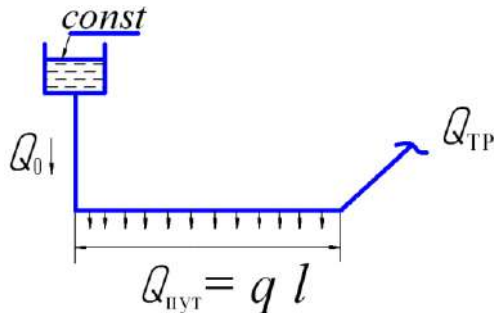
Однако на практике отбор воды может производиться и по длине  $l$  трубопровода (рис. 4.5). В простейшем случае может оказаться, что на каждой единице длины трубопровода расход постепенно уменьшается в среднем на величину:

$$q = \frac{Q_{\text{пут}}}{l}, \quad (4.35)$$

где  $Q_{\text{пут}}$  – путевой расход, м<sup>3</sup>/с;

$l$  – длина трубопровода, м;

$q$  – удельный путевой расход, м<sup>3</sup>/(с · м).



$Q_p$  – расчетный расход;  $Q_{\text{тр}}$  – транзитный расход;  $Q_{\text{пут}}$  – путевой расход

Рисунок 4.5 – Расчетная схема

В рассматриваемом случае начальный расход  $Q_0$  равен сумме путевого расхода  $Q_{\text{пут}}$  и транзитного расхода  $Q_{\text{тр}}$ .

$$Q_0 = Q_{\text{пут}} + Q_{\text{тр}}, \quad (4.36)$$

что необходимо учитывать при выполнении расчетов.

В области квадратичного сопротивления потери напора на трение  $h_{\text{тр}}$  для гидравлически длинного трубопровода определяют по формуле:

$$h_{\text{тр}} = A_{\text{кв}} \cdot l \cdot Q_p^2, \text{ м} \quad (4.37)$$

где  $A_{\text{кв}}$  – удельное сопротивление трубопровода в области квадратичного сопротивления, с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;

$l$  – длина трубопровода с непрерывным расходом по пути, м.

$Q_p$  – расчетный объемный расход, м<sup>3</sup>/с.

Здесь расчетный объемный расход  $Q_p$  определяют по формуле:

$$Q_p = \sqrt{Q_{\text{тр}}^2 + Q_{\text{тр}} \cdot Q_{\text{пут}} + \frac{1}{3} Q_{\text{пут}}^2}, \quad (4.38)$$

или приближенно как

$$Q_p \approx Q_{\text{тр}} + 0,55 Q_{\text{пут}}. \quad (4.39)$$

Как видно из формул (4.36), (4.38) и (4.39), расчетный расход  $Q_p$  меньше начального расхода  $Q_0$ , но больше транзитного расхода  $Q_{\text{тр}}$ .

При отсутствии транзитного расхода (при  $Q_{\text{тр}} = 0$ ) расчетный объемный расход  $Q_p$  определяют по формулам:

$$Q_p = \sqrt{\frac{Q_{\text{пут}}^2}{3}}; \quad (4.40)$$

$$Q_p \approx 0,55 \cdot Q_{\text{пут}}. \quad (4.41)$$

#### Указания к решению задач

По возможности упрощать расчетную схему. Например, тупиковый трубопровод с двумя боковыми отводами и имеющими одинаковое давление в точках отбора жидкости, легко обратить в трубопровод с параллельным со-

единением участков (см. пример № 13). При расчете трубопровода с последовательным соединением участков каждый из участков рассчитывать, как простой, гидравлически длинный или гидравлически короткий с учетом исходных данных.

Определять величину расчетного расхода в трубопроводе с непрерывной раздачей жидкости по пути следует, начиная с конца в направлении к началу, принимая во внимание транзитные расходы и путевые.

При решении задач, связанных с определением диаметра трубопровода, следует руководствоваться методикой, изложенной в решении задачи 3 (п. 4.1), то есть решать (графоаналитически) способом последовательного приближения.

Расшифровка условных обозначений материала труб, принятая в таблицах с исходными данными к задачам этой темы, следующая:

М – металлические трубы; Нм – неметаллические, в т.ч.:

М1 – стальные водогазопроводные ГОСТ 3262-75

М2 – стальные цельнотянутые ГОСТ 10704-76

М3 – стальные электросварные ГОСТ 10704-76 (М3А-нов., М3Б-б/у)

М4 – чугунные ГОСТ 9583-75

М5 – чугунные ГОСТ 5525-75 (М5А-нов., М5Б-б/у)

Нм1 – асбестоцементные ГОСТ 539-80

Нм2 – пластмассовые МРТУ-6-05-917-76

Нм3 – полиэтиленовые, типа Г ГОСТ 1899-73

### Пример 13

Из водонапорной башни высотой 20 м в трубопровод (рис. 4.6), состоящий из трех труб, подается вода с расходом  $Q_1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Длина стальной трубы до разветвления  $l_1 = 800 \text{ м}$ , диаметр  $d_1 = 300 \text{ мм}$ . В сечении В-В трубопровод разветвляется на две ветви, длины и диаметры которых соответственно равны  $l_2 = 940 \text{ м}$ ;  $d_2 = 200 \text{ мм}$ ;  $l_3 = 1050 \text{ м}$ ;  $d_3 = 250 \text{ мм}$ . Температура воды  $10^\circ\text{C}$ .

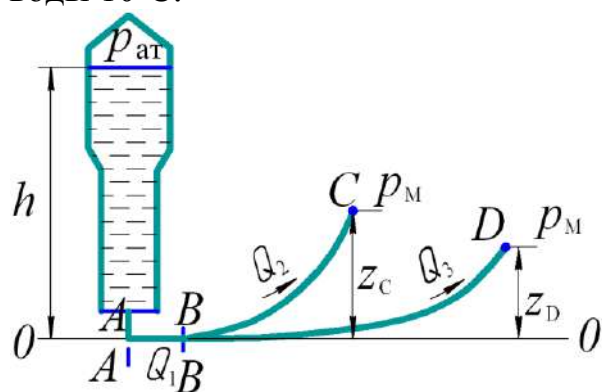


Рисунок 4.6 – К примеру 13

Определить расходы в каждой ветви трубопровода. Геодезические отметки подачи воды  $z_C = 5 \text{ м}$  и  $z_D = 3 \text{ м}$ , избыточные давления  $p_M = 50 \text{ Па}$ . Местными сопротивлениями пренебречь.

Дано:

$Q_1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $l_1 = 800 \text{ м}$ ;  $d_1 = 300 \text{ мм}$ ;

$l_2 = 940 \text{ м}$ ;  $d_2 = 0,2 \text{ м}$ ;  $l_3 = 1050 \text{ м}$ ;

$d_3 = 0,25 \text{ м}$ ;  $z_C = 5 \text{ м}$ ;  $z_D = 3 \text{ м}$ ;

$p_{MC} = p_{MD} = 50 \text{ кПа}$ .

Найти:  $Q_2$  и  $Q_3$ .

### Решение

Судя по расчетной схеме (рис. 4.6) в задаче требуется выполнить гидравлический расчет тупикового трубопровода, состоящего из магистрали АВ и двух отводов (ВС и ВД) из точки В. При этом в местах отбора жидкости

(точках  $C$  и  $D$ ) имеет место одинаковое манометрическое давление  $p_m = 50$  кПа.

Поэтому мысленно сомкнув концы боковых отводов (точки  $C$  и  $D$ ) вместо тупикового трубопровода, получим трубопровод с параллельным соединением участков, имеющих равные потребные напоры:

$$H_{\text{потр}_2} = H_{\text{потр}_3}, \quad (4.42)$$

$$\text{то есть } \begin{cases} A_2 l_2 Q_2^2 + z_c = A_3 l_3 Q_3^2 + z_d \\ Q_1 = Q_2 + Q_3 \end{cases} \quad (4.42A) \quad (4.43)$$

Таким образом, имеем систему двух уравнений с двумя неизвестными ( $Q_2$  и  $Q_3$ ). Решаем систему методом подстановки. Для этого из формулы (4.43) выразим, например,  $Q_3$ .

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 = (0,1 - Q_2) \quad (4.44)$$

которое подставим в формулу (4.45):

$$A_2 l_2 Q_2^2 = A_3 l_3 Q_3^2 (0,1 - Q_2)^2 + z_d - z_c \quad (4.45)$$

Из Приложения 8 находим для заданных диаметров удельные сопротивления для стальных цельнотянутых труб, изготовленных в соответствии с ГОСТ 10 704-76:

$$A_1 = 0,8466 \text{ с}^2/\text{м}^6, A_2 = 6,959 \text{ с}^2/\text{м}^6, \text{ а } A_3 = 2,187 \text{ с}^2/\text{м}^6.$$

и подставляем в ф. (4.45):

$$6,959 \cdot 940 \cdot Q_2^2 = 2,187 \cdot 1050 (0,1 - Q_2)^2 + 2$$

Решая полученное выражение, получили в итоге квадратное уравнение с одним неизвестным  $Q_2$ :

$$4245,1 Q_2^2 + 459,3 Q_2 - 24,96 = 0$$

$$Q_2 = \frac{-459,3 \pm \sqrt{459,3^2 + 4 \cdot 4245,1 \cdot 24,96}}{2 \cdot 4245,1} = \frac{-459,3 + 769,7}{2 \cdot 4245,1} = 0,04 \text{ м}^3/\text{с}$$

Второй корень отбрасываем, поскольку расход жидкости не может быть отрицательным числом.

Из ф. (4.44) получаем значение  $Q_3$ :

$$Q_3 = 0,1 - 0,04 = 0,06 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проверка: достаточна ли высота водонапорной башни  $h = 20$  м для обеспечения работы тупикового трубопровода с возможностью поднятия воды на отметку  $z_d = 5$  м?

Для этого вычислим пьезометрические отметки вдоль наиболее нагруженной ветви трубопровода, то есть  $ABD$ :

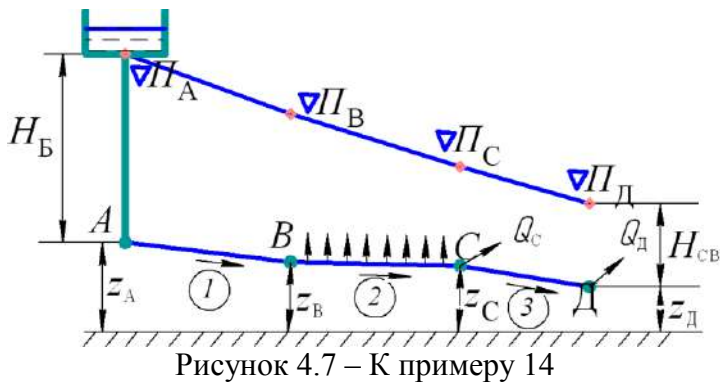
$$P_B = P_D + h_{\text{вд}} = 5 + 2,187 \cdot 1050 \cdot 0,06^2 = 13,8 \text{ м}$$

$$P_A = P_B + h_{\text{лв}} = 13,8 + 0,8466 \cdot 800 \cdot 0,1^2 = 20 \text{ м}$$

Ответ: да, достаточна;  $Q_2 = 0,04 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_3 = 0,06 \text{ м}^3/\text{с}$ .

## Пример 14





На трубопроводе, питаемом от водонапорной башни (рис. 4.7), участок  $BC$  имеет непрерывную раздачу по пути  $q = 0,05$  л/с на 1 пог.м, а точках  $C$  и  $D$  - сосредоточенные отборы  $Q_C = 10$  л/с и  $Q_D = 12$  л/с. Длины участков трубопровода  $AB = 400$  м,  $BC = 300$  м,  $CD = 200$  м. Отметки земли:  $z_A =$

15 м;  $z_B = 14$  м;  $z_C = 12$  м и  $z_D = 10$  м; свободный напор  $H_{CB} \geq 10$  м. Построить пьезометрическую линию и определить необходимую высоту водонапорной башни в точке  $A$ , если диаметры участков  $D_{AB} = D_{BC} = 200$  мм;  $D_{CD} = 125$  мм; трубы асбестоцементные.

Дано:  $H_{CB} = 10$  м;  $Q_C = 10$  л/с;  $Q_D = 12$  л/с;  $z_D = 10$  м;  $z_C = 12$  м;  $z_B = 14$  м;  $z_A = 15$  м;  $q = 0,05$  л/с на 1 пог. м;  $l_{AB} = 400$  м;  $l_{BC} = 300$  м;  $l_{CD} = 200$  м;  $D_{AB} = D_{BC} = 200$  мм;  $D_{CD} = 125$  мм.

Материал труб – асбестоцемент.

Найти:  $H_0$ .

#### Решение

Присвоим номера участкам трубопровода  $AB$ : участку  $AB$  № 1; участку  $BC$  - № 2; участку  $CD$  - № 3.

Гидравлический расчет трубопровода начнем с 3-го участка. Согласно Приложения 9 для диаметра  $D_3 = 125$  мм асбестоцементной трубы удельное сопротивление равно  $A_3 = 76,08$  с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>. Соответственно потерю напора на этом участке определяем как для простого трубопровода по формуле:

$$h_{l_3} = A_3 \cdot l_3 \cdot Q_D^2 = 76,08 \cdot 200 \cdot 0,012^2 = 2,2 \text{ м.}$$

На втором участке, кроме транзитного расхода

$$Q_{\text{тр}} = Q_C + Q_D = (10 + 12) \cdot 10^{-3} = 0,022 \text{ м}^3/\text{с}$$

происходит непрерывная раздача воды по пути, определяемая по формуле:

$$Q_{\text{пут}} = q \cdot l_2 = 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 0,015 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Следовательно, потери напора на трение на 2-ом участке определяют по формуле (4.37):

$$h_{l_2} = A_2 \cdot l_2 \cdot Q_p^2,$$

где  $A_2$  – удельное сопротивление трубопровода диаметром  $D_2 = 200$  мм, равно 6,898 с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup> (см. Приложение 9);

$Q_p$  – расчетный расход воды на 2-ом участке, определяемый из формулы (4.39)

$$Q_p \approx Q_{\text{тр}} + 0,55 Q_{\text{пут}} = 0,22 + 0,55 \cdot 0,15 \approx 0,03 \text{ м}^3/\text{с.}$$

$$h_{l_2} = 6,898 \cdot 300 \cdot 0,03^2 = 1,9 \text{ м.}$$

На 1-ом участке имеет место общий расход воды, который в соответствии с формулой (4.36) равен



$$Q_0 = Q_{\text{пут}} + Q_{\text{тр}} = 0,015 + 0,022 = 0,037 \text{ м}^3/\text{с}$$

Потери на трение на 1-ом участке, который является простым трубопроводом, определяем по формуле:

$$h_{l_1} = A_1 \cdot l_1 \cdot Q_0^2 = 6,898 \cdot 400 \cdot 0,037^2 = 3,8 \text{ м}$$

Для построения пьезометрической линии выполним расчет пьезометрических отметок  $\Delta\Pi$  и свободных напоров  $H_{\text{св}}$  в узловых точках трубопровода:

$$\Delta\Pi_{\text{Д}} = z_{\text{д}} + H_{\text{св}} = 10 + 10 = 20 \text{ м. Свободный напор в точке Д}$$

$$H_{\text{свД}} = 10 \text{ м по условию задачи;}$$

$$\Delta\Pi_{\text{С}} = \Delta\Pi_{\text{Д}} + h_{l_3} = 20 + 2,2 = 22,2 \text{ м;}$$

$$H_{\text{свД}} = \Delta\Pi_{\text{С}} - z_{\text{с}} = 22,2 - 12 = 10,2 \text{ м;}$$

$$\Delta\Pi_{\text{В}} = \Delta\Pi_{\text{С}} + h_{l_2} = 22,2 + 1,9 = 24,1 \text{ м;}$$

$$H_{\text{свВ}} = \Delta\Pi_{\text{В}} - z_{\text{В}} = 24,1 - 14 = 10,1 \text{ м} > 10 \text{ м.}$$

$$\Delta\Pi_{\text{А}} = \Delta\Pi_{\text{В}} + h_{l_1} = 24,1 + 3,8 = 27,9 \text{ м; } H_{\text{свА}} = \Delta\Pi_{\text{А}} - \Delta_{\text{А}} = 27,9 - 15 = 12,9 \text{ м.}$$

$$\text{Таким образом } H_{\text{б}} = H_{\text{свА}} = 12,9 \text{ м.}$$

Ответ: высота водонапорной башни  $H_{\text{б}} = 12,9 \text{ м.}$

**Задача 69** (рис.4.8). По новому стальному бесшовному трубопроводу, состоящему из двух последовательно соединенных труб, вода выливается в атмосферу из резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень  $H$  и манометрическое давление  $p_{\text{м}}$ . Определить величину манометрического давления  $p_{\text{м}}$  для обеспечения расхода  $Q$  при следующих данных: диаметры труб  $d_1, d_2$ ; длины  $\ell_1$  и  $\ell_2$ , температура воды  $t$ , угол открытия крана равен  $\theta$ . Значение  $\zeta_{\text{кр}}$  см. в Приложении 6. Исходные данные к задаче приведены в табл. 69.

Таблица 69

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $H$             | м                 | 5,4                    | 3,5 | 1,5 | 0,7 | 5   |
| $Q$             | л/с               | 7                      | 9   | 11  | 14  | 2,8 |
| $\ell_1$        | м                 | 25                     | 30  | 35  | 34  | 28  |
| $\ell_2$        | м                 | 34                     | 45  | 47  | 45  | 34  |
| $d_1$           | мм                | 75                     | 100 | 125 | 150 | 50  |
| $d_2$           | мм                | 50                     | 75  | 100 | 125 | 40  |
| $t$             | °С                | 20                     | 19  | 18  | 17  | 18  |
| $\theta$        | ...°              | 20                     | 30  | 40  | 40  | 20  |

**Задача 70** (рис.4.9). Из резервуара  $A$ , на свободной поверхности которого избыточное давление  $p_{\text{м}}$ , вытекает вода в резервуар  $B$  по трубопроводу переменного сечения, состоящему из двух участков длинами  $\ell_1, \ell_2$  и диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  соответственно. Свободная поверхность резервуара  $B$  расположена ниже центра тяжести потока на высоту  $H$ .

Определить:

1. Скорость движения воды на обоих участках трубопровода и режимы течения, если заданы коэффициенты гидравлического трения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а также коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta_{\text{вх}}$ ,  $\zeta_{\text{кр}}$  и  $\zeta_{\text{кол}}$ .
2. Расход воды  $Q$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 70.

Таблица 70

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $H_1$           | м                 | 6                      | 4     | 5     | 4,5   | 3,9   | 5,5   |
| $H$             | м                 | 4                      | 2     | 3     | 2     | 2,5   | 3,7   |
| $p_m$           | кПа               | 200                    | 150   | 180   | 225   | 1990  | 175   |
| $\ell_1$        | м                 | 8                      | 10    | 5     | 7     | 9     | 6     |
| $\ell_2$        | м                 | 15                     | 15    | 9     | 10    | 14    | 15    |
| $d_1$           | мм                | 150                    | 175   | 100   | 50    | 80    | 120   |
| $d_2$           | мм                | 80                     | 125   | 70    | 3,2   | 60    | 90    |
| $\lambda_1$     |                   | 0,025                  | 0,021 | 0,019 | 0,018 | 0,017 | 0,019 |
| $\lambda_2$     |                   | 0,04                   | 0,027 | 0,025 | 0,03  | 0,029 | 0,033 |
| $\zeta_{вх}$    |                   | 0,45                   | 0,4   | 0,5   | 0,48  | 0,55  | 0,53  |
| $\zeta_{кол}$   |                   | 0,4                    | 0,15  | 0,3   | 0,25  | 0,35  | 0,31  |
| $\zeta_{кр}$    |                   | 5                      | 4,5   | 4     | 4,8   | 4     | 5     |

**Задача 71** (рис. 4.10). Вода из напорного резервуара  $A$  подается в резервуар  $B$  по короткому трубопроводу переменного сечения. На свободной поверхности в обоих резервуарах действует избыточное давление  $p_{m1}$  и  $p_{m2}$  соответственно. Трубопровод состоит из двух участков, имеющих длины  $\ell_1$  и  $\ell_2$  и диаметры соответственно  $d_1$  и  $d_2$ . Определить:

1. Скорости движения воды на участках  $v_1$  и  $v_2$ , если заданы значения коэффициентов гидравлического трения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а также коэффициента входа в трубу  $\zeta_{вх}$ ;
2. Режим течения воды на участках при температуре воды  $15^\circ\text{C}$ ;
3. Область гидравлического трения на участках, если абсолютная шероховатость на первом участке  $\Delta_1 = 0,3$  мм, а на втором  $\Delta_2 = 0,2$  мм;
4. Расход воды  $Q$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 71.

Таблица 71

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $H$             | м                 | 2,5                    | 5     | 2     | 4     | 3,5   | 2     |
| $p_{m1}$        | кПа               | 90                     | 60    | 50    | 100   | 75    | 95    |
| $p_{m2}$        | кПа               | 20                     | 25    | 10    | 40    | 30    | 50    |
| $\ell_1$        | м                 | 5                      | 4     | 4,8   | 3,5   | 4,6   | 4,5   |
| $\ell_2$        | м                 | 10                     | 8     | 7     | 6     | 12    | 9     |
| $d_1$           | мм                | 200                    | 90    | 125   | 70    | 150   | 125   |
| $d_2$           | мм                | 175                    | 60    | 90    | 40    | 125   | 100   |
| $\lambda_1$     |                   | 0,031                  | 0,035 | 0,03  | 0,029 | 0,027 | 0,03  |
| $\lambda_2$     |                   | 0,021                  | 0,022 | 0,019 | 0,018 | 0,017 | 0,019 |
| $\zeta_{вх}$    |                   | 0,5                    | 0,52  | 0,49  | 0,45  | 0,48  | 0,5   |

**Задача 72** (рис. 4.11). Из открытого резервуара при постоянном напоре  $H$  вытекает вода по трубопроводу, состоящему из двух участков, которые имеют длины  $\ell_1$  и  $\ell_2$ , диаметры  $d_1$  и  $d_2$  и коэффициенты гидравлического трения  $\lambda_1=0,021$ ;  $\lambda_2=0,029$  соответственно. Определить:

1. Скорость истечения воды из трубопровода при условии, что на ее величину оказывают влияние трение по длине и местные сопротивления: вход в трубу  $\zeta_{вх}$ , задвижка  $\zeta_z$  и внезапное расширение потока  $\zeta_{вн.расш.}$  (значения коэффициента  $\zeta_{вн.расш.}$  см. в Приложении 6)
2. Расход воды в трубопроводе  $Q$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 72.

Таблица 72

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |   |   |   |   |   |
|-----------------|-------------------|------------------------|---|---|---|---|---|
|                 |                   | 1                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

|                     |    |     |      |      |      |     |       |
|---------------------|----|-----|------|------|------|-----|-------|
| $H$                 | м  | 2,5 | 1,5  | 2    | 4    | 3,5 | 1,75  |
| $\ell_1$            | м  | 8   | 5    | 7    | 6    | 6   | 5     |
| $\ell_2$            | м  | 10  | 8    | 9    | 10   | 9   | 10    |
| $d_1$               | мм | 50  | 60   | 80   | 75   | 55  | 90    |
| $d_2$               | мм | 75  | 80   | 100  | 90   | 80  | 100   |
| $\zeta_{\text{вх}}$ |    | 0,5 | 0,45 | 0,55 | 0,6  | 0,4 | 0,475 |
| $\zeta_3$           |    | 2,5 | 2,25 | 2,3  | 2,55 | 2,6 | 2,45  |

**Задача 73** (рис.4.12). К открытому резервуару  $A$  присоединен короткий стальной трубопровод, состоящий из двух участков длиной  $\ell_1$  и  $\ell_2$  и диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  соответственно. Истечение по короткому трубопроводу происходит в атмосферу при постоянном напоре  $H$  в бак  $B$ . Температура воды  $t = 5^\circ\text{C}$ . Определить:

1. Напор  $H$ , который необходимо поддерживать в резервуаре  $A$ , чтобы наполнить бак  $B$  объемом  $V$  за время  $t$ , если заданы коэффициенты гидравлического трения на участках  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а также размеры этих участков;
2. Режим течения воды на участках;
3. Область гидравлического трения на участках, если эквивалентная шероховатость стенок трубопровода на обоих участках одинакова и составляет  $\Delta = 0,08$  мм. Величину  $\nu$  для заданной температуры воды см. в Приложении 4.

Коэффициенты местных сопротивлений: вход в трубу  $\zeta_1$ , внезапное сужение потока  $\zeta_2$ , задвижки  $\zeta_3$  см. в Приложении 6. Исходные данные к задаче приведены в табл. 73.

Таблица 73

| Исходные данные | Единицы и измерения | Значение для вариантов |       |       |       |       |       |
|-----------------|---------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                     | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $V$             | м <sup>3</sup>      | 18                     | 15    | 16    | 20    | 25    | 15    |
| $t$             | мин                 | 4,5                    | 14    | 55    | 15    | 6     | 5     |
| $\ell_1$        | м                   | 8                      | 6     | 5     | 4     | 7     | 9     |
| $\ell_2$        | м                   | 12                     | 10    | 8     | 9     | 11    | 15    |
| $d_1$           | мм                  | 150                    | 90    | 50    | 175   | 150   | 120   |
| $d_2$           | мм                  | 120                    | 75    | 32    | 150   | 125   | 100   |
| $\lambda_1$     |                     | 0,029                  | 0,032 | 0,036 | 0,04  | 0,03  | 0,027 |
| $\lambda_2$     |                     | 0,017                  | 0,021 | 0,02  | 0,023 | 0,025 | 0,021 |

**Задача 74** (рис.4.13). Вода из напорного открытого резервуара  $A$  по короткому напорному трубопроводу подается в открытый резервуар  $B$  под уровень. Трубопровод состоит из двух участков, длины которых соответственно равны  $\ell_1$  и  $\ell_2$  и диаметры  $d_1$  и  $d_2$ .

Определить:

1. Расход воды, поступающий в резервуар  $B$  по трубопроводу с учетом потерь напора на трение и местные сопротивления: внезапное расширение потока и односторонней задвижки ( $\zeta_{\text{вн.расш.}}$  и  $\zeta_3$  см. в Приложении 6).

2. Режим течения воды на участках трубопровода при температуре воды  $t = 20^\circ\text{C}$ .

3. Установить область гидравлического трения на участках, если высота выступов шероховатости составляет  $\Delta = 0,1$  мм. Исходные данные к задаче приведены в табл. 74.

Таблица 74

| Исходные данные | Единицы и измерения | Значение для вариантов |       |       |       |       |       |
|-----------------|---------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                     | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $H_1$           | м                   | 4                      | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     |
| $H_2$           | м                   | 2                      | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| $\ell_1$        | м                   | 8                      | 5     | 9     | 6     | 9     | 8     |
| $\ell_2$        | м                   | 7,7                    | 12    | 10    | 8     | 12    | 10    |
| $d_1$           | мм                  | 80                     | 80    | 50    | 50    | 32    | 55    |
| $d_2$           | мм                  | 100                    | 110   | 75    | 80    | 50    | 90    |
| $\lambda_1$     |                     | 0,017                  | 0,018 | 0,021 | 0,02  | 0,023 | 0,019 |
| $\lambda_2$     |                     | 0,03                   | 0,035 | 0,027 | 0,023 | 0,029 | 0,035 |
| $a/d$           |                     | 0,6                    | 0,5   | 0,6   | 0,5   | 0,7   | 0,6   |

**Задача 75** (рис.4.14). Из большого открытого резервуара  $A$ , в котором поддерживается постоянный уровень воды, по трубопроводу, состоящему из двух последовательно соединенных труб, вода течет в резервуар  $B$ . Разность уровней в резервуарах равна  $H$ .

Требуется:

1. Определить расход воды в трубопроводе.
2. Построить пьезометрическую и напорную линии. Исходные данные к задаче приведены в табл. 75.

Таблица 75

| Исходные данные | Единицы измерения | Значение для вариантов |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $H$             | м                 | 6                      | 7,7   | 8,4   | 6,5   | 9     | 7     |
| $\ell_1$        | м                 | 13                     | 10    | 6,8   | 8,9   | 10    | 12    |
| $\ell_2$        | м                 | 7,2                    | 8     | 5,4   | 7     | 5,8   | 9,1   |
| $d_1$           | мм                | 50                     | 70    | 40    | 60    | 50    | 60    |
| $d_2$           | мм                | 40                     | 50    | 32    | 50    | 40    | 50    |
| $\lambda_1$     |                   | 0,021                  | 0,02  | 0,019 | 0,023 | 0,021 | 0,02  |
| $\lambda_2$     |                   | 0,019                  | 0,018 | 0,017 | 0,02  | 0,019 | 0,018 |

**Задача 76** (рис.4.15). Сложный трубопровод с параллельным и последовательным соединением труб подключен к баку с водой и должен обеспечивать расходы  $Q_2$  и  $Q_3$  в узловых точках 2 и 3, а также избыточное давление  $p_m$  на выходе (при полностью открытой задвижке). Определить, какой потребуется для этого уровень воды в баке  $H$ . Потери напора на местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь напора по длине. Исходные данные к задаче приведены в табл. 76

Таблица 76

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $d_1$           | мм                | 80                     | 100  | 100  | 80   | 100  | 80   |
| $d_2$           | мм                | 60                     | 100  | 60   | 125  | 150  | 125  |
| $d_3$           | мм                | 75                     | 100  | 80   | 100  | 125  | 80   |
| $\ell_1$        | м                 | 80                     | 150  | 200  | 220  | 300  | 80   |
| $\ell_2$        | м                 | 80                     | 180  | 220  | 210  | 350  | 180  |
| $\ell_3$        | м                 | 100                    | 200  | 150  | 170  | 300  | 100  |
| $Q_2$           | л/с               | 5                      | 9    | 8    | 12   | 20   | 9    |
| $Q_3$           | л/с               | 5                      | 9,5  | 5    | 9    | 15   | 5    |
| $z$             | м                 | 3                      | 4    | -3   | 0    | -2   | 4    |
| $p_m$           | МПа               | 0,2                    | 0,08 | 0,08 | 0,12 | 0,25 | 0,12 |
| Виды труб       |                   | МЗА                    | М5А  | Нм3  | М4   | М2   | Нм3  |

**Задача 77** (рис.4.16). По условию предыдущей задачи требуется найти уровень  $H$  воды в баке при наличии избыточного давления  $p_0$  на его свободной поверхности. Потери

напора на местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь напора по длине. Исходные данные к задаче приведены в табл. 77.

Таблица 77

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $d_1$           | мм                | 100                    | 125  | 125  | 200  | 300  |
| $d_2$           | мм                | 125                    | 200  | 150  | 250  | 200  |
| $d_3$           | мм                | 125                    | 125  | 100  | 200  | 250  |
| $\ell_1$        | м                 | 200                    | 80   | 120  | 140  | 400  |
| $\ell_2$        | м                 | 230                    | 250  | 150  | 150  | 450  |
| $\ell_3$        | м                 | 300                    | 300  | 110  | 120  | 500  |
| $Q_2$           | л/с               | 10                     | 30   | 30   | 70   | 80   |
| $Q_3$           | л/с               | 15                     | 25   | 10   | 50   | 70   |
| $z$             | м                 | -4                     | 2    | -2   | 3    | 0    |
| $p_0$           | МПа               | 0,2                    | 0,15 | 0,1  | 0,2  | 0,25 |
| $p_m$           | МПа               | 0,1                    | 0,1  | 0,05 | 0,14 | 0,15 |
| Виды труб       |                   | M2                     | M4   | Hm3  | M4   | M2   |

**Задача 78** (рис.4.17). Определить потребный напор для трубопровода, питаемого от водонапорной башни при условии, что участки  $AB$  и  $CD$  обеспечивают непрерывную раздачу воды по пути; в узловых точках В, С и D имеются сосредоточенные отборы  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  соответственно конец трубопровода расположен выше его начала на величину  $\Delta z$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 78

Таблица 78

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |     |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|-----|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4   | 5    |
| $Q_1$           | л/с               | 8                      | 5    | 4    | 4,7 | 6    |
| $q_1, 10^{-2}$  | л/с на 1 п.м      | 2,2                    | 1,65 | 1,38 | 1,2 | 0,8  |
| $q_2, 10^{-2}$  | л/с на 1 п.м      | 1,7                    | 1,3  | 1,1  | 0,8 | 0,52 |
| $d_1$           | мм                | 250                    | 250  | 200  | 175 | 150  |
| $d_2$           | мм                | 200                    | 200  | 150  | 150 | 125  |
| $d_3$           | мм                | 150                    | 150  | 100  | 125 | 100  |
| $\ell_1$        | м                 | 800                    | 700  | 600  | 600 | 400  |
| $\Delta z$      | м                 | 2                      | 3    | 1,75 | 2,5 | 2,25 |
| Виды труб       |                   | M2                     | M5A  | Hm3  | M2  | M1   |

**Задача 79** (рис. 4.18). Определить расход  $Q$  в трубопроводе, состоящем из трёх последовательно соединённых участков труб и построить пьезометрическую линию (рис.4.18,а). Как изменится расход, если участки труб соединить параллельно (рис.4.18,б)? Построить суммарные характеристики трубопроводов для обоих случаев. Исходные данные к задаче приведены в табл. 79

Таблица 79

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |     |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   |
| $H$             | м                 | 2                      | 6,5 | 4   | 3,5 | 6   |
| $\ell$          | м                 | 400                    | 300 | 300 | 400 | 400 |
| $d_1$           | мм                | 200                    | 100 | 200 | 150 | 125 |
| $d_2$           | мм                | 150                    | 80  | 150 | 125 | 100 |
| $d_3$           | мм                | 125                    | 60  | 125 | 100 | 80  |
| Виды труб       |                   | M4                     | M2  | Hm3 | M3A | Hm3 |

**Задача 80** (рис.4.19). Определить диаметр водовода, соединяющего водонапорную башню с фермой и построить пьезометрическую линию при следующих условиях: расход воды  $Q$ , отметка уровня воды в водонапорной башне  $H_A$ , геометрическая высота расположения фермы  $Z_{\text{ф}}$ , свободный напор в конечном пункте водовода  $h_{\text{св}}$ .

В случае расхождения между уточненным и заданным свободным напором более, чем на 15%, водовод следует разбить на два участка с разными диаметрами, соединенными последовательно. Исходные данные к задаче приведены в табл. 80.

Таблица 80

| Исходные данные | Единицы измерения   | Значения для вариантов |      |      |      |      |
|-----------------|---------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                 |                     | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $H_A$           | м                   | 20                     | 25   | 18   | 12   | 20   |
| $Z_{\text{ф}}$  | м                   | 1,5                    | 3    | 2    | -1,5 | 2,3  |
| $h_{\text{св}}$ | м                   | 10                     | 12   | 12   | 8    | 12   |
| $\ell$          | м                   | 900                    | 1500 | 1200 | 750  | 1250 |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с   | 10                     | 8    | 16   | 12   | 10   |
| $h_M$           | %от $h_{\text{ТР}}$ | 7                      | 9    | 11   | 6    | 8    |
| Виды труб       |                     | М4                     | М4   | Нм3  | Нм1  | М5А  |

**Задача 81** (рис.4.19). Вода из водонапорной башни подаётся по горизонтальному трубопроводу диаметром  $d$  на расстояние  $\ell$ .

Определить на какую высоту  $h_{\text{св}}$  в конце трубопровода будет подниматься вода при расходе  $Q$ , если местные потери составляют  $n\%$  от потерь на трение. Построить кривую потребного напора. Исходные данные к задаче приведены в табл. 81.

Таблица 81

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |     |     |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|------|-----|-----|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3    | 4   | 5   |
| $Q$             | л/с               | 22,5                   | 20  | 3,75 | 5,6 | 7   |
| $H_B$           | м                 | 30                     | 25  | 17   | 20  | 21  |
| $d$             | мм                | 150                    | 125 | 75   | 80  | 100 |
| $\ell$          | м                 | 1000                   | 250 | 500  | 400 | 600 |
| $n$             | %                 | 10                     | 8   | 12   | 15  | 10  |
| Виды труб       |                   | Нм3                    | Нм2 | М2   | М5А | М5Б |

**Задача 82** (рис.4.20). В конце стального трубопровода длиной  $\ell$  установлена водоразборная колонка на отметке  $Z_k$  при напоре в начале трубопровода  $H_B$ . Определить необходимый диаметр трубопровода  $d$  при давлении в колонке  $p_m$  и расходе  $Q$ . Уточнить давление в водоразборной колонке при стандартном значении диаметра условного прохода трубопровода, а также степень расхождения между уточнённым и заданным давлением  $p_m$ .

Исходные данные к задаче приведены в табл. 82.

Таблица 82

| Исходные данные | Единицы измерения   | Значения для вариантов |       |       |       |      |
|-----------------|---------------------|------------------------|-------|-------|-------|------|
|                 |                     | 1                      | 2     | 3     | 4     | 5    |
| $H_B$           | м                   | 20                     | 25    | 18    | 22    | 12   |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с   | 6                      | 12    | 7,5   | 12    | 5    |
| $\ell$          | м                   | 700                    | 1300  | 850   | 800   | 750  |
| $p_m$           | МПа                 | 0,02                   | 0,025 | 0,015 | 0,025 | 0,02 |
| $Z_k$           | м                   | 5                      | -2    | 7     | 4     | -1,5 |
| $h_M$           | %от $h_{\text{ТР}}$ | 15                     | 12    | 10    | 5     | 8    |
| Виды труб       |                     | М2                     | М3А   | М3Б   | М1    | М2   |

**Задача 83** (рис.4.20). Из условия предыдущей задачи определить расход в стальном трубопроводе. Определить, как изменится расход в трубопроводе, если: а) удвоить длину трубопровода; б) уменьшить её в два раза. Местными потерями напора пренебречь. Построить кривую потребного напора. Исходные данные к задаче приведены в табл. 83.

Таблица 83

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |       |      |       |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|-------|------|-------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3     | 4    | 5     |
| $H_K$           | м                 | 27                     | 33   | 31    | 29   | 32    |
| $p_m$           | МПа               | 0.025                  | 0.02 | 0.025 | 0.02 | 0.025 |
| $d$             | мм                | 100                    | 150  | 125   | 100  | 90    |
| $\ell$          | м                 | 1600                   | 1000 | 1200  | 1600 | 1000  |
| $Z_K$           | м                 | 5                      | 2,5  | 5     | 2,5  | 5     |
| Виды труб       |                   | M1                     | M3Б  | M2    | M3А  | M1    |

**Задача 84** (рис.4.21). Вода подается по горизонтальному трубопроводу, состоящему из двух последовательных участков  $AB$  и  $BC$  с соответствующими диаметрами  $d$  и  $d/3$ . Средоточенный отбор воды в узловой точке  $C$  равен  $Q$ ; свободный напор в конце трубопровода  $h_{CB}$ . Определить суммарные потери напора на трение в трубопроводе и пьезометрический напор в точке  $A$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 84.

Таблица 84

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с | 38                     | 30,5 | 32,2 | 40,9 | 36,7 |
| $\ell$          | м                 | 200                    | 100  | 250  | 300  | 320  |
| $D$             | мм                | 300                    | 300  | 450  | 450  | 300  |
| $q, 10^{-2}$    | л/с на 1 пог.м    | 2                      | 1,8  | 2,9  | 3    | 2,6  |
| $h_{CB}$        | м                 | 10                     | 10   | 8    | 8    | 10   |
| Виды труб       |                   | M4                     | Нм3  | M2   | M5Б  | M2   |

**Задача 85** (рис.4.22). В тупиковый трубопровод, состоящий из магистрали  $AB$  и боковых отводов  $BC$  и  $BD$ , вода поступает из водонапорной башни в пункты  $C$  и  $D$ . Отметка уровня воды в башне  $H_B$ . Определить:

1. Сколько воды поступает в каждый пункт, т.е.  $Q_C$  и  $Q_D$ ?
2. Пьезометрическую высоту в пункте  $C$  ( $\Delta P_C$ ) при известной пьезометрической высоте в пункте  $D$  ( $\Delta P_D$ ). Исходные данные к задаче приведены в табл. 85.

Таблица 85

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |            |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|------------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3          | 4    | 5    |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с | 32                     | 25    | 20         | 30   | 44   |
| $p_m$           | МПа               | 0,22                   | 0,525 | 0,36       | 0,46 | 0,56 |
| $\ell$          | м                 | 456                    | 605   | 400        | 1825 | 880  |
| $\ell_1$        | м                 | 220                    | 190   | 280        | 625  | 180  |
| $\ell_2$        | м                 | 540                    | 205   | 190        | 1205 | 140  |
| $d$             | мм                | 200                    | 125   | 125        | 175  | 175  |
| $d_1$           | мм                | 125                    | 90    | 100        | 125  | 150  |
| $d_2$           | мм                | 150                    | 100   | 75         | 150  | 125  |
| $\Delta P_D$    | м                 | 13,5                   | 10    | 15         | 17   | 16   |
| Виды труб       |                   | M3Б                    | M1    | Нм1<br>ВТ3 | M3А  | M2   |

# Рисунки 4.8...4.22 к задачам темы 4

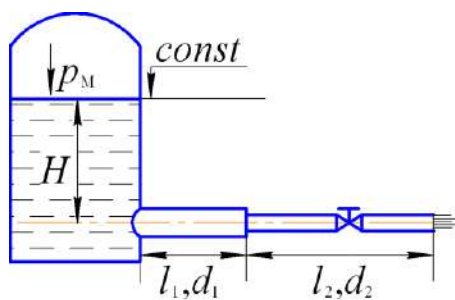


Рисунок 4.8

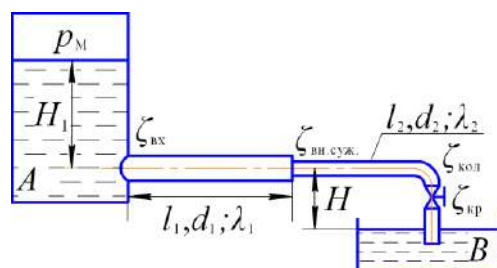


Рисунок 4.9

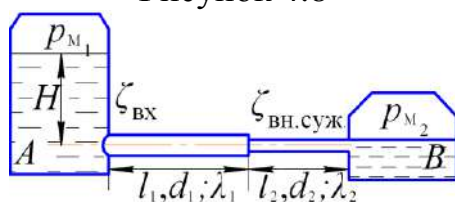


Рисунок 4.10

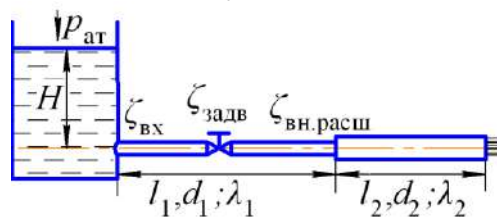


Рисунок 4.11

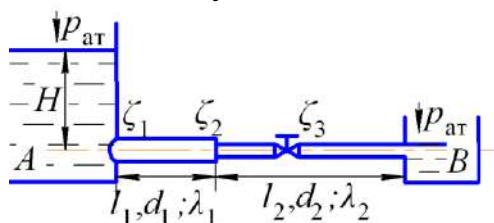


Рисунок 4.12

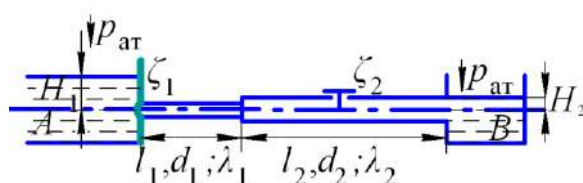


Рисунок 4.13

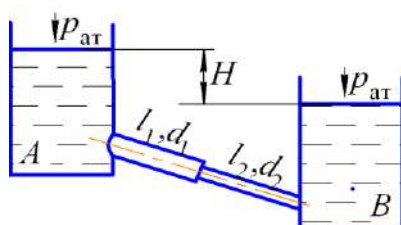


Рисунок 4.14

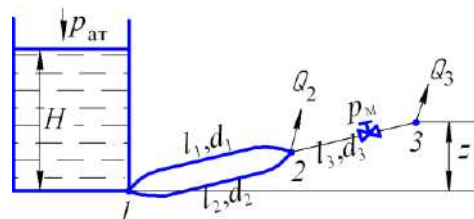


Рисунок 4.15

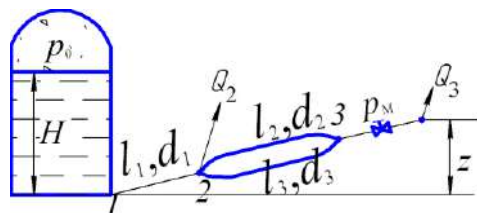


Рисунок 4.16

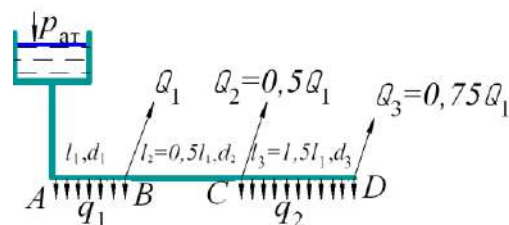


Рисунок 4.17



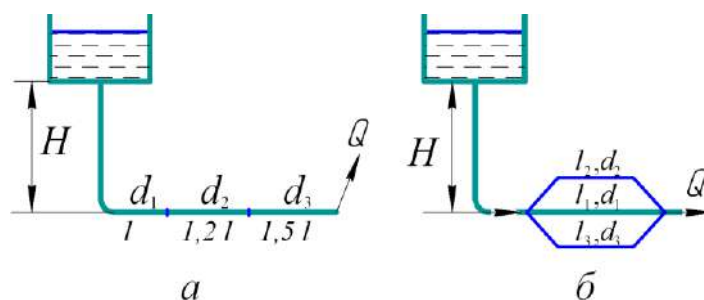


Рисунок 4.18

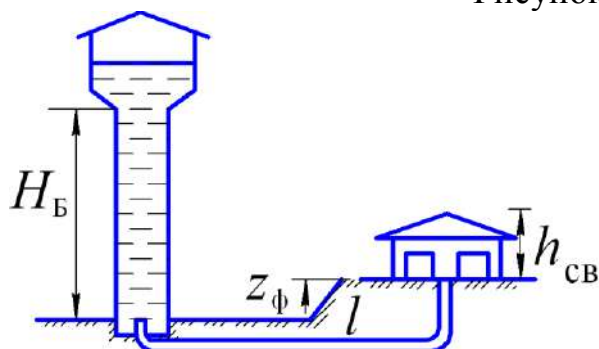


Рисунок 4.19

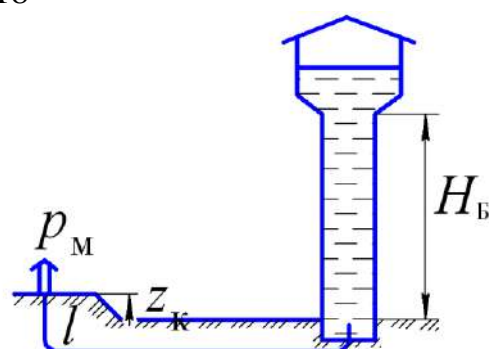


Рисунок 4.20

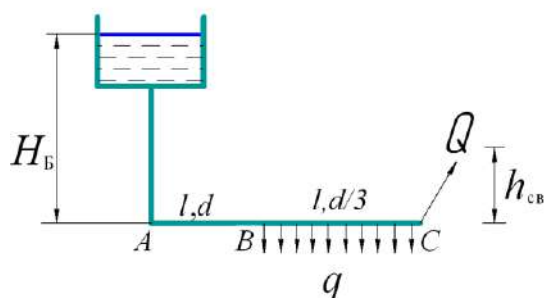


Рисунок 4.21

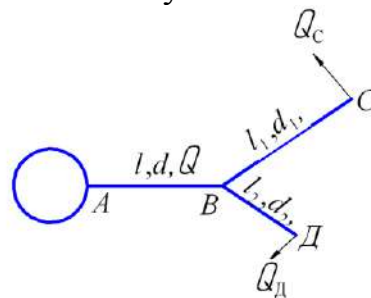


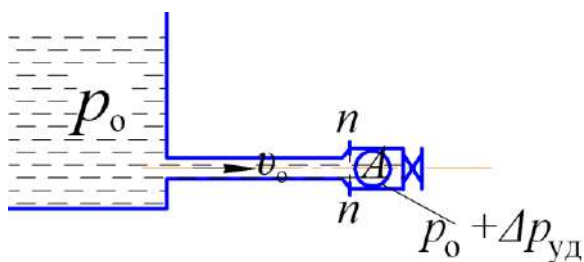
Рисунок 4.22

## ТЕМА 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБОПРОВОДАХ

*Гидравлическим ударом* называется резкое изменение давления в напорном трубопроводе вследствие внезапного изменения скорости движения жидкости в нем по причине полного или частичного закрытия задвижки, включения или выключения насоса.

Теоретическое обоснование явления гидравлического удара в трубах и разработка метода его расчета принадлежат крупнейшему русскому гидромеханику Н.Е. Жуковскому.

При мгновенном закрытии крана непосредственно возле задвижки образуется область возмущения  $A$  вследствие перехода кинетической энергии остановившихся слоев жидкости в потенциальную энергию, которая вызывает расширение стенок трубопровода и сжатие жидкости (рис. 5.1). Таким образом, с учетом деформации стенок трубопровода и сжимаемости жидкости, явление гидравлического удара можно назвать упругим ударом, сопровождающимся волновым характером изменения давления вдоль трубы (рис. 5.2).



$A$  – область возмущения;  $p_0$  – начальное давление в трубе;

$\Delta p_{уд}$  – ударное повышение давления

Рисунок 5.1 – К понятию гидравлического удара

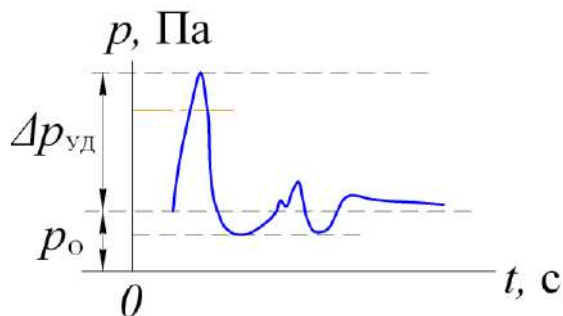


Рисунок 5.2 – График изменения давления во времени при гидравлическом ударе

Указанная упругая деформация жидкости и трубы, распространяющаяся в направлении от крана к баку, происходит с очень большой скоростью  $a_{уд}$ , называемой скоростью ударной волны. Величину  $a_{уд}$  определяют по формуле Н.Е. Жуковского, м/с:

$$a_{уд} = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho \left(1 + \frac{d}{\delta} \frac{E_{ж}}{E_{тр}}\right)}}, \quad (5.1)$$

где  $E_{ж}$  и  $E_{тр}$  – модули упругости соответственно жидкости и материала трубопровода (см. Приложение 7), Па;

$d$  – диаметр потока (внутренний диаметр трубы), мм;

$\delta$  – толщина стенки трубы, мм.

Явление гидравлического удара характеризуется еще одним основным параметром  $\Delta p_{уд}$ , называемым ударным повышением давления. Его величина зависит от вида гидравлического удара:

- при полном гидравлическом ударе:

$$\Delta p_{уд} = \rho \cdot v_0 \cdot a_{уд}, \quad (5.2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$v_0$  – средняя скорость движения жидкости до закрытия задвижки, м/с;

$a_{уд}$  – скорость распространения ударной волны, м/с.

Этот вид удара имеет место при выполнении неравенства:

$$t_{закр} < T, \quad (5.3)$$

$$T = \frac{2l}{a_{уд}}, \quad (5.4)$$

где  $l$  – длина трубопровода, равная расстоянию от задвижки до бака;

$a_{уд}$  – скорость распространения ударной волны;

$T$  – фаза гидравлического удара, с;

- при неполном гидравлическом ударе:

$$\Delta p'_{уд} = \Delta p_{уд} \frac{T}{t_{закр}} = \rho v_0 a_{уд} \frac{2l}{t_{закр} \cdot a_{уд}} = \frac{2l \rho v_0}{t_{закр}} \quad (5.5)$$

Вследствие резкого повышения давления при гидроударе могут возникать осложнения в нормальной работе трубопровода вплоть до разрыва его стенок и аварий оборудования насосных станций. Поэтому для предотвращения нежелательных последствий гидроудара необходимо соблюдение неравенства:

$$\sigma < [\sigma]_p \quad (5.6)$$

где  $[\sigma]_p$  – допустимое для материала напряжение на разрыв, Па;

$\sigma$  – величина расчетного значения напряжения в стенках трубопровода, равного:

$$\sigma = \frac{p_{изб} \cdot d}{2\delta} = \frac{(p_0 - p_{ат} + \Delta p_{уд}) \cdot d}{2\delta} \quad (5.7)$$

где  $p_{изб}$  – полное избыточное давление в трубопроводе, Па;

$d$  и  $\delta$  – соответственно внутренний диаметр и толщина стенок трубопровода, мм;

$p_0$  и  $p_{ат}$  – соответственно начальное и атмосферное давление, Па.

Таким образом, гидроудар в трубе является нежелательным процессом, который надо всячески избегать и не допускать. И если нельзя полностью исключить его, то по мере возможностей избегать ситуацию прямого (полного) гидроудара. Как видно из анализа формулы (5.5) это можно сделать за счет увеличения времени закрытия крана  $t_{закр}$  и уменьшения длины рассматриваемого напорного трубопровода  $l$ .

### Пример 15

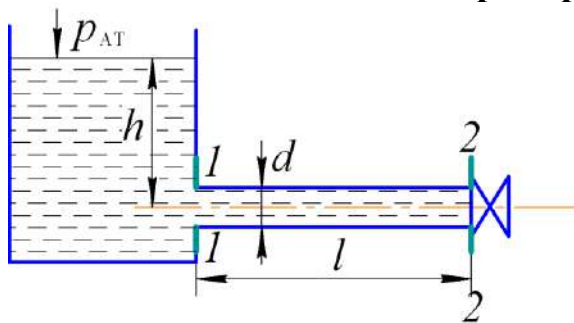


Рисунок 5.3 – К примеру 15

Трубопровод (рис. 5.3), имеющий длину  $l = 20$  м и внутренний диаметр  $d = 50$  мм мгновенно закрывается задвижкой ( $t_{закр} \cong 0$ ). Определить ударное повышение давления в трубе, если глубина погружения центра тяжести проходного сечения трубы под свободную поверхность жидкости в открытом резервуаре равна  $h = 4$  м. Толщина стенки стальной трубы  $\delta = 6$  мм. Жидкость – вода. Принять гидравлический коэффициент трения  $\lambda = 0,03$ .

Дано:  $d = 50$  мм;  $l = 20$  м;  $t_{закр} \cong 0$ ;  $h = 4$  м;  $\delta = 6$  мм;  $\lambda = 0,03$ .

### Решение

Поскольку трубопровод является простым, начальную скорость в трубе найдем по формуле

$$v_0 = \sqrt{\frac{2g[H_{\text{расп}} - (z_2 - z_1)]}{\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \zeta_{mi}}},$$

где по условию задачи  $z_2 = z_1 = 0$ ;  $\Sigma \zeta_{mi} = \zeta_{\text{вх}} = 0,5$ ,  
располагаемый напор  $H_{\text{расп}} = h = 4$  м.

Имеем

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81[4 - (0 - 0)]}{0,03 \frac{20}{0,05} + 0,05}} = 2,5 \text{ м/с.}$$

Из Приложения 10 принимаем  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $E_{\text{ж}} = 2,06 \cdot 10^9 \text{ Па}$  и  $E_{\text{тр}} = 206 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

Находим скорость распространения ударной волны

$$a_{\text{уд}} = \sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \left(1 + \frac{d \cdot E_{\text{ж}}}{\delta \cdot E_{\text{тр}}}\right)}} = \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^9}{1000 \left(1 + \frac{50 \cdot 2,06 \cdot 10^9}{6 \cdot 206 \cdot 10^9}\right)}} = 1378 \text{ м/с.}$$

Ударное повышение давления в трубе

$$\Delta p_{\text{уд}} = \rho v_0 a_{\text{уд}} = 1000 \cdot 2,5 \cdot 1378 = 3445000 \text{ Па} = 3,44 \text{ МПа}$$

Ответ:  $\Delta p_{\text{уд}} = 3,44 \text{ МПа}$

### Пример 16

По стальному трубопроводу длиной  $l = 2$  км, диаметром  $d = 300$  мм и толщиной стенки  $\delta = 10$  мм подается вода. Определить силу давления на запорный диск задвижки, установленной в конце трубы, если время ее закрытия  $t_{\text{закр}} = 3$  с, а объемный расход  $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ; диаметр запорного диска  $D = 0,35$  м.

Дано:  $l = 2 \text{ км} = 2000 \text{ м}$ ;  $d = 300 \text{ мм}$ ;  $\delta = 10 \text{ мм}$ ;  
 $t_{\text{закр}} = 3 \text{ с}$ ;  $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $D = 0,35 \text{ м}$ ;  
жидкость – вода; материал стенок – сталь

Найти:  $F$  и  $\sigma$ .

#### Решение

Определяем среднюю скорость в трубе до закрытия задвижки

$$v_0 = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 0,3^2} = 1,42 \text{ м/с.}$$

По приложению 7 для пары «вода + сталь» принимаем  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $E_{\text{ж}} = 2,06 \cdot 10^9 \text{ Па}$  и  $E_{\text{тр}} = 206 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

Находим скорость распространения ударной волны

$$a_{\text{уд}} = \sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \left(1 + \frac{d E_{\text{ж}}}{\delta E_{\text{тр}}}\right)}};$$

$$a_{\text{уд}} = \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^9}{1000 \left(1 + \frac{300 \cdot 2,06 \cdot 10^9}{10 \cdot 206 \cdot 10^9}\right)}} = 1258 \text{ м/с}.$$

Вычисляем фазу гидравлического удара:

$$T = \frac{2l}{a_{\text{уд}}} = \frac{2 \cdot 2000}{1258} = 3,2 \text{ с.}$$

Так как выполняется условие  $t_{\text{закр}} < T$ , то имеет место полный гидравлический удар.

Повышение давления при полном гидроударе вычисляем по формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p_{\text{уд}} = \rho \cdot v_0 \cdot a_{\text{уд}} = 1000 \cdot 1,42 \cdot 1258 = 1,78 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Находим величину силы давления, действующей на запорный диск:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{\text{уд}} = \frac{3,14 \cdot 0,35^2 \cdot 1,78 \cdot 10^6}{4} = 0,17 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Определяем напряжение в стенке трубы

$$\sigma = \frac{p_{\text{изб}} \cdot d}{2\delta} = \frac{1,78 \cdot 10^6 \cdot 300}{2 \cdot 10} = 26,7 \cdot 10^6 \text{ Па} = 26,7 \text{ МПа}.$$

Допустимое напряжение на разрыв стали, из которой изготовлен трубопровод  $[\sigma_p] = 140 \text{ МПа}$ . Неравенство (5.6) выполнено.

Ответ:  $F = 1,7 \cdot 10^5 \text{ Н}$  и  $\sigma = 26,7 \text{ МПа}$ .

**Задача 86.** По трубопроводу, имеющему от напорного бассейна до затвора длину  $\ell$ , диаметр  $d$  и толщину  $\delta$ , проходит вода в количестве  $Q$ . Начальное давление перед затвором  $p_0$ . Какое будет полное давление  $p$  в трубопроводе в его конце при внезапном закрытии затвора и через какое время  $t$  это давление распространится до напорного бассейна? Исходные данные к задаче приведены в табл. 86

Таблица 86

| Исходные данные | Ед. изм           | Значения для вариантов |              |             |                 |             |
|-----------------|-------------------|------------------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|
|                 |                   | 1                      | 2            | 3           | 4               | 5           |
| $\ell$          | м                 | 960                    | 1040         | 850         | 720             | 780         |
| $d$             | мм                | 350                    | 200          | 250         | 150             | 125         |
| $\delta$        | мм                | 40                     | 25           | 10          | 20              | 20          |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с | 80                     | 40           | 65          | 44              | 14          |
| $p_0$           | кПа               | 196,2                  | 172          | 216         | 142             | 177         |
| Виды труб       |                   | Сталь углер.           | Сталь легир. | Чугун белый | Асбесто-цемент. | Чугун черн. |

**Задача 87.** Трубопровод, имеющий размеры: диаметр  $d$ , толщину стенок  $\delta$  и длину  $\ell$  от напорного бака до задвижки, пропускает расход жидкости  $Q$ . Определить, в течение

какого времени  $t_{\text{закр}}$  надо закрыть задвижку, чтобы максимальное повышение давления в трубопроводе было в 3 раза меньше, чем при мгновенном закрытии задвижки. Исходные данные к задаче приведены в табл. 87

Таблица 87

| Исходные данные | Ед. изм           | Значения для вариантов |             |              |             |         |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------------|--------------|-------------|---------|
|                 |                   | 1                      | 2           | 3            | 4           | 5       |
| $d$             | мм                | 300                    | 40          | 15           | 400         | 80      |
| $\delta$        | мм                | 4                      | 2           | 1,5          | 4,5         | 2,5     |
| $\ell$          | м                 | 510                    | 30          | 100          | 1200        | 540     |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с | 85                     | 6,3         | 0,2          | 115         | 9       |
| Виды труб       |                   | Сталь углер.           | Орг. стекло | Сталь легир. | Сталь углер | Латунь  |
| Вид жидкости    |                   | Вода                   | Спирт       | Диз. топливо | Нефть       | Керосин |

**Задача 88.** Определить ударное давление в трубопроводе с размерами: диаметр  $d$ , толщина стенок  $\delta$  и длина  $\ell$  в случае мгновенного закрытия затвора, расположенного в конце трубопровода. Начальная скорость движения жидкости  $v_0$ , начальное давление  $p_0$ . В течение какого времени  $t_{\text{закр}}$  следует закрыть затвор, чтобы повышение давления при ударе не превышало  $p_1$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 88

Таблица 88

| Исходные данные | Ед. изм. | Значения для вариантов |             |             |             |             |
|-----------------|----------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                 |          | 1                      | 2           | 3           | 4           | 5           |
| $d$             | мм       | 250                    | 300         | 100         | 200         | 125         |
| $\delta$        | мм       | 10                     | 10          | 5           | 6           | 5           |
| $\ell$          | м        | 1680                   | 950         | 1350        | 810         | 1500        |
| $v_0$           | м/с      | 0,95                   | 1,6         | 2           | 1,4         | 1,2         |
| $p_0$           | МПа      | 0,6                    | 0,5         | 0,52        | 0,35        | 0,6         |
| $p_1$           | МПа      | 0,8                    | 0,65        | 0,7         | 0,5         | 0,75        |
| Вид жидкости    |          | Вода                   | Керосин     | Диз. топл   | Бензин      | Вода        |
| Виды труб       |          | Чугун белый            | Сталь углер | Чугун черн. | Сталь углер | Чугун белый |

**Задача 89.** Определить толщину стенок трубопровода, чтобы напряжение в них от повышения давления при мгновенном закрытии затвора не превышало  $\sigma$ . Диаметр трубопровода  $d$ , скорость движения жидкости в нем до закрытия затвора  $v_0$ . Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно скоростью ударной волны в интервале 400...450 м/с для труб из полиэтилена и 900...1300 м/с для труб из других материалов. Исходные данные к задаче приведены в табл. 89

Таблица 89

| Исходные данные | Ед. изм. | Значения для вариантов |              |              |           |              |
|-----------------|----------|------------------------|--------------|--------------|-----------|--------------|
|                 |          | 1                      | 2            | 3            | 4         | 5            |
| $\sigma$        | МПа      | 14,7                   | 2,6          | 13,5         | 1,8       | 22,5         |
| $v_0$           | м/с      | 1,5                    | 0,85         | 1,1          | 0,75      | 1,3          |
| $d$             | мм       | 300                    | 60           | 80           | 60        | 250          |
| Вид жидкости    |          | Вода                   | Бензин       | Вода         | Керосин   | Вода         |
| Виды труб       |          | Чугун белый            | Алюм. вальц. | Сталь легир. | Поли-этил | Сталь углер. |

**Задача 90.** Трубопровод с размерами: диаметром  $d$ , толщиной стенок  $\delta$  и длиной  $\ell$  пропускает расход жидкости  $Q$  при давлении  $p_0$ . Определить, через сколько секунд при резком закрытии затвора ударное давление  $p_{\text{уд}}$  возле него будет наибольшим, а также величину этого давления. Затвор закрывается в течении времени  $t_{\text{закр}}$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 90

Таблица 90

| Исходные дан-<br>ные | Единицы изме-<br>рения | Значения для вариантов |         |                    |          |
|----------------------|------------------------|------------------------|---------|--------------------|----------|
|                      |                        | 1                      | 2       | 3                  | 4        |
| $d$                  | мм                     | 100                    | 125     | 80                 | 150      |
| $\delta$             | мм                     | 5                      | 4       | 3                  | 6        |
| $\ell$               | м                      | 350                    | 520     | 170                | 850      |
| $Q, 10^{-3}$         | м <sup>3</sup> /с      | 4,7                    | 9,8     | 9,0                | 56,5     |
| $p_o$                | МПа                    | 0,12                   | 0,15    | 0,14               | 0,45     |
| $t_{\text{закр}}$    | с                      | 1,0                    | 0,5     | 0,5                | 1,0      |
| Вид жидкости         |                        | Бензин                 | Керосин | Спирт              | Турбин30 |
| Виды труб            |                        | Сталь углеродистая     |         | Сталь легированная |          |

**Задача 91.** Жидкость поступает из бака в трубопровод, имеющий внутренний диаметр  $d$ , толщину стенки  $\delta$ , длину  $\ell$  и движется в нем равномерно, при этом расход равен  $Q$ , давление перед затвором, установленным на конце трубопровода,  $p_o$ .

Определить повышение давления и напряжение в стенке трубы перед затвором при резком закрытии последнего в течение времени  $t_{\text{закр}}$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 91.

Таблица 91

| Исходные<br>данные | Единицы<br>измерения | Значения для вариантов |      |               |      |
|--------------------|----------------------|------------------------|------|---------------|------|
|                    |                      | 1                      | 2    | 3             | 4    |
| $\ell$             | м                    | 700                    | 900  | 100           | 150  |
| $d$                | мм                   | 200                    | 300  | 60            | 80   |
| $\delta$           | мм                   | 8                      | 10   | 2,0           | 2,5  |
| $Q$                | л/с                  | 60                     | 120  | 6             | 12   |
| $p_o$              | МПа                  | 0,20                   | 0,20 | 0,15          | 0,14 |
| $t_{\text{закр}}$  | с                    | 1,1                    | 2,0  | 0,5           | 0,2  |
| Материал трубы     |                      | Чугун белый            |      | Сталь углер.. |      |
| Вид жидкости       |                      | Вода                   |      | Минер. масло  |      |

**Задача 92.** Определить ударноеи полное значение избыточного давления в трубопроводе при внезапном закрытии задвижки. Исходные данные к задаче приведены в табл. 92.

Таблица 92

| Исходные<br>данные | Единицы<br>измерения | Значения для вариантов |      |             |      |
|--------------------|----------------------|------------------------|------|-------------|------|
|                    |                      | 1                      | 2    | 3           | 4    |
| $\delta$           | мм                   | 7                      | 5    | 5,5         | 3    |
| $d$                | мм                   | 60                     | 100  | 125         | 80   |
| $v$                | м/с                  | 1,3                    | 1,6  | 1,9         | 1,4  |
| $p_o$              | МПа                  | 0,15                   | 0,25 | 1,5         | 0,14 |
| Вид жидкости       |                      | Вода                   |      | Керосин     |      |
| Материал трубы     |                      | Сталь легир.           |      | Чугун черн. |      |

**Задача 93.** Определить начальную скорость  $u_0$  движения жидкости в трубопроводе с задвижкой, в которой имеет место гидравлический удар. Установить также вид гидравлического удара. Исходные данные к задаче приведены в табл. 93.

Таблица 93

| Исходные данные   | Единицы измере-<br>ния | Значения для вариантов |      |        |      |
|-------------------|------------------------|------------------------|------|--------|------|
|                   |                        | 1                      | 2    | 3      | 4    |
| $\ell$            | м                      | 500                    | 700  | 450    | 500  |
| $d$               | мм                     | 125                    | 60   | 100    | 80   |
| $p_o$             | МПа                    | 0,12                   | 0,15 | 0,2    | 0,16 |
| $\sigma$          | МПа                    | 19                     | 18   | 24     | 20   |
| $\delta$          | мм                     | 5                      | 2    | 3      | 5,5  |
| $t_{\text{закр}}$ | с                      | 0,2                    | 0,1  | 0,5    | 0,8  |
| Вид жидкости      |                        | Глицерин               |      | Бензин |      |
| Виды труб         |                        | Полиэтилен             |      | Латунь |      |

**Задача 94.** Определить ударное повышение давления и напряжение в стенке трубы  $\sigma$  перед задвижкой при резком ее закрытии. Исходные данные к задаче приведены в табл. 94.

Таблица 94

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |             |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-----|-------------|------|
|                 |                   | 1                      | 2   | 3           | 4    |
| $d$             | мм                | 60                     | 80  | 150         | 100  |
| $Q, 10^{-3}$    | м <sup>3</sup> /с | 4.0                    | 6.0 | 12          | 10   |
| $\delta$        | мм                | 8                      | 4   | 4.5         | 5    |
| $p_0$           | МПа               | 0.13                   | 0.2 | 0.3         | 0.23 |
| Вид жидкости    |                   | Масло инд. 50          |     | Нефть       |      |
| Виды труб       |                   | Асбестоцем.            |     | Чугун белый |      |

**Задача 95.** Какой вид гидравлического удара будет происходить в трубопроводе, оснащенного задвижкой, при резком ее закрытии? Чему равно ударное повышение давления? Исходные данные к задаче приведены в табл. 95.

Таблица 95

| Исходные данные    | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |              |     |
|--------------------|-------------------|------------------------|------|--------------|-----|
|                    |                   | 1                      | 2    | 3            | 4   |
| $\ell$             | м                 | 5                      | 30   | 60           | 300 |
| $\delta$           | мм                | 10                     | 15   | 8            | 6   |
| $d$                | мм                | 60                     | 125  | 80           | 200 |
| $t_{\text{закр.}}$ | с                 | 0.2                    | 1.5  | 0.1          | 1.1 |
| $v_0$              | м/с               | 1.1                    | 1.14 | 2.4          | 1.9 |
| $p_0$              | МПа               | 0.12                   | 0.3  | 0.15         | 0.2 |
| Вид жидкости       |                   | Дизельное топливо      |      | Спирт        |     |
| Виды труб          |                   | Резина                 |      | Сталь легир. |     |

## ТЕМА 6. НАСОСНАЯ УСТАНОВКА И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКА. РАБОТА НАСОСА НА СЕТЬ

Характеристиками лопастного насоса называются графические зависимости напора, мощности и КПД насоса от его подачи при постоянной частоте вращения.

В Приложении 14 представлены рабочие характеристики отдельных центробежных консольных насосов общего назначения для воды. Характеристики получены опытным путем по данным испытания насосов на специальных стендах на заводах-изготовителях.

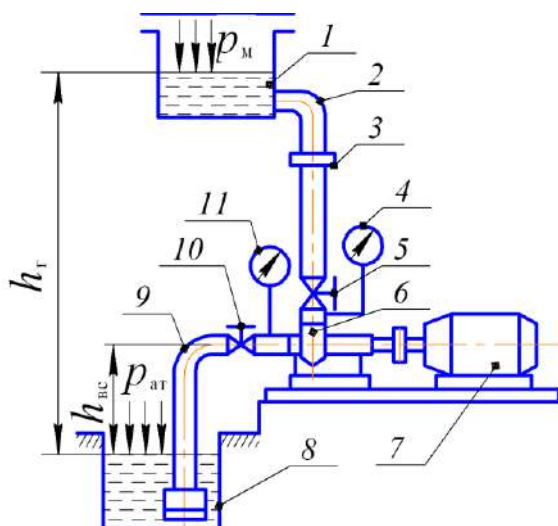


Рисунок 6.1 – Схема насосной установки

В реальных же условиях эксплуатации того или иного насоса его главные параметры определяются гидравлическими особенностями насосной установки, на которой он работает (рис. 6.1). При этом насос по своей характеристике должен соответствовать гидравлическому расчету трубопровода, в который нагнетается вода. Если расчет трубопровода и выбор центробежного насоса производятся без учета их совместной работы, то возможны случаи неудачных решений, когда насос не сможет обеспечивать необходимую подачу или напор.

С целью исключения этой ситуации расчет насосной установки ведут при условии установившегося режима



ее работы, когда расход в системе трубопроводов не изменяется со временем, то есть  $Q_H = Q_{тр}$ , (6.1)

а также развиваемый насосом напор равен потребному напору установки:

$$H_H = H_{потр}, \quad (6.2)$$

где  $Q_H, H_H$  – соответственно подача и напор насоса;

$Q_{тр}, H_{потр}$  – соответственно расход и потребный напор установки.

Потребный напор в общем случае равен

$$H_{потр} = h_{г} + h_{св} + \frac{p_M}{\rho g} + \Sigma h_{п}, \quad (6.3)$$

где  $h_{г}$  – геометрическая высота подъема, м;

$h_{св}$  – свободный напор, необходимый в конечном сечении трубопровода, регламентируемый строительными нормами и правилами, м;

$p_M$  – избыточное давление на свободной поверхности напорного резервуара.

Чаще всего свободная поверхность напорного резервуара сообщается с атмосферой и тогда третье слагаемое в формуле (6.3) равно нулю;

$\Sigma h_{п}$  – суммарные гидравлические потери по длине и местные сопротивления во всасывающем и напорном трубопроводах.

Обозначив в формуле (6.3)

$$H_{ст} = h_{г} + h_{св} + \frac{p_M}{\rho g}, \quad (6.4)$$

где  $H_{ст}$  – статический напор, м;

$$\Sigma h_{п} = K_c \cdot Q^2, \quad (6.5)$$

где  $K_c$  – суммарное сопротивление трубопроводов установки, зависящее как от геометрии (диаметров, длин), так и гидравлических коэффициентов трения и местных сопротивлений,  $с^2/м^5$ :

$$K_c = \frac{16}{\pi^2 2g} \left( \Sigma \lambda_i \frac{l_i}{d_i^5} + \Sigma \zeta_i \frac{1}{d_i^4} \right), \quad (6.6)$$

где  $l_i$  и  $d_i$  – длины и диаметры участков сети;

$\lambda_i$  и  $\zeta_i$  – соответственно коэффициенты трения по длине и местных сопротивлений,

то получим выражение потребного напора сети в форме:

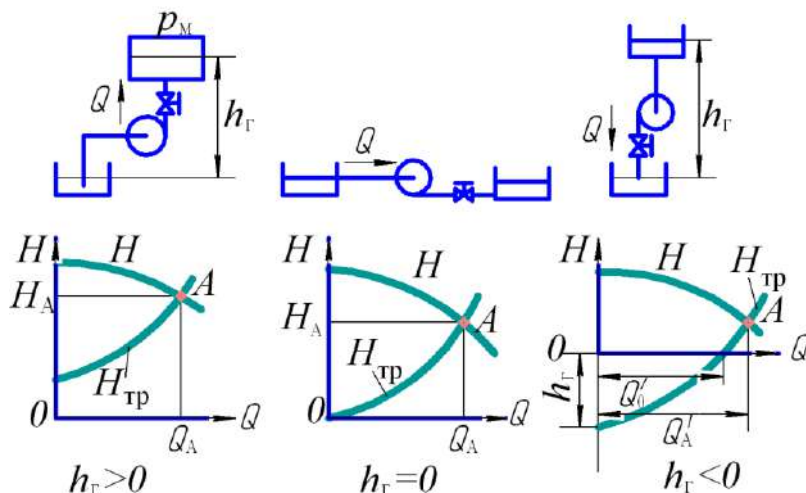
$$H_{потр} = H_{ст} + K_c \cdot Q^2, \quad (6.7)$$

называемое *характеристикой сети*, которая в поле координат  $Q$ - $H$  представляется параболой, при условии турбулентного режима.

Если характеристику сети совместить с главной характеристикой насоса  $H_H = f(Q_H)$ , то получим точку пересечения характеристик (точка  $A$ , рис. 6.2), называемую *рабочей точкой* насоса, соответствующей единственно возможному режиму его совместной работы с трубопроводом при заданных условиях. Возможны различные характеристики сети:  $h_{г} > 0$ ;  $h_{г} = 0$ , когда весь напор насоса расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений;  $h_{г} < 0$ , при этом пересечение характеристики сети с осью абсцисс дает значение  $Q_0$  – расход жидкости из верхнего резервуара в нижний самотеком.

При  $Q_A > Q_0$  подача жидкости должна обеспечиваться за счет энергии насоса.

Если параметры рабочей точки не будут соответствовать основным требованиям эксплуатации сети, то есть необходимому расходу и необходимому напору, то следует изменить режим работы установки способами, подробно рассмотренными в учебном пособии «Основы теории и особенности подбора насосов» [7].



$H$  – напор насоса;  $H_{тр}$  – потребный напор в трубопроводе;  
 $Q_0$  – расход жидкости самотеком;  $H_A$ ,  $Q_A$  – параметры рабочей точки  $A$

Рисунок 6.2 – Режимы работы насоса на сети при различном статическом напоре

Мощность на валу насоса  $N$ (Вт) определяют по параметрам рабочей точки:

$$N = \frac{\rho g H_A Q_A}{\eta_A}, \quad (6.8)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\eta_A$  – КПД насоса в рабочей точке.

Мощность приводного двигателя при условии непосредственного соединения его с насосом определяют из выражения:

$$N_{дв} = k \cdot N, \quad (6.9)$$

где  $k$  – коэффициент запаса, равный 1,2...1,25 для двигателей мощностью до 50 кВт и  $k = 1,1...1,15$  для мощности более 50 кВт.

### Указания к решению задач

Задачи данного раздела сводятся к определению параметров рабочей точки водонасосной установки, необходимых для определения мощности, потребляемой насосом по формуле (6.8).

Определение параметров рабочей точки выполняют графоаналитическим способом, то есть путем построения характеристики сети и напорной характеристики насоса на одном и том же графике в одинаковых масштабах.

Подробное изложение методики определения параметров рабочей точки при совместной работе нескольких насосов сети см. в учебном пособии [7].

### Пример 17

Центробежный насос откачивает воду из сборного колодца в резервуар с постоянным уровнем  $H = 12$  м по трубопроводам с размерами  $l_1 = 8$  м,  $d_1 = 100$  мм и  $l_2 = 16$  м,  $d_2 = 75$  мм (рис. 6.3).

1. На какой глубине  $h$  установится уровень воды в колодце, если приток в него  $Q = 8$  л/с, а частота вращения насоса  $n = 1450$  мин<sup>-1</sup>.

2. Вычислить мощность на валу насоса, принимая во внимание потери во всасывающей и напорной трубах.

При расчетах принять коэффициенты сопротивления трения  $\lambda_1 = 0,03$  и  $\lambda_2 = 0,035$ , а также суммарные коэффициенты местных сопротивлений в трубопроводах  $\zeta_1 = 6$  и  $\zeta_2 = 10$ .

Характеристики насоса при  $n = 1450$  мин<sup>-1</sup>:

|             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $Q_H$ , л/с | 0    | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   |
| $H_H$ , м   | 22,0 | 22,4 | 22,6 | 22,4 | 21,5 | 20,0 | 18,0 | 15,0 | 11,0 |
| $\eta$ , %  | 0    | 37   | 58   | 71   | 75   | 74   | 68   | 56   | 37   |

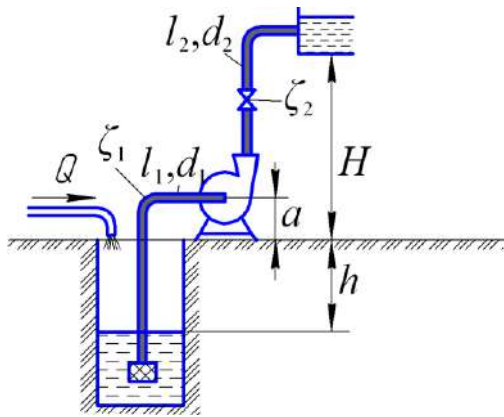


Рисунок 6.3 – К примеру 17

Дано:

$H = 12$  м;  $Q = 8$  л/с;  $l_1 = 8$  м;  $d_1 = 100$  мм;

$\lambda_1 = 0,03$ ;  $\zeta_1 = 6$ ;  $l_2 = 16$  м,  $d_2 = 75$  мм;

$\lambda_2 = 0,035$ ;  $\zeta_2 = 10$ .

Найти:

1.  $h$ .

2. Мощность на валу насоса  $N$ .

3. Мощность электродвигателя  $N_{дв}$ .

Решение

При установившемся режиме работы водонасосной установки приток в колодец  $Q$  и количество откачиваемой насосом воды

одинаковы. Следовательно, подача насоса известна и составляет  $Q_H = 8$  л/с.

Кроме того, известен потребный напор сети, так как он при установившемся режиме равен напору насоса, который согласно исходных данных при  $Q = 8$  л/с составляет 21,5 м.

С другой стороны, из расчетной схемы (рис. 6.3) имеем:

$$H_{\text{потр}} = h + H + \Sigma h_{\text{п}}, \quad (6.10)$$

где  $\Sigma h_{\text{п}}$  – суммарные потери напора во всасывающей и напорной линиях, складывающиеся согласно исходных данных из потерь напора на трение и местные сопротивления, определяемых по формуле (6.5):

$$\Sigma h_{\text{п}} = K_c \cdot Q^2,$$

где  $K_c$  – суммарное сопротивление сети, равное при турбулентном режиме в данном случае:

$$K_c = \frac{16}{\pi^2 2g} \left( \lambda_1 \frac{l_1}{d_1^5} + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2^5} + \zeta_1 \frac{1}{d_1^4} + \zeta_2 \frac{1}{d_2^4} \right)$$

$$K_c = \frac{16}{\pi^2 \cdot 2 \cdot 9,81} \left( 0,03 \frac{8}{0,1^5} + 0,035 \frac{16}{0,075^5} + 6 \frac{1}{0,1^4} + 10 \frac{1}{0,075^4} \right) =$$

$$= 52660,4 \text{ с}^2/\text{м}^5$$

$$\Sigma h_{\pi} = 52660,4 \cdot 0,008^2 = 3,4 \text{ м.}$$

Решаем выражение (6.10) относительно  $h$ :

$$h = H_{\text{потр}} - H - \Sigma h_{\pi}, \quad (6.11)$$

$$h = 21,5 - 12 - 3,4 = 6,1 \text{ м.}$$

Для определения параметров рабочей точки выполним расчет характеристики сети, задавшись рядом произвольных значений  $Q$ . Расчет характеристики сети сводим в таблицу.

Таблица 6.1 Характеристика сети

| $Q, \text{ л/с}$                               | 0    | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\Sigma h_{\pi} = K_c \cdot Q^2, \text{ м}$    | 0    | 0,2  | 0,8  | 1,9  | 3,4  | 5,3  | 7,6  | 10,3 |
| $H_{\text{потр}} = h + H + h_{\pi}, \text{ м}$ | 18,1 | 18,3 | 18,9 | 20,0 | 21,5 | 23,4 | 25,7 | 28,4 |

После этого на одном и том же графике строим в одинаковом масштабе в координатах  $Q$ - $H$  характеристику насоса  $H_{\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$  и характеристику установки  $H_{\text{потр}} = f(Q)$ .

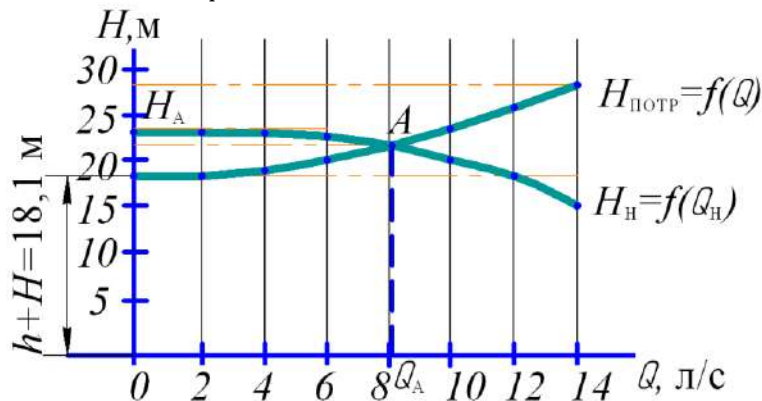


Рисунок 6.4 – Графическое определение параметров рабочей точки насоса

В результате пересечения характеристик получены параметры рабочей точки  $A$ , в том числе:

- подача насоса  $Q_A = 8,1 \text{ л/с}$ ;
- напор  $H_A = 21,5 \text{ м}$ .

С учетом полученных данных вычисляем мощность на валу насоса  $N$ , кВт:

$$N = \frac{\rho g H_A \cdot Q_A}{1000 \cdot \eta_A},$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$\eta_A$  – КПД насоса в рабочей точке,  $\eta_A = 0,75$ .

$$N = \frac{10^3 \cdot 9,81 \cdot 21,5 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 0,75} = 2,3 \text{ кВт.}$$

Соответственно мощность электродвигателя равна:  $N_{\text{дв}} = k \cdot N$ ,

где  $k = 1,25$  – коэффициент запаса  $N_{\text{дв}} = 1,25 \cdot 2,3 = 2,85 \text{ кВт}$ .

Ответ:  $h = 6,1 \text{ м}$ ;  $N = 2,3 \text{ кВт}$ ;  $N_{\text{дв}} = 2,85 \text{ кВт}$

**Задача 96** (рис.6.5). Вода при температуре  $t$  нагнетается насосом из колодца в водонапорную башню по вертикальному трубопроводу переменного сечения. До крана на первом участке диаметр нагнетательного трубопровода  $d_1$ , после крана на втором участке  $d_2$ .

Глубина установки насоса в колодце относительно основания башни  $H_0$ ; высота башни  $H$ ; высота уровня воды в баке  $h$ ; длина участка трубопровода от насоса до крана  $h_0$ ; его диаметр  $d_1$ ; коэффициент сопротивления крана  $\zeta_{кр}$  отнесен к диаметру  $d_1$ ; показание манометра  $p_m$ ; подача насоса  $Q_n$ . Требуется:

1. Определить диаметр нагнетательного трубопровода на 2-ом участке  $d_2$ .
2. Выбрать центробежный насос и построить его характеристики:  $H_n=f(Q_n)$  и  $\eta=f(Q)$ .
3. Рассчитать характеристику нагнетательного трубопровода  $H_{потр}=f(Q)$  и построить её на том же графике, что и характеристику насоса.
4. Определить параметры режимной точки.
5. Определить мощность на валу насоса по параметрам режимной точки.
6. Определить мощность приводного двигателя. Исходные данные к задаче приведены в табл. 96. Задачу решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно значениями  $d_2$  в диапазоне, который указан в табл. 96.

Таблица 96

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |          |           |           |         |         |
|-----------------|-------------------|------------------------|----------|-----------|-----------|---------|---------|
|                 |                   | 1                      | 2        | 3         | 4         | 5       | 6       |
| $Q$             | л/с               | 6                      | 15       | 40        | 30        | 5       | 10      |
| $p_m$           | кПа               | 250                    | 190      | 140       | 165       | 180     | 225     |
| $H_0$           | м                 | 5                      | 6        | 5,5       | 5         | 6       | 5,7     |
| $H$             | м                 | 15                     | 10       | 8         | 10        | 8       | 13      |
| $h$             | м                 | 1                      | 1,75     | 2         | 1,4       | 2,2     | 1,9     |
| $h_0$           | м                 | 3                      | 3,5      | 2,75      | 2,9       | 3,8     | 3,2     |
| $d_1$           | мм                | 80                     | 100      | 200       | 125       | 75      | 75      |
| $\zeta_{кр}$    |                   | 3                      | 5        | 4,5       | 1,5       | 5,7     | 3,5     |
| $t$             | °C                | 15                     | 20       | 5         | 8         | 12      | 9       |
| $d_2$           | мм                | 40...70                | 70... 90 | 150...190 | 90... 120 | 40...60 | 50...80 |
| Виды труб       |                   | M1                     | M4       | M2        | M3A       | Hm2     | M2      |

**Задача 97** (рис.6.6). Из резервуара А животноводческого помещения сточные воды перекачиваются центробежным насосом по трубопроводу в общий резервуар-накопитель В, где сточные воды проходят биологическую очистку. Перепад горизонтов в резервуарах А и В составляет  $\Delta Z$ . При условии, что заданы длины и диаметры всасывающей и нагнетательной магистралей, расход сети  $Q$  и другие данные требуется:

1. Выбрать типоразмер насосного агрегата и установить режим его работы на сети.
2. Вычислить мощность на валу насоса и приводного двигателя.
3. Начертить схему параллельного подключения второго насоса на общий нагнетательный трубопровод и графическим способом определить, как изменится при этом расход сети. Местными потерями в нагнетательной магистрали пренебречь. Исходные данные к задаче приведены в табл. 97.

Таблица 97

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |     |      |     |
|---------------------|-------------------|------------------------|-----|------|-----|------|-----|
|                     |                   | 1                      | 2   | 3    | 4   | 5    | 6   |
| $Q$                 | л/с               | 30                     | 12  | 8    | 25  | 20   | 30  |
| $\Delta Z = -H_{г}$ | м                 | 1,5                    | 2,0 | 1,75 | 2,5 | 1,25 | 1,0 |
| $\ell_n$            | м                 | 130                    | 700 | 1095 | 950 | 1060 | 420 |
| $d_n$               | мм                | 100                    | 100 | 100  | 150 | 125  | 150 |
| $\ell_B$            | м                 | 8                      | 10  | 9    | 6,9 | 7,5  | 9   |
| $d_B$               | мм                | 150                    | 125 | 125  | 175 | 150  | 200 |
| $\sum \zeta_{вс}$   |                   | 5                      | 6,5 | 4,0  | 7,0 | 5,5  | 6   |
| $\lambda, 10^{-2}$  |                   | 4,29                   | 3,5 | 3,7  | 4,1 | 2,9  | 3,2 |
| Виды труб           |                   | M5A                    | M5Б | M3Б  | M3A | Hm1  | M5Б |

**Задача 98** (рис.6.7). Центробежный насос перекачивает воду из поверхностного водоисточника *A* в закрытый бак *B* водонапорной башни, поднимая её при этом на геометрическую высоту  $H_{\Gamma}$ . В баке поддерживается постоянный уровень воды и давления на свободной поверхности  $p_m$ . По условию задачи заданы длины и диаметры всасывающего и нагнетательного участков сети. Местные потери напора во всасывающей линии принять в размере 100%, а в напорной 10% от потерь на трение. Температура воды в водоисточнике  $t^{\circ}\text{C}$ . Требуется:

1. Выбрать типоразмер насосного агрегата, представить его рабочие характеристики и графическим способом определить режим работы насоса на сети.
2. Вычислить мощность на валу насоса и приводного двигателя.
3. Определить потребный напор, расходуемый в сети, при условии уменьшения подачи насоса методом дросселирования на 20%.

Коэффициент кинематической вязкости воды в зависимости от её температуры см. в Приложении 4; относительную шероховатость стенок всасывающей трубы в зависимости от материала см. в Приложении 5.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 98.

Таблица 98

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значения для вариантов |     |               |     |     |     |
|-----------------|--------------------|------------------------|-----|---------------|-----|-----|-----|
|                 |                    | 1                      | 2   | 3             | 4   | 5   | 6   |
| $Q$             | л/с                | 30                     | 15  | 50            | 40  | 50  | 12  |
| $p_m$           | кПа                | 150                    | 350 | 200           | 150 | 60  | 250 |
| $H_{\Gamma}$    | м                  | 15                     | 10  | 8             | 8   | 20  | 25  |
| $\ell_n$        | м                  | 400                    | 475 | 450           | 105 | 50  | 160 |
| $d_n$           | мм                 | 200                    | 150 | 200           | 150 | 150 | 100 |
| $\ell_b$        | м                  | 13                     | 12  | 10            | 9   | 8   | 6   |
| $d_b$           | мм                 | 200                    | 150 | 250           | 200 | 200 | 125 |
| $t$             | $^{\circ}\text{C}$ | 20                     | 15  | 12            | 10  | 16  | 17  |
| Виды труб       |                    | МЗБ                    | М1  | Нм1, кл. Вт12 | М2  | М5Б | М5А |

**Задача 99** (рис.6.8). Питательный раствор для подкормки растений подается из резервуара *A* центробежным насосом по нагнетательному трубопроводу в стеллажи гидропонной теплицы *D*. С целью перемешивания раствора в резервуаре *A* нагнетательная магистраль имеет в узловой точке *C* ответвление, по которому часть раствора  $Q/4$  отводится обратно в резервуар *A* по трубе *CE*, длина которой и диаметр указаны на расчетной схеме и табл. исходных данных.

Подача питательного раствора в стеллаж *D* составляет  $3/4 Q$ . Всасывающая труба имеет длину  $\ell_b$ , диаметр  $d_b$ , коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ . Требуется:

1. Найти дополнительное сопротивление  $\zeta_{\text{кр}}$ , которое нужно задействовать на участке *CE*, чтобы обеспечить распределение  $Q$  на участках *CD* и *CE* в пропорции, указанной на расчетной схеме.
2. Выбрать типоразмер насосного агрегата для работы на сети, представить его рабочие характеристики и графоаналитическим способом определить режим работы насоса.
3. Вычислить мощность на валу насоса и приводного двигателя.
4. По какой схеме необходимо присоединить второй насос с целью увеличения напора? Начертить схему совместной работы насосов при их работе на один нагнетательный трубопровод.

Местные потери напора во всасывающей линии принять за 100% от потерь по длине. Местные потери напора в нагнетательной магистрали принять равными  $k\%$  от потерь по длине. Исходные данные к задаче приведены в табл. 99.

Таблица 99

| Исходные данные    | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |        |        |     |     |
|--------------------|-------------------|------------------------|-----|--------|--------|-----|-----|
|                    |                   | 1                      | 2   | 3      | 4      | 5   | 6   |
| $Q$                | л/с               | 6                      | 8,6 | 15     | 24     | 25  | 7   |
| $H_{ГД}$           | м                 | 5                      | 7   | 15     | 7      | 6   | 8   |
| $-H_{ГЕ}$          | м                 | 0,5                    | 0,6 | 0,55   | 0,5    | 0,9 | 0,8 |
| $\ell_B$           | м                 | 10                     | 9   | 7,5    | 12     | 8   | 6   |
| $d_B$              | мм                | 100                    | 125 | 150    | 200    | 150 | 110 |
| $\ell$             | м                 | 605                    | 654 | 440    | 2650   | 390 | 370 |
| $d_H$              | мм                | 80                     | 100 | 125    | 200    | 150 | 90  |
| $\lambda, 10^{-2}$ |                   | 3,5                    | 4,1 | 3,1    | 3,7    | 3,8 | 3,6 |
| $k$                | %                 | 5                      | 7   | 9      | 11     | 15  | 14  |
| Виды труб          |                   | M1                     | M2  | Hm1BT3 | Hm1BT9 | M3Б | Hm2 |

**Задача 100** (рис.6.9). Насосная станция перекачивает воду в количестве  $Q$  по горизонтальному трубопроводу длиной  $\ell$  и диаметром  $d$  из подземного водоисточника в водонапорную башню. Требуется:

1. Подобрать насос для работы насосной станции.
  2. Определить мощность на валу насоса, учитывая только потери напора на трение.
  3. Указать, где и какой мощности надо установить станцию подкачки, чтобы по тому же трубопроводу пропускать увеличенный расход  $Q_1$  и обеспечивая по всей длине трубопровода свободный напор  $h_{св}$ . Считать, что при увеличении расхода напор насосной станции в соответствии с характеристикой насоса уменьшится на  $b\%$ .
  4. Для обоих значений  $Q$  построить пьезометрические линии.
- Исходные данные к задаче приведены в табл. 100.

Таблица 100

| Исходные данные   | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                   |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $Q$               | л/с               | 12                     | 18   | 19   | 10   | 24   | 30   |
| $Q_1$             | л/с               | 18                     | 27   | 28,5 | 15   | 36   | 45   |
| $\ell$            | м                 | 600                    | 1825 | 1175 | 1150 | 1375 | 620  |
| $d$               | мм                | 80                     | 100  | 125  | 100  | 125  | 150  |
| $\nabla Z_{\max}$ | м                 | 20                     | 25   | 15   | 18   | 21   | 18   |
| $\nabla Z_{\min}$ | м                 | 5                      | 5    | 5    | 6    | 5    | 6    |
| $b$               | %                 | 20                     | 17   | 13,6 | 10,7 | 32   | 13,5 |
| $h_{св}$          | м                 | 5                      | 6    | 7    | 4    | 10   | 8    |
| Виды труб         |                   | M2                     | M3A  | M4   | M5A  | Hm1  | M1   |

**Задача 101** (рис.6.10). Центробежный насос, расположенный на уровне с отметкой  $\nabla_B$  перекачивает воду из открытого резервуара с уровнем  $\nabla_A$  в закрытый резервуар с уровнем  $\nabla_C$  избыточным давлением на свободной поверхности, равном  $p_0$ . Требуется:

1. Выбрать типоразмер насосного агрегата для работы водонасосной установки.
2. Графоаналитическим способом установить параметры режимной точки выбранного насоса.
3. Вычислить мощность на валу насоса и приводного двигателя.
4. Как изменится подача, напор и мощность насоса, если частоту вращения рабочего колеса изменить с  $n$  до  $n_1$ ?

При определении потребного напора системы местные потери напора в нагнетательной магистрали не учитывать, а во всасывающей – принять во внимание наличие обратного клапана с сеткой  $\zeta_{ок}$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 101.

Таблица 101

| Исходные данные    | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|--------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                    |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $V_A$              | м                 | 2                      | 1,5  | 8,5  | 2    | 8    | 1    |
| $V_B$              | м                 | 4                      | 5,1  | 10,1 | 12   | 8,2  | 2    |
| $V_C$              | м                 | 8                      | 17,5 | 24   | 20   | 13   | 10   |
| $p_M$              | кПа               | 215                    | 275  | 295  | 260  | 175  | 162  |
| $p_0$              | кПа               | 120                    | 110  | 125  | 115  | 95   | 20   |
| $\ell_B$           | м                 | 8                      | 5    | 10   | 12   | 7    | 9    |
| $d_B$              | мм                | 100                    | 90   | 175  | 150  | 150  | 100  |
| $\ell_H$           | м                 | 60                     | 60   | 40   | 100  | 100  | 70   |
| $d_H$              | мм                | 80                     | 80   | 125  | 125  | 125  | 90   |
| $\lambda, 10^{-2}$ |                   | 2,5                    | 3    | 2,7  | 2,2  | 2    | 2,4  |
| $\zeta_{ок}$       |                   | 4,5                    | 5    | 4    | 5    | 4,5  | 5    |
| $n$                | мин <sup>-1</sup> | 2900                   | 2900 | 2900 | 1450 | 1450 | 2900 |
| $n_1$              | мин <sup>-1</sup> | 2420                   | 2420 | 2520 | 1670 | 2175 | 2500 |
| Виды труб          |                   | M2                     | M1   | M3Б  | M3Б  | Hm1  | Hm2  |

**Задача 102** (рис.6.11). Центробежный насос подает воду одновременно в два резервуара  $E$  и  $D$ , служащих для накопления воды. Резервуары  $E$  и  $D$  находятся на разных высотах относительно свободной поверхности водоисточника, соответственно  $H_{ГЕ}$  и  $H_{ГД}$ . Участки нагнетательного трубопровода  $CD$  и  $CE$  имеют одинаковые длины и диаметры.

1. Определить величину дополнительного сопротивления  $\zeta_{кр}$ , которое необходимо задействовать на участке  $CD$ , с целью обеспечения равенства объемов воды, поступающей в резервуары  $D$  и  $E$ .
2. Выбрать типоразмер насоса.
3. Построить суммарную характеристику потребного напора для сложного трубопровода.
4. Установить параметры режимной точки выбранного насоса, построив на одном и том же графике в одинаковых масштабах напорную характеристику насоса и нагнетательного трубопровода.
5. Местные потери напора во всасывающей трубе принять за 100% от потерь по длине.

Местные потери напора в нагнетательной магистрали принять равными  $k\%$  от потерь по длине. Исходные данные к задаче приведены в табл. 102.

Таблица 102

| Исходные данные    | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |           |              |     |
|--------------------|-------------------|------------------------|------|------|-----------|--------------|-----|
|                    |                   | 1                      | 2    | 3    | 4         | 5            | 6   |
| $Q$                | л/с               | 9,4                    | 30,6 | 10,2 | 5,5       | 47,2         | 72  |
| $H_{ГД}$           | м                 | 13,5                   | 2    | 4    | 5         | 7            | 3   |
| $H_{ГЕ}$           | м                 | 18                     | 5    | 5,5  | 8         | 10           | 7   |
| $\ell_B$           | м                 | 10                     | 9    | 13   | 6         | 14           | 12  |
| $d_B$              | мм                | 100                    | 200  | 125  | 90        | 250          | 300 |
| $\ell$             | м                 | 44                     | 42   | 38   | 45        | 110          | 45  |
| $d_H$              | мм                | 100                    | 150  | 100  | 90        | 250          | 250 |
| $\lambda, 10^{-2}$ |                   | 4,1                    | 3,4  | 3,88 | 4,6       | 3,7          | 3,9 |
| $k$                | %                 | 5                      | 7    | 9    | 5         | 6            | 15  |
| Виды труб          |                   | M1                     | M2   | M4   | Hm2 Тип Т | Hm1, кл Вт12 | M5Б |

**Задача 103** (рис. 6.12,а). Насос подает воду в накопительный резервуар на высоту  $H_{Г}$ . Всасывающий трубопровод имеет длину  $\ell_{вн}$  и диаметр  $d_{вн}$ , напорный трубопровод соответственно  $\ell_{н}$  и  $d_{н}$ . Суммарные коэффициенты местных сопротивлений во всасывающем и нагнетательном трубопроводах соответственно равны  $\zeta_{вс}$  и  $\zeta_{н}$ . Коэффициент сопротивления трения во всасывающем трубопроводе  $\lambda$  (рис. 6.12,а). Требуется:

1. Выбрать типоразмер насосного агрегата, обеспечивающего подачу воды  $Q$ .
2. Графоаналитическим способом установить режим работы выбранного насоса.
3. Определить мощность на валу насоса по параметрам режимной точки и приводного двигателя.



4. Определить графоаналитическим способом параметры режимной точки, если два одинаковых насоса будут работать параллельно на общий нагнетательный трубопровод с теми же данными. Начертить схему подключения насосов. Исходные данные к задаче приведены в табл. 103.

Таблица 103

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |      |              |      |
|---------------------|-------------------|------------------------|-----|------|------|--------------|------|
|                     |                   | 1                      | 2   | 3    | 4    | 5            | 6    |
| $Q$                 | л/с               | 4,8                    | 5,5 | 9    | 5    | 8,5          | 5,7  |
| $H_{\Gamma}$        | м                 | 15                     | 8   | 12   | 10   | 16           | 9    |
| $\ell_{\text{H}}$   | м                 | 750                    | 725 | 710  | 1200 | 880          | 560  |
| $d_{\text{H}}$      | мм                | 75                     | 80  | 100  | 80   | 100          | 80   |
| $\ell_{\text{B}}$   | м                 | 8                      | 10  | 15   | 12   | 7,5          | 9    |
| $d_{\text{B}}$      | мм                | 80                     | 80  | 125  | 90   | 100          | 100  |
| $\lambda, 10^{-2}$  |                   | 4,4                    | 4,4 | 3,88 | 4,3  | 3,8          | 4,1  |
| $\zeta_{\text{BC}}$ |                   | 10,5                   | 9,8 | 11,3 | 10,9 | 9,5          | 10   |
| $\zeta_{\text{H}}$  |                   | 1,2                    | 1   | 1,4  | 1,3  | 1,05         | 1,35 |
| Виды труб           |                   | M2                     | M4  | M5B  | M1   | Hm1, кл. ВтЗ | M2   |

**Задача 104** (рис. 6.12,б). Центробежный насос поднимает воду на высоту  $H_{\Gamma}$  по всасывающей и нагнетательной магистралям. Размеры магистралей, в том числе диаметры и длины указаны в таблице исходных данных. Требуется:

1. Определить подачу насоса  $Q_{\text{H}}$  и мощность на валу  $N$  при частоте вращения рабочего колеса  $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ .
2. Определить мощность, потребляемую насосом, при уменьшении его подачи на 25% дросселированием задвижкой.
3. Пересчитать главные параметры насоса: подачу, напор и мощность при изменении частоты вращения рабочего колеса с  $n$  до  $n_1$  по формулам подобия.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 104.

Задачу следует решить методом последовательного приближения, задавшись ориентировочно  $Q$  из графика характеристики насоса, приведенной на рис. 6.12,б. Задача считается решенной, если при ориентировочном значении  $Q$ , напор насоса  $H_{\text{H}}$  (график) и потребный напор  $H_{\text{потр}}$  сети (расчет) будут равны между собой или расхождение между ними будет не более 10%.

Таблица 104

| Исходные данные    | Единицы измерения | Значения для вариантов |     |      |     |            |     |
|--------------------|-------------------|------------------------|-----|------|-----|------------|-----|
|                    |                   | 1                      | 2   | 3    | 4   | 5          | 6   |
| $H_{\Gamma}$       | м                 | 6                      | 2   | 10   | 9,4 | 3,5        | 2,4 |
| $\ell_{\text{B}}$  | м                 | 20                     | 10  | 12   | 15  | 16         | 11  |
| $d_{\text{B}}$     | мм                | 200                    | 150 | 150  | 200 | 200        | 150 |
| $\ell_{\text{H}}$  | м                 | 100                    | 135 | 80   | 75  | 80         | 100 |
| $d_{\text{H}}$     | мм                | 150                    | 125 | 125  | 150 | 180        | 125 |
| $\lambda, 10^{-2}$ |                   | 2,0                    | 2,5 | 1,8  | 4,3 | 1,8        | 3,2 |
| $n_1$              | $\text{мин}^{-1}$ | 1350                   | 760 | 1420 | 750 | 1350       | 750 |
| Виды труб          |                   | M4                     | M1A | M3A  | Hm1 | Hm2, тип Т | M2  |

**Задача 105** (рис. 6.13). Вода подается насосом из водоема в приемный резервуар на высоту  $h$ . Всасывающая труба снабжена обратным клапаном с сеткой и имеет длину  $\ell_{\text{BC}}$ . Требуется:

1. Подобрать диаметры трубопроводов обоих участков сети водонасосной установки.
2. Выбрать типоразмер центробежного насоса и построить его характеристики  $H = f_1(Q)$  и  $\eta = f_2(Q)$  по справочным данным (Приложение 14).
3. Графоаналитическим способом установить параметры режимной точки выбранного насоса.
4. Определить мощность на валу насоса по параметрам режимной точки.
5. Определить мощность приводного двигателя.

Местные потери напора в нагнетательном трубопроводе принять равными 10% от потерь на трение. Диаметры труб системы подобрать, руководствуясь Приложениями 8;9,10, а также оптимальными значениями скоростей: во всасывающей трубе 0,7...1,1 м/с; в нагнетательном трубопроводе в зависимости от материала труб по данным раздела 4 табл. 4.1. Диаметр всасывающей трубы водонасосной установки, согласно практики их эксплуатации, принять несколько большим по сравнению с диаметром нагнетательного трубопровода или равным ему. Исходные данные к задаче приведены в табл. 105.

Таблица 105

| Исходные данные    | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |     |      |
|--------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|-----|------|
|                    |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    |
| $Q$                | л/с               | 16,5                   | 47,5 | 28,5 | 50   | 40  | 25   |
| $h$                | м                 | 45                     | 23   | 12   | 17   | 30  | 50   |
| $\ell_{\text{вс}}$ | м                 | 10                     | 8    | 12   | 10   | 15  | 14   |
| $\ell_{\text{н}}$  | м                 | 95                     | 120  | 130  | 100  | 140 | 150  |
| $\lambda, 10^{-2}$ |                   | 2,1                    | 1,8  | 1,9  | 1,82 | 2   | 1,88 |
| Виды труб          |                   | М1                     | НМ2  | М4   | НМ3  | М2  | М5А  |

Рисунки 6.5...6.13 к задачам темы 6

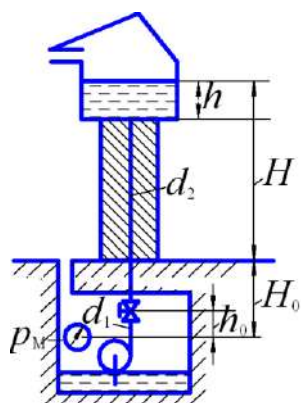


Рисунок 6.5

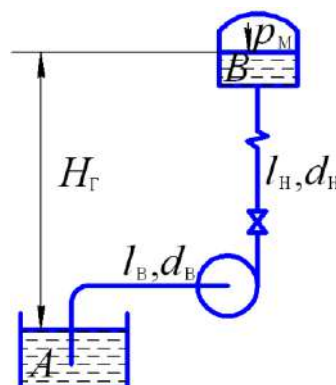


Рисунок 6.7

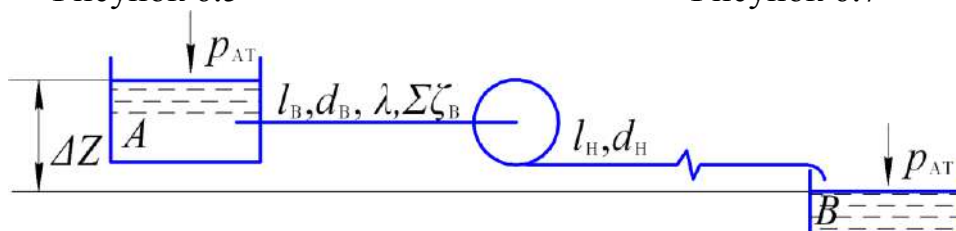


Рисунок 6.6

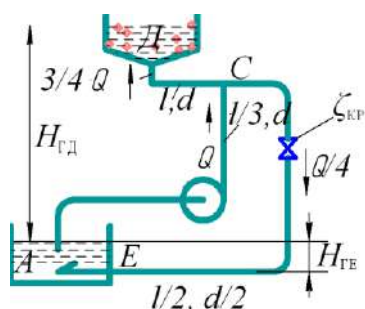


Рисунок 6.8

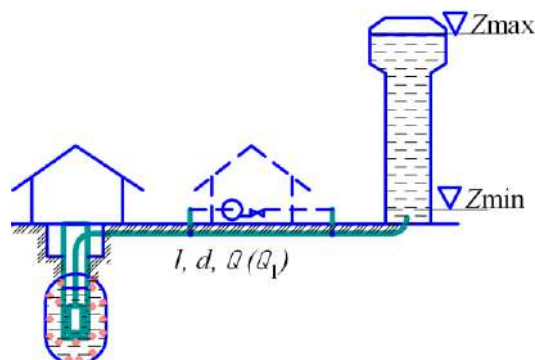


Рисунок 6.9

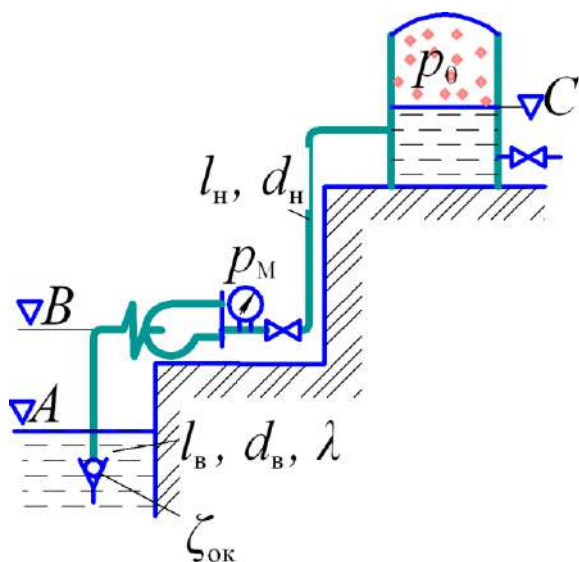


Рисунок 6.10

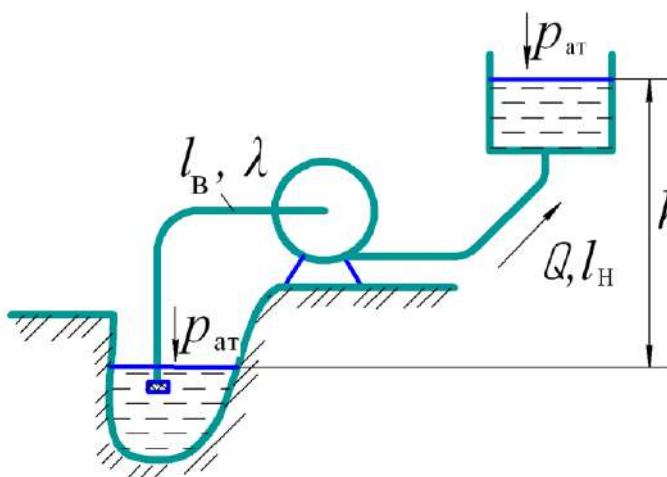


Рисунок 6.13

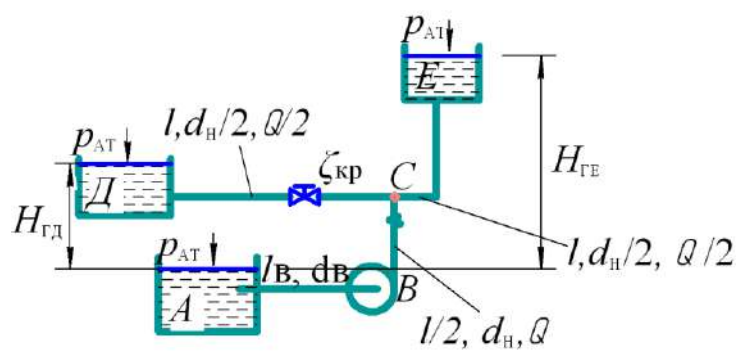


Рисунок 6.11

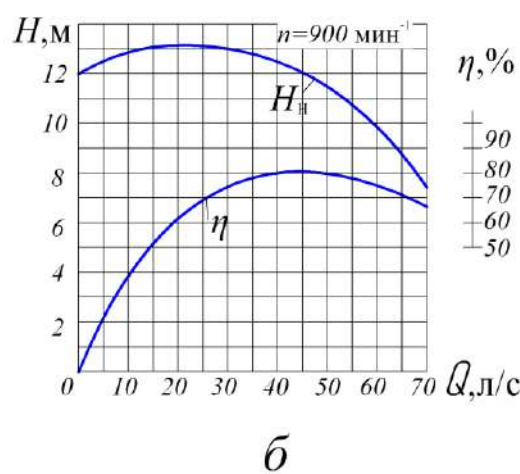
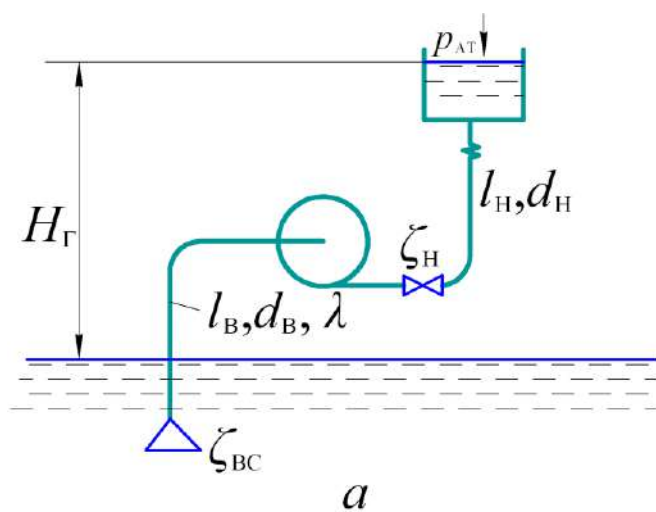


Рисунок 6.12

## ТЕМА 7. РАСЧЕТ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА

*Объемным гидроприводом* называют совокупность объемных гидромашин, гидроаппаратуры, гидролиний (трубопроводов) и вспомогательных устройств, **п р е д н а з н а ч е н н ы х** для передачи энергии и преобразования движения посредством жидкости.

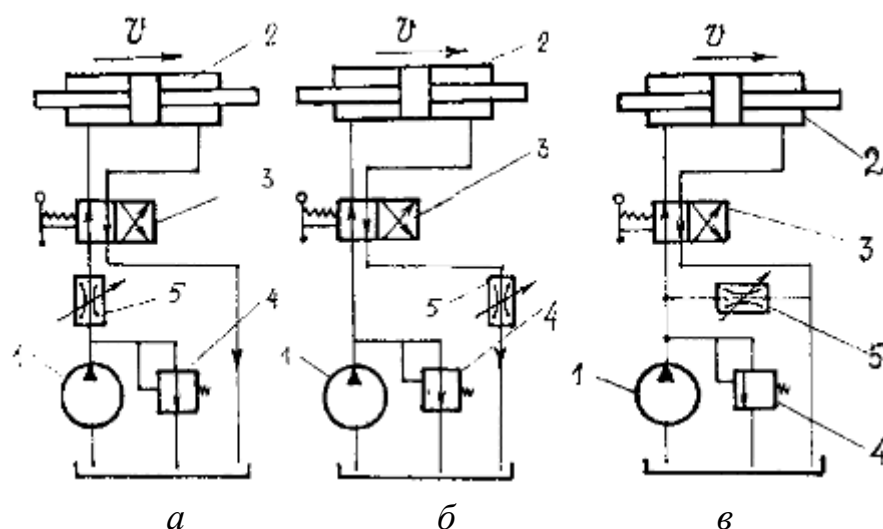
К числу гидромашин относятся насосы и гидродвигатели, которых может быть несколько. Гидроаппаратура – это устройства управления гидроприводом, при помощи которых он регулируется, а также средства защиты его от чрезмерно высоких и низких давлений жидкости. К гидроаппаратуре относятся дроссели, клапаны различного назначения и гидрораспределители – устройства для изменения направления потока жидкости. Вспомогательными устройствами служат так называемые кондиционеры рабочей жидкости, обеспечивающие ее качество и состояние: различные отделители твердых частиц, в том числе фильтры, теплообменники (нагреватели и охладители жидкости), гидробаки, а также гидроаккумуляторы. Перечисленные элементы связаны между собой гидролиниями, по которым движется рабочая жидкость.

Принцип действия объемного гидропривода основан на малой сжимаемости капельных жидкостей и передаче давления в них по закону Паскаля.

Силовой частью объемного гидропривода является *гидропередача*, состоящая из насоса, гидродвигателя (одного или нескольких) и связывающих их гидролиний.

Основные признаки классификации гидроприводов:

- по характеру движения выходного звена – *поступательного движения* – с возвратно-поступательным движением выходного звена и с гидродвигателями в виде гидроцилиндров; *поворотного движения* – с возвратно-поворотным движением выходного звена на угол менее  $360^\circ$  и с поворотными гидродвигателями; *вращательного движения* – с вращательным движением выходного звена и с гидродвигателями в виде гидромоторов;
- по способу управления гидроприводом: *машинный* и *дроссельный*. При этом способе возможны два варианта включения дросселя:
  - последовательно с гидродвигателем (рис. 7.1, а, б);
  - параллельно гидродвигателю (рис. 7.1, в).



*a, б* – последовательное включение дросселя с гидродвигателем, соответственно на выходе и входе; *в* – схема с параллельно включенным дросселем  
 1 – насос; 2 – гидродвигатель; 3 – распределитель; 4 – клапан предохранительный;  
 5 – дроссель

Рисунок 7.1 – Принципиальные схемы объемного гидропривода с дроссельным регулированием

Расшифровка условных символов гидравлических элементов объемного гидропривода, использованных в схемах рис. 7.1, представлена в Приложении 12.

Для гидропривода поступательного движения с *последовательным включением дросселя* скорость выходного звена определяется уравнением:

$$v = \mu \frac{S_{\text{др}}}{S_{\text{п}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\text{н}} - F/S_{\text{п}})}, \quad (7.1)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода через дроссель;  
 $S_{\text{др}}$  – площадь проходного сечения дросселя,  $\text{м}^2$ ;  
 $S_{\text{п}}$  – площадь поршня со стороны нагнетания,  $\text{м}^2$ ;  
 $F$  – нагрузка на выходном звене, Н;  
 $\rho$  – плотность рабочей жидкости (РЖ),  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $p_{\text{н}}$  – давление на выходе из насоса, Па.

При *параллельном включении дросселя*:

$$v = \frac{1}{S_{\text{п}}} \left( Q_{\text{н}} - \mu S_{\text{др}} \sqrt{\frac{2 F}{\rho S_{\text{п}}}} \right), \quad (7.2)$$

где  $Q_{\text{н}}$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Машинное (объемное) управление осуществляется за счет изменения рабочего объема насоса (рис. 7.2, а) или гидродвигателя (рис. 7.2, б) либо того и другого вместе (рис. 7.2, в).

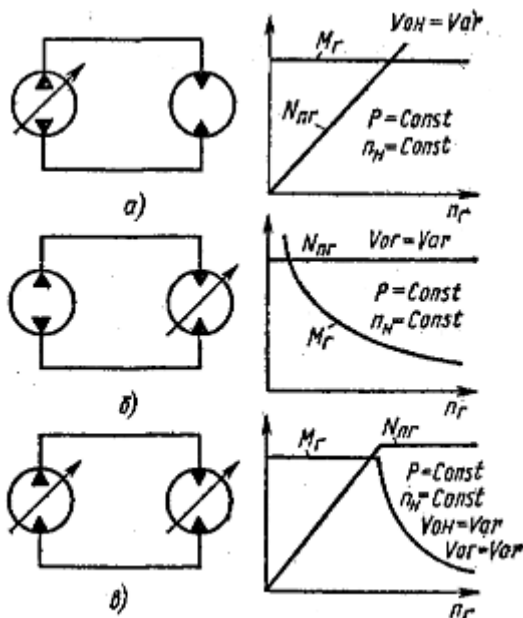
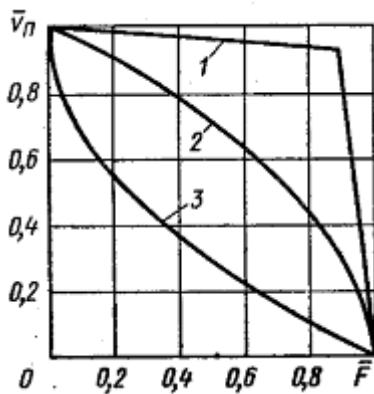


Рисунок 7.2 – Варианты объемного регулирования гидропривода

При выборе способов регулирования гидропривода следует обращать внимание на следующие три показателя:

- нагрузочные характеристики;
- коэффициент полезного действия (КПД);
- стоимость применяемых гидромашин и аппаратуры.

На рис. 7.3 показаны нагрузочные кривые, то есть зависимости скорости  $\bar{v}_n$  выходного звена от нагрузки  $\bar{F}$  на нем, при различных способах регулирования.



1 – объемный способ регулирования; 2 – дроссельный с последовательным включением дросселя; 3 – дроссельный с параллельным включением дросселя;

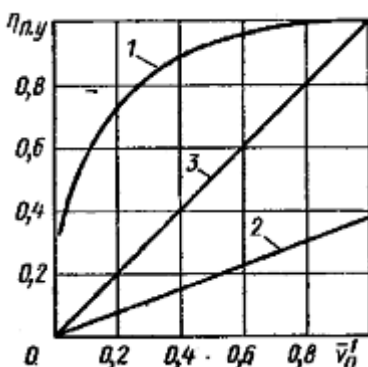
$\bar{v}_n = v_n / v_{\max}$  – относительная скорость выходного звена привода;

$\bar{F} = F / F_{\max}$  – относительная нагрузка

Рисунок 7.3 – Сравнение гидроприводов по нагрузочным характеристикам

Наибольшей стабильностью обладает гидропривод с объемным регулированием (кривая 1, рис. 7.3). Значительно хуже – дроссельное регулирование с последовательным включением дросселя (кривая 2, рис. 7.3) и еще хуже дроссельное регулирование с параллельным включением дросселя (кривая 3, рис. 7.3).

Сравнение способов регулирования по КПД процесса управления  $\eta_{п.у.}$  представлено на рис. 7.4.



1 – объемный способ регулирования; 2 – дроссельный с последовательным включением дросселя;

3 – дроссельный с параллельным включением дросселя;

$\bar{v}_n = v_n / v_{\max}$  – относительная скорость выходного звена;  $\eta_{п.у.}$  – КПД процесса управления, равный

$$\eta_{п.у.} = N_r / N_n,$$

где  $N_r, N_n$  – соответственно мощности потока в гидродвигателе и насосе.

Рисунок 7.4 – Сравнение способов регулирования по КПД процесса управления  $\eta_{п.у.}$

Из рис. 7.4 видно, что наиболее высокий КПД гидропривода получается при объемном регулировании, ниже – при дроссельном с параллельным включением дросселя и еще ниже – при дроссельном с последовательным включением дросселя, который не может быть больше 0,385.

Следовательно, по двум важнейшим показателям – нагрузочным характеристикам и КПД – лучшие качества имеет гидропривод с объемным регулированием. Однако необходимо также учитывать еще экономические показатели.

Дело в том, что регулируемые гидромашины – насосы и гидромоторы – более дорогостоящие, чем нерегулируемые, то есть требуют более значительных капитальных затрат. Однако при более высоком КПД эти гидроприводы имеют экономию эксплуатационных расходов, в том числе, в энергозатратах. Поэтому объемный способ регулирования гидропривода обычно применяют для гидроприводов *большой мощности* и с длительными режимами их работы. Гидроприводы в *маломощных системах* и кратковременных режимах их работы, как правило, используют с дроссельным регулированием.

Особо следует отметить, что схема с дросселем на входе в гидроцилиндр (рис. 7.1, а) применяется только тогда, когда направление действия нагрузки противоположно направлению движения выходного звена гидродвигателя. В противном случае возможен разрыв потока в магистрали перед поршнем. Схема с дросселем на выходе (рис. 7.1, б), где дроссель установлен в сливной магистрали гидроцилиндра, может работать при любом направлении нагрузки, так как разрыв потока рабочей жидкости исключен. Сопротивление дросселя регулируется открытием проходного сечения. Закрыв отверстие, можно полностью прекратить движение поршня. Кроме того, теплота, выделившаяся при прохождении рабочей жидкости через дроссель, отводится в бак не нагревая гидродвигатель. Схема с параллельным включением дросселя (7.1, в) может быть применена только при направлении нагрузки, не совпадающим с направлением движения поршня (в противном случае также возможен разрыв потока жидкости). Применяемые на принципиальных гидравлических схемах, подобных рис. 7.1, обозначения отражают способы работы устройств, но не показывают фактическую конструкцию устройств.

#### **Указания к решению задач**

Гидроприводы при расчете необходимо рассматривать как сложные трубопроводы с насосной подачей, а гидродвигатели и аппаратуру управления – как особые местные гидравлические сопротивления, вызывающую потерю давления  $\Delta p$ .

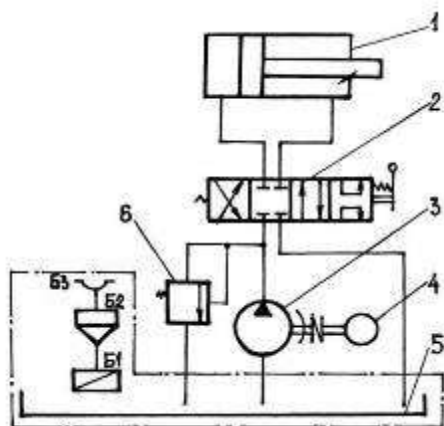
Наиболее распространенными при расчете объемного гидропривода являются:

- *прямая задача*, то есть необходимо определить величину давления объемного насоса  $p_n$ , которое он должен обеспечить в соответствии с заданной нагрузкой  $F$  на штоке гидроцилиндра;
- *обратная задача*, то есть следует определить величину нагрузки  $F$  на шток гидроцилиндра при заданном давлении  $p_n$  насоса;

В согласии с законом сохранения и превращения энергии в гидросистеме давление насоса  $p_n$  должно обеспечить необходимый перепад давления  $\Delta p_{г.д.}$  на гидродвигателе и компенсировать потери давления как на трение  $\Delta p_{тр}$  по длине в гидромагистрали, так и на местные сопротивления  $\sum \Delta p_{mi}$  в ней (рис. 7.5)

$$p_n = \Delta p_{г.д.} + \Delta p_{тр} + \sum_{i=1}^n \Delta p_{mi}, \quad (7.3)$$

где  $n$  – число местных сопротивлений в рассматриваемой гидролинии.



1 – гидроцилиндр; 2 – распределитель; 3 – насос; 4 – электродвигатель; 5 – гидробак; 6 – клапан предохранительный; Б1 – сетка; Б2 – горловина заливная; Б3 – сапун

Рисунок 7.5 – Схема объемного гидропривода с разомкнутой циркуляцией рабочей жидкости

Длина  $l$  гидромагистралей в объемных гидроприводах обычно не должна превышать  $l = 2$  м с целью исключения запаздывания в передаче командных импульсов. В целях уменьшения потерь давления  $\Delta p_{тр}$  и  $\Delta p_{mi}$  при проектировании требуется снижать скорость  $v$  движения рабочей жидкости в трубопроводах до 5...8 м/с.

Потери давления по длине  $\Delta p_{тр}$  и на местное сопротивление  $\Delta p_m$  следует определять по формулам:

$$\Delta p_{тр} = \rho g h_l, \quad (7.4)$$

$$\Delta p_m = \rho g h_m, \quad (7.5)$$

где  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$h_l$  – потеря напора по длине трубопровода, м;

$h_m$  – потеря напора на местные сопротивления, м.

При ламинарном режиме течения (при  $Re \leq 2320$ ) с учетом вибрации транспортных машин гидравлический коэффициент трения  $\lambda$  вычисляют по формуле:

$$\lambda = \frac{A}{Re}, \quad (7.6)$$

$$A = 75 \dots 150. \quad (7.7)$$

Здесь  $A = 75$  – для стальных трубопроводов;  $A = 150$  – для гибких рукавов.

В гидросистемах тракторов и комбайнов область сопротивления принимают как отвечающую гидравлически гладким трубам. В данной связи коэффициент  $\lambda$  определяют по формуле Блазиуса.



Потери давления  $\Delta p_{\text{тр}}$  на трение, распределенные по длине потока, определяют по формуле:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{\rho \lambda l v^2}{2d}, \quad (7.8)$$

где  $l$  – длина трубопровода, м;

$d$  – его внутренний диаметр, м;

$v$  – средняя скорость в сечениях потока, м/с;

$\lambda$  – гидравлический коэффициент трения;

$\rho$  – плотность рабочей жидкости, зависящая от ее физической природы и температуры, кг/м<sup>3</sup>, см. Приложение 3.

Величины потерь давления  $\Delta p_{\text{ми}}$  на каждое местное сопротивление принимают согласно опытным данным. Вместе с тем, потерю давления на местные сопротивления  $\Delta p_{\text{ми}}$  часто принимают в долях от потери давления на трение  $\Delta p_{\text{тр}}$ .

$$\Delta p_{\text{ми}} = k \cdot \Delta p_{\text{тр}}, \quad (7.9)$$

где  $k$  – коэффициент,  $k = 0,15 \dots 0,25$ .

Гидросистема считается оптимально спроектированной, если потери давления ( $\Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{ми}}$ ) не превышают 6% от номинального давления насосов  $p_n$ .

Согласно накопленному отечественному и зарубежному опыту проектирования гидропривода следует принимать следующие значения средней скорости  $v$ , м/с потока рабочей жидкости:

- для всасывающего трубопровода: 0,8...1,0;
- для сливного трубопровода: 1,4...2,0;
- для напорного трубопровода: 3,6...4.

При заданном  $Q$  и принятом значении  $v$  диаметр гидролинии определяют по формуле:

$$d = \sqrt{4Q/(\pi \cdot v)} \quad (7.10)$$

и округляют затем до ближайшего стандартного значения  $d_{\text{ст}}$  по ГОСТ 16 516-80: ...6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50..., мм.

В дальнейших вычислениях следует использовать величину стандартного диаметра  $d_{\text{ст}}$ .

Формулы для расчета других главных параметров нерегулируемого объемного гидропривода представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

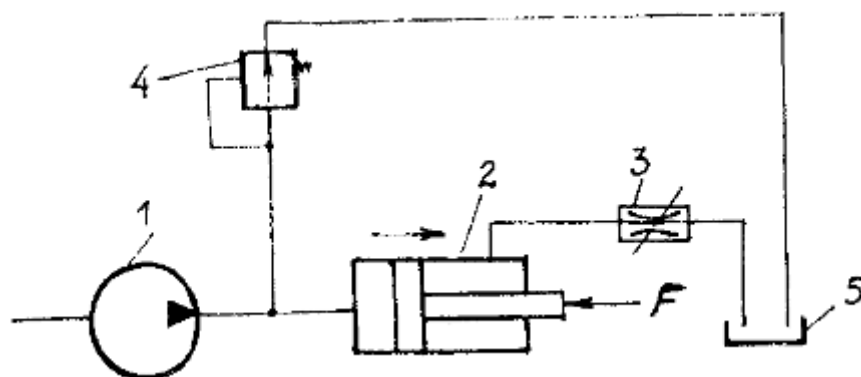
## Расчетные параметры объемного нерегулируемого привода

| Формулы для расчета<br>искомого параметра   | Расшифровка входящих<br>в формулу параметров   |
|---|--|
| Идеальная подача объемного насоса<br>$Q_{ни} = V_{он} \cdot n$<br>Действительная подача объемного на-<br>соса $Q_n = 10^{-6} \cdot V_{он} \cdot n \cdot \eta_o / 60$ , м <sup>3</sup> /с<br>$Q_n = Q_m = Q$ (при отсутствии утечек) | $V_{он}$ – рабочий объем насоса, см <sup>3</sup> /об;<br>$n$ – частота вращения вала насоса, мин <sup>-1</sup> ;<br>$\eta_o$ – объемный КПД насоса<br>$Q_m$ – расход жидкости через гидромотор   |
| Перепад давления на гидроцилиндре<br>$\Delta p_{ц} = \frac{F}{S_{2п}}$ , Па   | $F$ – усилие (нагрузка) на шток гидроцилиндра, Н;<br>$S_{2п}$ – рабочая площадь поршня со стороны што-<br>ковой полости, м <sup>2</sup> .  |
| Перепад давления на гидромоторе<br>$\Delta p_m = 10^{-6} \frac{2\pi \cdot M_m}{V_{ом} \cdot \eta_{мм}}$ , Па  | $M_m$ – момент на валу гидромотора, Н·м;<br>$V_{ом}$ – рабочий объем гидромотора, см <sup>3</sup> /об;<br>$\eta_{мм}$ – механический КПД гидромотора;  |
| Полезная мощность насоса<br>$N_{н.пол} = Q_n p_n$ , Вт  | $Q_n$ – подача насоса;<br>$p_n$ – давление, развиваемое насосом на выходе, Па<br>$p_n = \Delta p_{ц} + \Sigma \Delta p_{п}$ или<br>$p_n = \Delta p_m + \Sigma \Delta p_{п}$ ,<br>где $\Sigma \Delta p_{п} = \Delta p_{тр} + \Sigma \Delta p_{mi}$ – суммарные потери<br>давления на трение и местные сопротивления |
| Полезная мощность гидроцилиндра<br>$N_{ц.пол} = v_{п} \cdot F \cdot \eta_{оц} \cdot \eta_{мц}$ , Вт   | $v_{п}$ – скорость движения поршня, м/с;<br>$F$ – нагрузка на шток гидроцилиндра, Н;<br>$\eta_{оц}$ – объемный КПД цилиндра;<br>$\eta_{мц}$ – механический КПД цилиндра  |
| Полезная мощность гидромотора:<br>$N_{м.пол} = M_m \omega_m$  | $M_m$ – момент на валу гидромотора, Н·м;<br>$\omega_m$ – угловая скорость вала гидромотора, с <sup>-1</sup> ;  |
| Потребляемая насосом мощность<br>$N_n = M_n \omega_n = Q_n p_n / \eta_n$ , Вт,  | $M_n$ – момент на валу насоса, Н·м;<br>$\omega_n$ – угловая скорость вала насоса, с <sup>-1</sup> ;<br>$\eta_n$ – общий КПД насос  |
| Потребляемая гидромотором мощность<br>$N_m = Q_m \cdot \Delta p_m$  | $Q_m$ – действительный расход гидромотора, рав-<br>ный $Q_m = 10^{-6} \cdot V_{ом} \cdot n / (60 \cdot \eta_o)$ , м <sup>3</sup> /с  |
| Потребляемая мощность гидроцилинд-<br>ра $N_{ц} = \Delta p_{ц} \cdot S_{п} \cdot v$ , Вт  | $S_{п}$ и $v$ – соответственно рабочая площадь порш-<br>ня цилиндра и скорость его движения, м/с;  |
| Общий КПД насоса<br>$\eta_n = \eta_g \cdot \eta_o \cdot \eta_m$   | $\eta_g$ – гидравлический КПД;<br>$\eta_o$ – объемный КПД;<br>$\eta_m$ – механический КПД  |
| Коэффициент полезного действия для<br>поступательного гидропривода<br>$\eta_{г.пр.} = N_{ц.пол} / N_n$  | $N_{ц.пол}$ – полезная мощность гидроцилиндра, Вт  |
| Коэффициент полезного действия для<br>вращательного гидропривода<br>$\eta_{г.пр.} = N_{м.пол} / N_n$  | $N_{м.пол}$ – полезная мощность гидромотора, Вт  |

## Пример 18

Под каким давлением  $p_n$  нужно подвести жидкость ( $\rho=850$  кг/м<sup>3</sup>) к ле-  
вой полости гидроцилиндра (рис. 7.6) для перемещения поршня вправо со  
скоростью  $v_{п}=0,05$  м/с и преодоление нагрузки на штоке  $F=80$  кН, если ко-  
эффициент местного сопротивления дросселя  $\xi_{др}=10$ ? Другими местными

сопротивлениями и потерями на трение в гидроприводе пренебречь. Диаметры: поршня  $D_{\text{п}}=80$  мм; трубопровода  $d_{\text{т}}=16$  мм.



1 – насос; 2 – гидроцилиндр; 3 – регулируемый дроссель;  
4 – переливной клапан; 5 – бак

Рисунок 7.6.— К примеру 18

Дано:  
 $\rho=850$  кг/м<sup>3</sup>  
 $F=80$  кН  
 $v_{\text{п}}=0,05$  м/с  
 $\zeta_{\text{др}}=20$   
 $D_{\text{п}}=80$  мм  
 $d_{\text{т}}=12$  мм

Найти:  
 $p_{\text{н}} - ?$

Решение:

Задаемся скоростью рабочей жидкости в сливном трубопроводе согласно рекомендации в указаниях к решению задач этого раздела:  $v_{\text{сл}}=1,75$  м/с.

Определяем расход рабочей жидкости в сливном трубопроводе  $Q$ , м<sup>3</sup>/с:

$$Q = v \cdot \pi d^2 / 4 = 1,75 \cdot 0,016^2 \cdot \pi / 4 = 0,00035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

С учетом неразрывности потока и отсутствия утечек подача насоса равна расходу рабочей жидкости в сливном трубопроводе  $Q$ :

$$Q_{\text{н}} = Q = 0,00035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Перепад давления в цилиндре  $\Delta p$ :

$$\Delta p_{\text{ц}} = F / S_{\text{п}} = 4F / (\pi D_{\text{п}}^2) = 15,9 \text{ МПа}$$

Потеря давления на дросселе:

$$\Delta p_{\text{др}} = \zeta_{\text{др}} \cdot \rho \cdot v^2 / 2 = 20 \cdot 850 \cdot 1,75^2 / 2 = 0,025 \text{ МПа}$$

Давление, которое должен развивать насос с учетом перепада давления в гидроцилиндре  $\Delta p_{\text{ц}}$  и потери давления на дроссель  $\Delta p_{\text{др}}$  при их последовательном включении, равно:

$$p_{\text{н}} = \Delta p_{\text{ц}} + \Delta p_{\text{др}} = 15,9 + 0,026 = 15,93 \text{ МПа}.$$

Согласно данным Приложения 18 выбираем шестеренный насос марки НШ-32, у которого при подаче  $Q=0,00038$  м<sup>3</sup>/с и частоте вращения  $n_{\text{н}}=2400$  мин<sup>-1</sup> номинальное давление составляет  $p_{\text{ном}}=16$  МПа.

### Пример 19

В состав гидropередачи навесной системы трактора входит насос НШ-32 с рабочим объемом  $V_{0\text{н}}=32$  см<sup>3</sup>/об и гидроцилиндр Ц-100 с конструктивными параметрами: диаметр поршня  $D_{\text{п}}=100$  мм; ход поршня  $L=320$  мм.

Определить время подъема навесной машины, если объемный КПД насоса  $\eta_{0н} = 0,96$ .

Решение.

Определяют объем рабочей жидкости, поступающей в поршневую полость цилиндра за полный ход поршня

$$V = S_{\pi} \cdot L = \frac{\pi D_{\pi}^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \cdot 0,32 = 0,0025 \text{ м}^3$$

Устанавливают действительную подачу насоса

$$Q_{\text{н}} = 10^{-6} \cdot V_{0\text{н}} \cdot n \cdot \eta_0 / 60,$$

где  $n = 1820 \text{ мин}^{-1}$  согласно данных Приложения 18.

$$Q_{\text{н}} = 10^{-6} \cdot 32 \cdot 1820 \cdot \frac{0,96}{60} = 0,00093 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Вычисляют время подъема навесной машины

$$t = V / Q_{\text{н}} = 0,0025 / 0,00093 = 2,7 \text{ с}.$$

### Пример 20

Определить частоту вращения дисков разбрасывателя удобрений, приводимых во вращение гидромотором ГМШ-50-3, имеющих рабочий объем  $V_{\text{ом}} = 50 \text{ см}^3/\text{об}$ . Гидромотор приводится во вращение за счет давления шестеренного насоса НШ-10. Объемные КПД гидромотора и насоса соответственно равны 0,94 и 0,96.

Решение

Определяют объемный КПД гидропривода

$$\eta_0 = \eta_{0\text{н}} \cdot \eta_{0\text{м}} = 0,96 \cdot 0,94 = 0,9$$

По данным Приложения 18 устанавливают номинальную частоту вращения вала насоса НШ-10  $n_{\text{н}} = 1820 \text{ мин}^{-1}$  и его рабочий объем  $V_{\text{ом}} = 10 \text{ см}^3/\text{об}$

Вычисляют частоту вращения вала гидромотора:

$$n_{\text{м}} = n_{\text{н}} \frac{V_{0\text{н}}}{V_{0\text{м}}} \cdot \eta_0 = 2400 \frac{10}{50} \cdot 0,9 = 432 \text{ мин}^{-1}.$$

Соответственно частота вращения дисков разбрасывателя, приводимых во вращение валом гидромотора, также будет равна  $432 \text{ мин}^{-1}$ .

**Задача 106** (рис. 7.7). Для передачи энергии от двигателя мобильной машины к рабочему органу и управления режимами его работы применен нерегулируемый объемный гидропривод (ОГП). Структурная схема ОГП приведена на рисунке.

Рабочая жидкость масло: плотность  $\rho = 910 \text{ кг/м}^3$ , кинематическая вязкость  $\nu = 0,30$  Ст при  $t = 50^\circ\text{С}$ . Потери давления в гидрораспределителе 0,3 МПа, в фильтре 0,15 МПа; объемный и общий КПД: гидромотора 0,95 и 0,90; насоса 0,94 и 0,85. Требуется определить расход и перепад давления на гидромоторе; определить диаметры трубопроводов и потери давления в них; определить подачу, давление, мощность насоса и общий КПД гидропривода. Исходные данные к задаче приведены в табл. 106.

Таблица 106

| Исходные данные                                 | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|---|------------------------|------|------|------|------|------|
|   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Гидромотор: крутящий момент на валу $M_M$ , Н·м | 200                    | 160  | 65   | 170  | 340  | 590  |
| частота вращения вала $n_M$ , мин <sup>-1</sup> | 192                    | 1450 | 1800 | 1500 | 1500 | 1500 |
| рабочий объем $V_M$ , см <sup>3</sup> /об       | 100                    | 100  | 28   | 56   | 112  | 63   |
| Гидролинии, м: $\ell_1$                         | 1,5                    | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0  |
| $\ell_2$  | 1,5                    | 1,7  | 1,9  | 1,8  | 2,0  | 2,1  |
| $\ell_3 = \ell_4$                               | 3,0                    | 3,5  | 2,5  | 2,7  | 2,8  | 2,4  |
| $\ell_5$  | 2,0                    | 2,2  | 2,4  | 2,3  | 2,5  | 2,1  |

**Задача 107** (рис. 7.8). Из условия предыдущей задачи для нерегулируемого объемного гидропривода требуется:

1. Определить расход и перепад давления в гидроцилиндре.
2. Определить диаметры трубопроводов и потери давления в них.
3. Определить давление, создаваемое насосом; его подачу и мощность на валу.
4. Определить КПД гидропривода.

Вязкость рабочей жидкости  $\nu=5$  см<sup>2</sup>/с и плотность  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>. Местные потери давления в гидрораспределителе и фильтре принять по 0,4 МПа. Объемный и общий КПД: гидроцилиндра 1,0 и 0,97, насоса 0,94 и 0,85 соответственно. Исходные данные к задаче приведены в табл. 107.

Таблица 107

| Исходные данные                                    | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|--|------------------------|------|------|------|------|------|
|  | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| Гидроцилиндр: внутренний диаметр цилиндра $D$ , мм | 63                     | 80   | 100  | 125  | 160  | 90   |
| диаметр штока $d_{шт}$ , мм                        | 32                     | 40   | 50   | 63   | 70   | 40   |
| усилие на штоке $F$ , кН                           | 40                     | 65   | 120  | 180  | 300  | 102  |
| скорость штока $v_{шт}$ , м/с                      | 0,09                   | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,09 |
| Гидролинии, м: $\ell_1$                            | 2,0                    | 2,1  | 2,2  | 2,3  | 2,4  | 1,5  |
| $\ell_2$   | 2,1                    | 2,2  | 2,3  | 1,8  | 1,9  | 1,6  |
| $\ell_3 = \ell_4$                                  | 2,4                    | 3,1  | 3,3  | 3,6  | 4,0  | 2,8  |
| $\ell_5$   | 2,1                    | 2,2  | 2,4  | 2,1  | 2,7  | 2,0  |

**Задача 108** (рис. 7.9). Какое давление должно быть на выходе шестеренного насоса 1, нагнетающего рабочую жидкость через распределитель 5 в правую полость силового цилиндра 4, для того, чтобы преодолеть нагрузку на штоке  $F$  при скорости перемещения поршня  $v_p$ . Задана общая длина трубопровода от насоса до гидроцилиндра и от гидроцилиндра до бака  $\ell$ , а также диаметры: трубопровода  $d$ , поршня  $D$  и штока  $d_{шт}$ . Свойства жидкости: плотность  $\rho$ , коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 108.

Таблица 108

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значения для вариантов |      |     |       |     |      |
|-----------------|--------------------|------------------------|------|-----|-------|-----|------|
|                 |                    | 1                      | 2    | 3   | 4     | 5   | 6    |
| $F$             | кН                 | 16                     | 14   | 12  | 18    | 14  | 12   |
| $v_p$           | м/с                | 0,1                    | 0,15 | 0,2 | 0,175 | 0,2 | 0,12 |
| $\ell$          | м                  | 8                      | 10   | 9   | 7     | 12  | 14   |
| $D$             | мм                 | 60                     | 55   | 75  | 60    | 55  | 75   |
| $d_{шт}$        | мм                 | 20                     | 20   | 40  | 20    | 20  | 40   |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup>  | 850                    | 820  | 880 | 875   | 860 | 820  |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 4                      | 5    | 4,5 | 4,3   | 4,8 | 5    |
| $k$             | %                  | 20                     | 25   | 22  | 18    | 19  | 21   |
| $d$             | мм                 | 12                     | 10   | 15  | 12    | 10  | 15   |

Примечание:

1. Разностью высотного положения насоса и гидроцилиндра пренебречь.
2. Потери напора на местные сопротивления принять  $k$  % от потерь по длине.

**Задача 109** (рис. 7.10). Культиватор-растениепитатель снабжен гидропередачей, в состав которой входят: шестеренный насос 1, гидрораспределитель 3, силовой цилиндр 4, предохранительный клапан 5 и гидробак 6. Заданы размеры нагнетательной линии: диаметр  $d$ , длина  $\ell$ , а также диаметр поршня силового цилиндра. Требуется определить усилие  $F$ , которое создается поршнем силового цилиндра при работе культиватора, если подача насоса  $Q$  и давление на выходе  $p$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 109

Таблица 109

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значения для вариантов |      |     |      |      |     |
|-----------------|--------------------|------------------------|------|-----|------|------|-----|
|                 |                    | 1                      | 2    | 3   | 4    | 5    | 6   |
| $p$             | МПа                | 4                      | 4,5  | 3,5 | 5    | 5,2  | 4,6 |
| $Q, 10^{-6}$    | м <sup>3</sup> /с  | 110                    | 115  | 105 | 115  | 120  | 115 |
| $D$             | мм                 | 75                     | 55   | 50  | 50   | 80   | 55  |
| $d$             | мм                 | 12,5                   | 10   | 12  | 14   | 16   | 12  |
| $\ell$          | м                  | 10,5                   | 10   | 9   | 8    | 8,5  | 9,5 |
| $\Delta z$      | м                  | 0,5                    | 0,45 | 0,3 | 0,2  | 0,15 | 0,4 |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup>  | 850                    | 820  | 860 | 830  | 850  | 880 |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 0,2                    | 0,25 | 0,3 | 0,22 | 0,3  | 0,2 |
| $k$             | %                  | 20                     | 22   | 25  | 19   | 24   | 18  |

Примечание: потери давления на местные сопротивления принять  $k$  % от потерь по длине.

**Задача 110** (рис. 7.11). Определить скорости поршней  $v_{п1}$  и  $v_{п2}$ , площади которых одинаковы и равны  $S_{п}$ . Штоки поршней нагружены силами  $F_1$  и  $F_2$ . Длина каждой ветви трубопровода от узловой точки  $M$  до гидробака 1 равна  $\ell$ . Диаметр трубопроводов  $d$ .

Шестеренный насос 2 обеспечивает подачу  $Q$  в силовые гидроцилиндры 5. Вязкость рабочей жидкости  $\nu$ , плотность  $\rho$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 110

Таблица 110

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значения для вариантов |      |      |       |      |      |
|-----------------|--------------------|------------------------|------|------|-------|------|------|
|                 |                    | 1                      | 2    | 3    | 4     | 5    | 6    |
| $Q, 10^{-6}$    | м <sup>3</sup> /с  | 400                    | 480  | 550  | 800   | 530  | 550  |
| $S_{п}$         | см <sup>2</sup>    | 20                     | 32   | 45   | 125   | 50   | 78   |
| $F_1$           | кН                 | 19,6                   | 44,5 | 55,4 | 112,5 | 50,8 | 72,1 |
| $F_2$           | кН                 | 18                     | 43   | 54   | 110   | 50   | 70   |
| $\ell$          | м                  | 5                      | 4,5  | 6    | 7     | 4,9  | 7,6  |
| $d$             | мм                 | 8                      | 10   | 12   | 16    | 12   | 14   |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 1                      | 0,9  | 1,2  | 0,8   | 0,95 | 1,1  |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup>  | 900                    | 890  | 880  | 920   | 910  | 930  |

**Задача 111** (рис. 7.12). Для подъема груза массой  $m$  со скоростью  $v_{п}$  используются два параллельно работающих гидроцилиндра диаметром  $D$ . Расстояние между осями гидроцилиндров  $L$ . При укладке груза его центр может смещаться от среднего положения на величину  $a$ . Каким должен быть коэффициент сопротивления дросселя  $\zeta_{др1}$  или  $\zeta_{др2}$  в одной из ветвей напорного трубопровода, чтобы груз поднимался без перекашивания? Коэффициент сопротивления полностью открытого дросселя в другой ветви трубопровода принимать равным нулю. Какими будут при этом подача насоса и развиваемое давление?

Диаметр трубопроводов  $d$ . Плотность рабочей жидкости  $\rho$ . Потерями напора в трубопроводах системы, а также трением и утечками в гидроцилиндрах пренебречь. Исходные данные к задаче приведены в табл. 111.

Таблица 111

| Исходные данные | Единицы измерения | Значения для вариантов |       |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------|------|------|------|------|
|                 |                   | 1                      | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $m$             | т                 | 10,2                   | 15    | 12,5 | 14   | 10,5 | 12,8 |
| $v_{\text{п}}$  | м/с               | 0,16                   | 0,095 | 0,13 | 0,12 | 0,16 | 0,14 |
| $D$             | мм                | 100                    | 140   | 125  | 140  | 100  | 125  |
| $d$             | мм                | 12                     | 14    | 15   | 15   | 12   | 14   |
| $L$             | м                 | 5                      | 6     | 5,3  | 5,8  | 5,1  | 5,4  |
| $a$             | мм                | 250                    | 300   | 260  | 290  | 240  | 270  |
| $\rho$          | кг/м <sup>3</sup> | 880                    | 900   | 920  | 890  | 840  | 860  |

**Задача 112** (рис. 7.13). На рисунке показана упрощенная схема объемного гидропривода поступательного движения с дроссельным регулированием скорости выходного звена (штока), где 1 – насос, 2 – регулируемый дроссель. Шток гидроцилиндра 3 нагружен силой  $F$ , диаметр поршня  $D$ . Предохранительный клапан 4 закрыт. Подача насоса  $Q$ , плотность рабочей жидкости  $\rho$ . Требуется:

1. Определить величину давления на выходе из насоса.
2. Вычислить расход жидкости через дроссель.
3. Установить скорость перемещения поршня со штоком  $v_{\text{п}}$  при таком открытии дросселя, когда его можно рассматривать как отверстие площадью  $S_0$  с коэффициентом расхода  $\mu$ . Потерями давления в трубопроводах пренебречь. Исходные данные к задаче приведены в табл. 112

Таблица 112

| Исходные данные     | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |     |      |      |
|---------------------|-------------------|------------------------|------|------|-----|------|------|
|                     |                   | 1                      | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    |
| $F$                 | кН                | 1,2                    | 2,5  | 1,9  | 2,8 | 1,5  | 2,2  |
| $D$                 | мм                | 40                     | 75   | 50   | 60  | 45   | 50   |
| $Q_{\text{н}}$      | л/с               | 0,5                    | 0,9  | 0,7  | 1,0 | 0,75 | 0,95 |
| $S_0 \cdot 10^{-2}$ | см <sup>2</sup>   | 5                      | 8    | 6    | 8,5 | 6,5  | 7    |
| $\mu$               |                   | 0,62                   | 0,63 | 0,61 | 0,6 | 0,62 | 0,6  |
| $\rho$              | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 910  | 890  | 900 | 880  | 910  |

Примечание: Расход рабочей жидкости через дроссель следует находить из уравнения

$$Q_{\text{др}} = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2F}{\rho \cdot S_{\text{п}}}}$$

**Задача 113** (рис. 7.14). При каком проходном сечении дросселя  $S_{\text{др}}$  частоты вращения гидромоторов 1М и 2М будут одинаковы? Заданы: рабочий объем насоса  $V_{0\text{н}}$ , см<sup>3</sup>/об; частота вращения вала насоса  $n$ , мин<sup>-1</sup>; рабочие объемы гидромоторов  $V_{01\text{М}}$  и  $V_{02\text{М}}$ , см<sup>3</sup>/об; моменты на валах гидромоторов  $M_{\text{кр}1\text{М}}$  и  $M_{\text{кр}2\text{М}}$ , Н·м; объемный КПД гидромашин  $\eta_0$ ; плотность рабочей жидкости  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; коэффициент расхода дросселя  $\mu$ . Потерями напора на трение в трубопроводах пренебречь. Механическое КПД гидромоторов принять  $\eta_{\text{м}} = 0,95$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 113

Таблица 113

| Исходные данные          | Единицы измерения | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|--------------------------|-------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                          |                   | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $V_{0\text{н}}$          | см <sup>3</sup>   | 56                     | 80   | 63   | 50   | 59   | 100  |
| $V_{01\text{М}}$         | см <sup>3</sup>   | 12                     | 16   | 13   | 10   | 14   | 22   |
| $V_{02\text{М}}$         | см <sup>3</sup>   | 28                     | 40   | 32   | 25   | 34   | 50   |
| $n$                      | мин <sup>-1</sup> | 3000                   | 2500 | 2000 | 2400 | 2000 | 2000 |
| $M_{\text{кр}1\text{М}}$ | Н·м               | 20                     | 25   | 20   | 16   | 25   | 35   |
| $M_{\text{кр}2\text{М}}$ | Н·м               | 40                     | 55   | 45   | 35   | 50   | 70   |
| $\eta_0$                 |                   | 0,95                   | 0,92 | 0,94 | 0,96 | 0,91 | 0,93 |
| $\rho$                   | кг/м <sup>3</sup> | 900                    | 920  | 900  | 920  | 900  | 910  |
| $\mu$                    |                   | 0,85                   | 0,8  | 0,7  | 0,65 | 0,75 | 0,8  |

**Задача 114** (рис. 7.15). Система гидравлического привода сталкивающей стенки стогометателя состоит из шестеренного насоса 1, нагнетательной линии 2, золотникового распределителя 3 и гидроцилиндра двустороннего действия 4. Рабочей жидкостью в гидросистеме служит дизельное масло с удельным весом  $\gamma$  и кинематической вязкостью  $\nu$ . Местные потери напора в гидроприводе составляют  $k\%$  от потерь на трение  $h_{тр}$ . Требуется определить давление  $p$  на выходе из шестеренного насоса, если подача его  $Q$ , а нагрузка на шток силового цилиндра  $F$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 114

Таблица 114

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|-----------------|--------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                 |                    | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $F$             | кН                 | 0,4                    | 0,55 | 0,6  | 0,35 | 0,6  | 0,7  |
| $Q_H$           | см <sup>3</sup> /с | 115                    | 120  | 125  | 100  | 125  | 295  |
| $D$             | мм                 | 55                     | 60   | 65   | 50   | 65   | 70   |
| $d$             | мм                 | 8                      | 10   | 12   | 8    | 12   | 14   |
| $\ell$          | м                  | 12                     | 10   | 12   | 11   | 9,5  | 10   |
| $k$             | %                  | 12                     | 20   | 25   | 20   | 19   | 20   |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 0,2                    | 0,22 | 0,21 | 0,2  | 0,19 | 0,2  |
| $\gamma$        | кН/м <sup>3</sup>  | 8,6                    | 8,62 | 8,64 | 8,6  | 8,65 | 8,62 |

**Задача 115** (рис. 7.16). Система гидроусилителя рулевого управления автомобиля “КаМАЗ” состоит из шестеренного насоса 1, нагнетательного трубопровода 2, золотникового распределителя 3 и гидроцилиндра двустороннего действия 4. Рабочей жидкостью в гидросистеме служит масло с удельным весом  $\gamma$  и кинематическим коэффициентом вязкости  $\nu$  при температуре  $t=20^\circ\text{C}$ . Местные потери давления нагнетательной линии составляют  $k\%$  от потерь на трение  $h_{тр}$ . Требуется определить усилие  $F$ , создаваемое поршнем силового цилиндра, если подача насоса  $Q$  и давление его на выходе  $p$ . Исходные данные к задаче приведены в табл. 115

Таблица 115

| Исходные данные | Единицы измерения  | Значения для вариантов |      |      |      |      |      |
|-----------------|--------------------|------------------------|------|------|------|------|------|
|                 |                    | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| $p$             | МПа                | 5,5                    | 5,0  | 5,2  | 6,0  | 5,8  | 6,2  |
| $Q, 10^{-6}$    | м <sup>3</sup> /с  | 135                    | 130  | 140  | 125  | 110  | 115  |
| $D$             | мм                 | 75                     | 60   | 55   | 75   | 55   | 60   |
| $d$             | мм                 | 12                     | 10   | 8    | 12   | 19   | 16   |
| $\ell$          | м                  | 7                      | 5    | 5,5  | 6,0  | 7,5  | 8,0  |
| $k$             | %                  | 20                     | 18   | 19   | 25   | 16   | 18   |
| $\Delta z$      | м                  | 0,5                    | 0,45 | 0,4  | 0,35 | 0,2  | 0,55 |
| $\nu$           | см <sup>2</sup> /с | 0,2                    | 0,21 | 0,18 | 0,22 | 0,2  | 0,18 |
| $\gamma$        | Н/м <sup>3</sup>   | 9025                   | 9000 | 8800 | 8850 | 8250 | 8050 |

Примечание: разность высотного положения насоса и гидроцилиндра принять равной  $\Delta z$ .

Рисунки 7.7....7.16 к задачам темы 7

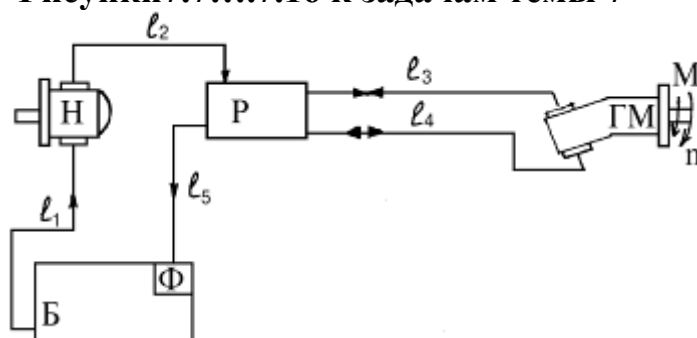


Рисунок 7.7



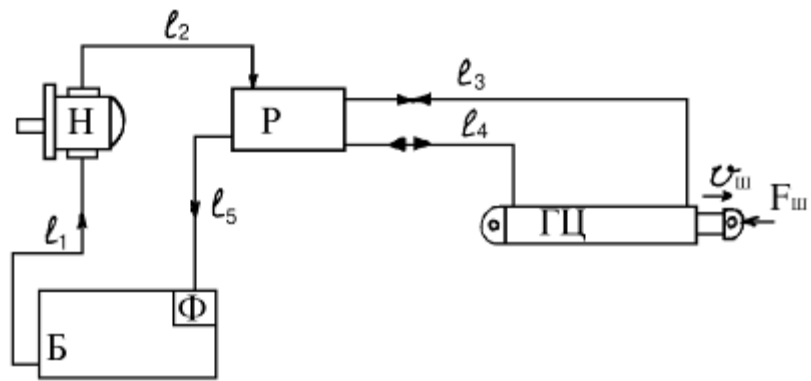


Рисунок 7.8

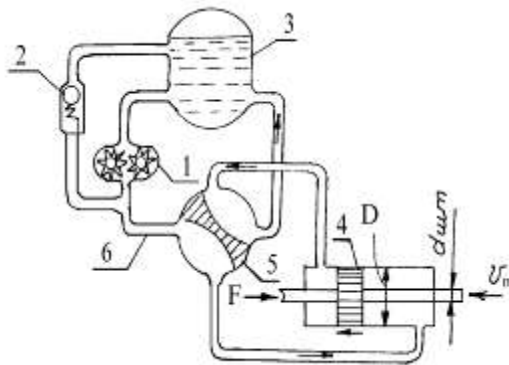


Рисунок 7.9

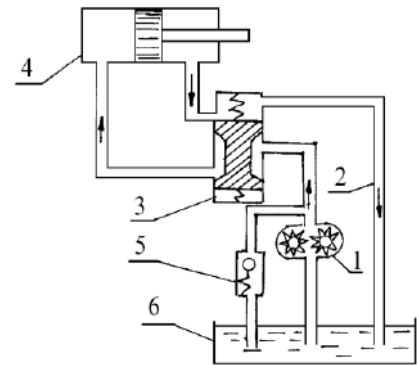


Рисунок 7.10

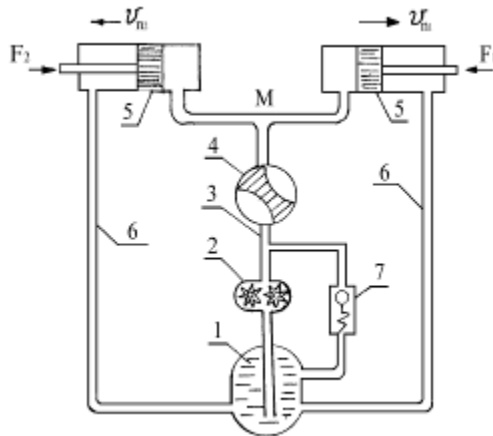


Рисунок 7.11

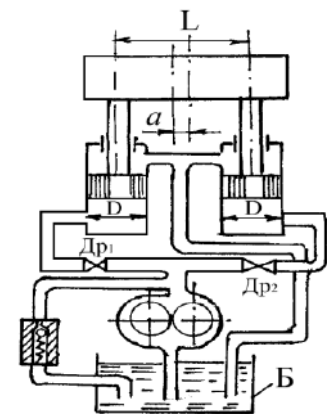


Рисунок 7.12

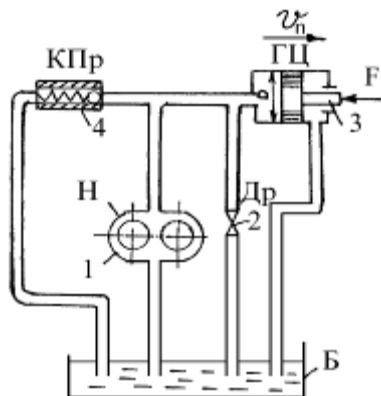


Рисунок 7.13

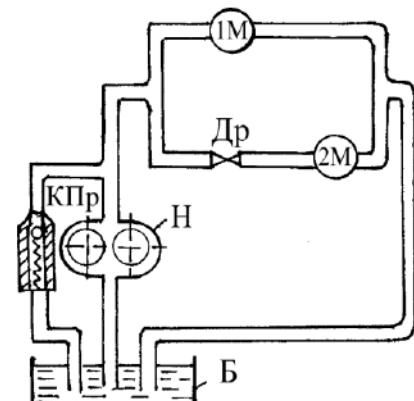


Рисунок 7.14

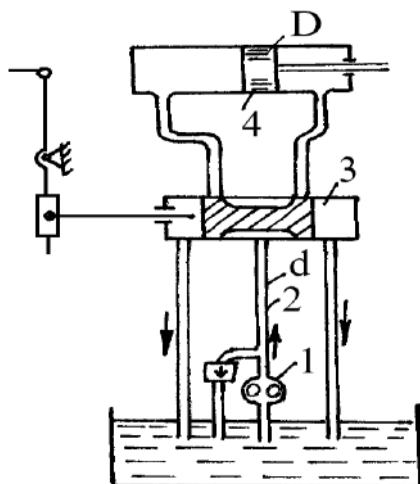


Рисунок 7.15

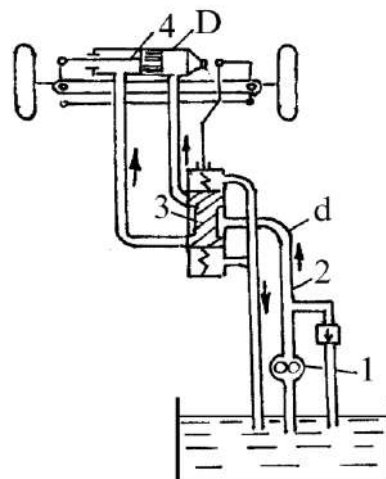


Рисунок 7.16

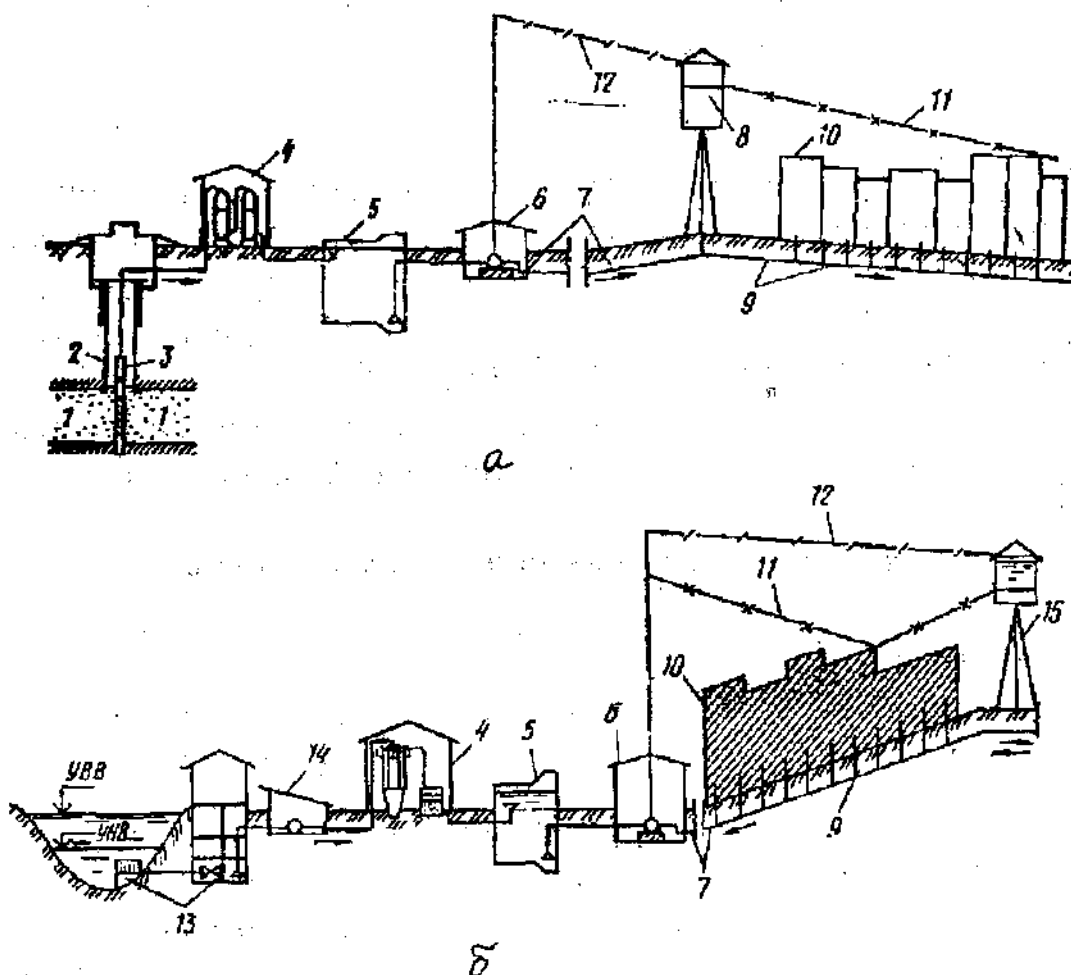
## ТЕМА 8. ОСНОВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Под водоснабжением принято понимать комплекс санитарных мероприятий и взаимосвязанных инженерных сооружений, предназначенных для обеспечения определенной группы потребителей водой в требуемых количествах и требуемого качества.

В общем случае в состав системы водоснабжения входят следующие сооружения (рис. 8.1):

- *водоприемные* сооружения, при помощи которых осуществляется прием воды из природных источников;
- *водоподъемные* сооружения, подающие воду к местам ее очистки, хранения и потребления;
- *очистные* сооружения;
- *водоводы* и *водопроводные* сети, служащие для транспортирования и подачи воды к местам потребления;
- *башины* и *резервуары*, играющие роль регулирующих и запасных емкостей в системе водоснабжения.

В зависимости от местных условий необходимость в отдельных сооружениях в этой схеме может отпасть, и, наоборот, некоторые из них могут получить большее развитие. Последовательность в размещении сооружений также может изменяться. Однако во всех случаях обязательной является непрерывная цепь устройств и сооружений, *принимающих воду* из различных природных водоисточников и *подающих* ее непосредственно к потребителю.



1 – эксплуатационный водоносный горизонт; 2 – водозаборная скважина; 3 – погружной электронасос; 4 – водоочистная станция; 5 – РЧВ; 6 – насосная станция II подъема; 7 – водоводы; 8 – водонапорная башня; 9 – водопроводная сеть; 10 – объект водоснабжения; 11 – пьезометрическая линия при максимальном водопотреблении из сети; 12 – пьезометрическая линия водовода при максимальном уровне воды в баке башни; 13 – речной водозабор; 14 – насосная станция I подъема; 15 – контррезервуар (водонапорная башня в конце сети)

Рисунок 8.1 – Схемы водоснабжения из подземного (а) и поверхностного (б) источников

### Источники водоснабжения

В качестве источников водоснабжения в сельскохозяйственном производстве исключительно широкое распространение (90...95%) имеют *подземные воды* по причине следующих обстоятельств:

- близкого расположения к потребителю;
- хороших бактериологических качеств;
- большой прозрачности и постоянства температуры в течение года.

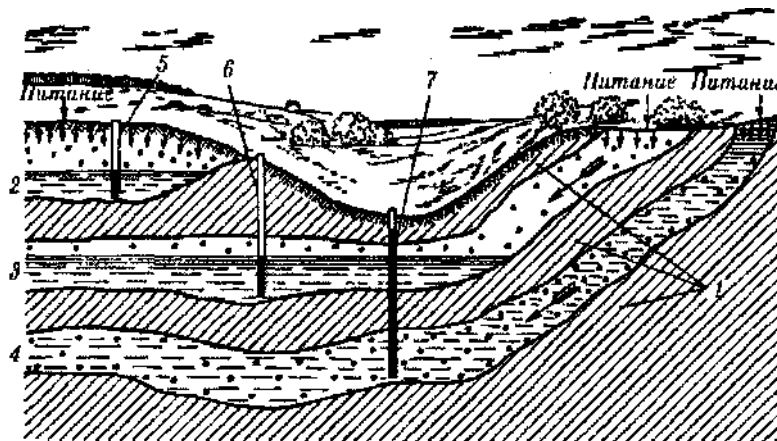
На рис. 8.2 представлена общая схема залегания подземных вод.

В зависимости от условий и глубины залегания относительно пахотного горизонта различают следующие виды подземных вод:

- грунтовые (2);
- межпластовые безнапорные (3);
- межпластовые напорные (4);

- родниковые.

Грунтовые воды — это безнапорные воды, образующиеся в толще геологических пород на первом от поверхности водоупорном пласте за счет фильтрации в грунт атмосферных осадков и конденсации водяных паров. Качество грунтовых вод в значительной степени зависит от глубины их залегания.



1 — водоупорные слои; 2 — горизонт грунтовых вод; 3 — горизонт межпластовых безнапорных вод; 4 — горизонт межпластовых напорных вод; 5 — колодец, питающийся грунтовой водой; 6 — скважина, питающаяся межпластовой безнапорной водой; 7 — скважина, питающаяся межпластовой напорной (артезианской) водой

Рисунок 8.2 – Схема залегания подземных вод

Межпластовые безнапорные и напорные (артезианские) воды — воды, залегающие между водоупорными слоями. Отличительная особенность межпластовых вод — отсутствие питания с поверхности непосредственно над ними. Для них характерно постоянство состава и температуры воды. Они наиболее защищены от загрязнения, поэтому часто кристально чисты, имеют высокие питьевые качества, хотя в отдельных случаях обладают повышенной минерализацией.

Подземные воды, самостоятельно выходящие на поверхность земли, образуют родники. Родники могут питаться как грунтовыми, так и межпластовыми водами. В большинстве случаев родниковые воды обладают хорошими питьевыми качествами. Различают два вида родников — нисходящие и восходящие.

Оборудование естественного места выхода подземных вод на поверхность земли с целью использования их для небольших объектов водоснабжения называют *каптажом* родниковых вод.

При выборе источника водоснабжения в сельской местности отдают предпочтение подземным водам, так как они распространены повсеместно и их можно использовать без очистки. Поверхностные воды применяют реже, поскольку они более загрязнены и перед подачей потребителю требуют специальной очистки, то есть больших материальных затрат. Поэтому себестоимость  $1\text{ м}^3$  воды из поверхностных источников с очисткой на местных филь-

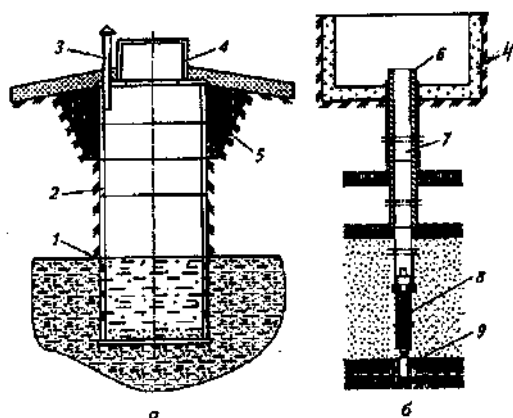
рах примерно в 3...5 раз выше себестоимости  $1\text{ м}^3$  воды из подземных источников без очистки.

### Водоприемные сооружения

*Водоприемные сооружения из подземных источников.* Воду из подземных источников получают при помощи водоприемных сооружений – шахтных и трубчатых колодцев (рис. 8.3). Трубчатые колодцы имеют также название буровых скважин.

*Шахтные колодцы* предназначены для приема грунтовых вод, залегающих на глубине 30...40 м при толщине водоносного слоя 5...8 м.

Устройство (рис. 8.3, а): шахтный колодец состоит из водоприемной части 1, ствола (шахты) 2, глиняного замка 5 и оголовка 4. Оголовок защищает колодец от попадания загрязненных поверхностных вод. Вокруг оголовка устраивают глиняный замок шириной 1 м и глубиной не менее 1,5 м, а также в радиусе 2...2,5 м делают бетонную отмостку по песчаному основанию с уклоном от оголовка 0,05...0,1. Делают их с целью защиты от загрязнения грунтовых вод поверхностными стоками и отвода атмосферных осадков. Для вывода подземных газов колодца служит вентиляционная труба 3.



- а – шахтный колодец; б – скважина  
1 – водоприемная часть; 2 – ствол (шахта);  
3 – вентиляционная труба;  
4 – оголовок; 5 – глиняный замок;  
6 – устье; 7 – эксплуатационная колонна; 8 – водоприемная часть (фильтр);  
9 – отстойник

Рисунок 8.3 – Водоприемные сооружения подземных вод

Стенки шахты делают круглыми или квадратными в плане из бетона, кирпича или других строительных материалов соответствующей прочности. В водоприемной части ствола 1 предусмотрены отверстия для прохождения воды в колодец. Дно колодца оборудуют песчано-гравийным фильтром.

*Трубчатые колодцы* (буровые скважины) предназначены для приема воды из обильных водоносных пластов, залегающих на глубине 50...150 м.

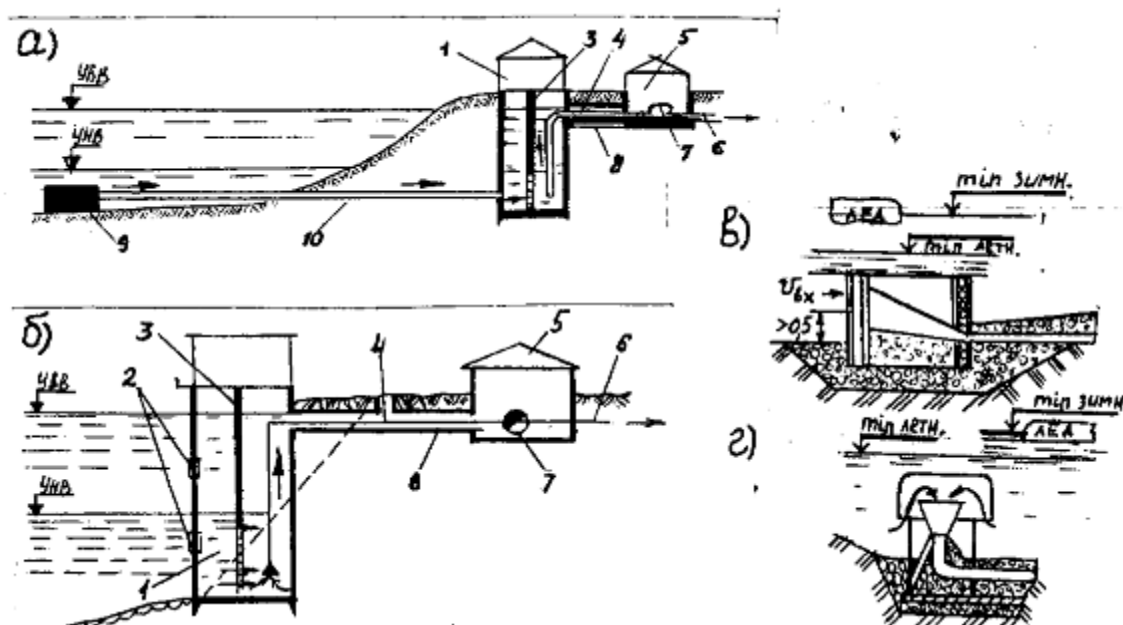
Устройство (рис. 8.3, б): колодец состоит из четырех частей – отстойника 9, фильтра 8, эксплуатационной колонны 7, устья 6.

Трубчатые колодцы образуются бурением вертикальной скважины, стенки которой укрепляют обсадными трубами небольшого диаметра (до 350 мм). Устьевую часть скважины закрепляют колонной большего диаметра – *кондуктором*, который обеспечивает вертикальность ствола скважины, изолирует верхний грунтовый пласт от нижних водоносных горизонтов и предохраняет устье скважины от размыва в процессе бурения.

Наиболее ответственным элементом конструкции скважины является фильтр 8, который необходим для приема воды из водоносного слоя без механических примесей. Он должен быть, кроме того, устойчивым против коррозии и обладать хорошей прочностью.

Водоприемные сооружения из поверхностных водоисточников подразделяют по следующим признакам:

- месту расположения: береговые, русловые, приплотинные и т.д.;
- типу водоема: речные, озерные, водохранилищные, морские;
- категории надежности;
- производительности: малые до  $Q = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ ; средние  $Q = 1 \dots 6 \text{ м}^3/\text{с}$  и большие  $Q > 6 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- длительности периода эксплуатации: постоянные и временные.



- а – русловый водозабор; б – береговой раздельный; в, г – схемы водоприемника, соответственно с боковым и потолочным приемом воды
- 1 - береговой колодезь; 2 - водоприемные окна с решетками; 3 - перегородка с сетками; 4 - всасывающие трубы; 5 - насосная станция; 6 - напорные водоводы; 7 - насосы; 8 - галерея для размещения всасывающих труб; 9 - водоприемник (оголовок); 10 - самотечная линия

Рисунок 8.4 – Схемы речных водозаборов

Русловые речные водозаборы (рис. 8.4, а) применяют при относительно пологом берегу. Подразделяют на два основных типа – совмещенные и раздельные. В их состав входят: оголовок 9, береговой сеточный колодезь (сетка для процеживания воды) 1, насосная станция 5.

Речные водозаборы берегового типа (рис. 8.4, б) применяют при крутых берегах и наличии у берега достаточных глубин, гарантирующих нормальные условия приема воды. Совмещенный водозабор берегового типа представляет собой железобетонный колодезь, передняя часть которого выдвинута в русло воды. Вода поступает в колодезь через входные окна в его водоприемную часть. Сетки разделяют колодезь на два отделения – водоприемное и всасывающее. Сетки задерживают рыбную молодь и мелкие пла-

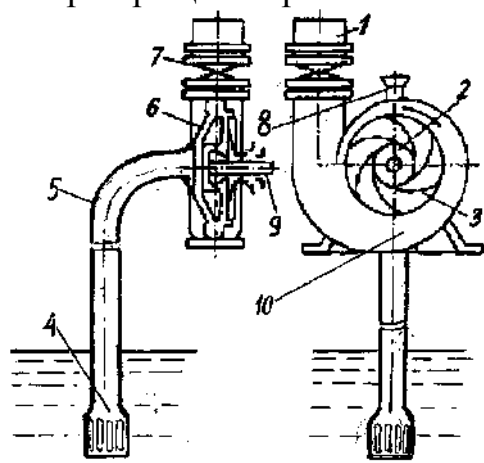
вающие загрязнения, предохраняя таким образом трубы и насосы от засорения. Вода, профильтрованная через сетки, забирается всасывающими трубами насосов и поступает в водоводы первого подъема.

### Водонапорное оборудование

Из водоприемных сооружений воду подают потребителю с помощью насосов и водоподъемников. Из большого спектра насосов, выпускаемых нашей промышленностью, в практике сельскохозяйственного водоснабжения больше всех востребованы центробежные и вихревые насосы. Объясняется это их достоинствами: простотой в обслуживании, надежностью в эксплуатации и долговечностью.

*Центробежные насосы консольного типа* предназначены для всасывания и нагнетания воды из поверхностных водоисточников.

Устройство консольного центробежного насоса (рис. 8.5): в корпусе 6, выполненного в виде спирали Архимеда, находится рабочее колесо 2. Оно жестко закреплено на валу 9 и представляет собой два диска, между которыми находятся профилированные лопасти 3. Рабочее колесо приводится во вращение от электродвигателя. Благодаря специальной геометрии лопастей при вращении рабочего колеса возникают центробежные силы.



- 1 – нагнетательный трубопровод;
- 2 – рабочее колесо; 3 – лопасть;
- 4 – приемный клапан с фильтром;
- 5 – всасывающая труба; 6 – корпус;
- 7 – задвижка; 8 – пробка; 9 – вал;
- 10 – спиральный отвод

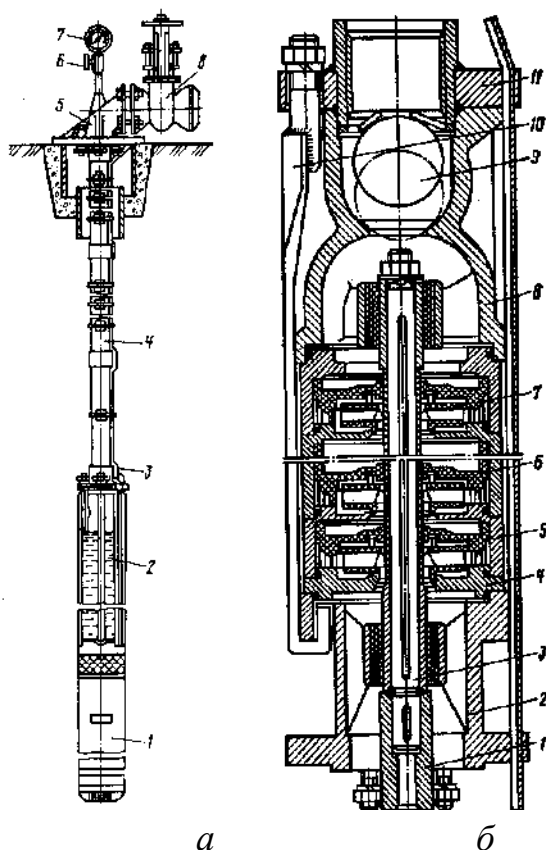
Рисунок 8.5 – Технологическая схема центробежного насоса

У корпуса имеются два патрубка: всасывающий и напорный. К всасывающему патрубку подводится всасывающая труба 5, на конце которой закреплен обратный клапан с сеткой 4, а к напорному – нагнетательный трубопровод 1, по которому вода транспортируется потребителю.

**П р и н ц и п р а б о т ы :** перед пуском корпус насоса и всасывающую трубу полностью заполняют водой. Для этого в самой верхней точке корпуса предусмотрено отверстие, закрываемое пробкой 8. После этого включают электродвигатель, который приводит во вращение вал и рабочее колесо. Вода, находящаяся в каналах между лопастями рабочего колеса, под действием центробежных сил *отбрасывается* от центра колеса к его периферии. В результате этого в центральной части рабочего колеса создается *разрежение*, а на периферии давление, намного превышающее атмосферное. Под действием этого давления вода вытесняется по спиральному отводу 10 в нагнетательный трубопровод 1, присоединенный к напорному патрубку. Одновременно за счет разрежения в центре рабочего колеса вода из водоисточника поступа-

ет по всасывающей трубе в корпус насоса. Таким образом, создается непрерывный поток воды в водонасосной установке, в которую включен центробежный насос.

*Погружной центробежный насос* предназначен для подъема подземных вод из трубчатых колодцев. Они многоступенчатые, вертикального исполнения. Агрегат (рис. 8.6, а) состоит из насоса 2, электродвигателя 1, водоподъемной трубы 4, станции управления (на рис. не показана) и кабеля 3 для питания электродвигателя 1. Электродвигатель имеет специальную конструкцию, соединен с валом насоса и работает в воде, то есть непосредственно в межпластовом водоносном слое.



*а – схема установки погружного насоса:*

- 1 – электродвигатель; 2 – насос;  
3 – кабель; 4 – водоподъемные трубы;  
5 – опорное колено; 6 – кран;  
7 – манометр

*б – разрез погружного насоса*

- 1 – соединительная муфта;  
2 – ступица основания; 3 – вал; 4 – диск;  
5 – обойма; 6 – направляющий аппарат;  
7 – рабочее колесо;  
8 – ступица верхнего подшипника;  
9 – клапан; 10 – стяжка; 11 – головка

Рисунок 8.6 – Погружной центробежный насос

Насос (рис. 8.6, б) состоит из нескольких ступеней рабочих колес 7, установленных в направляющих аппаратах 6 и разделенных перегородками (дисками) 4. Благодаря последовательному соединению рабочих колес эти насосы могут обеспечивать большой напор до 300 м вод. ст.

**П р и н ц и п р а б о т ы** (рис. 8.6, б): при включении электродвигателя приводится во вращение вал насоса 3 с закрепленными на нем рабочими колесами 7. Под действием центробежной силы вода выбрасывается на периферию, поступает в каналы направляющих аппаратов 6. При этом в центре рабочего колеса так же, как у консольного центробежного насоса, создается *разрежение*, за счет которого вода из трубчатого колодца через приемные окна с сеткой поступает к первому (нижнему) рабочему колесу. Это колесо передает воду по каналам направляющего аппарата к центру второго рабочего колеса, затем последовательно она проходит все секции насоса, постепен-



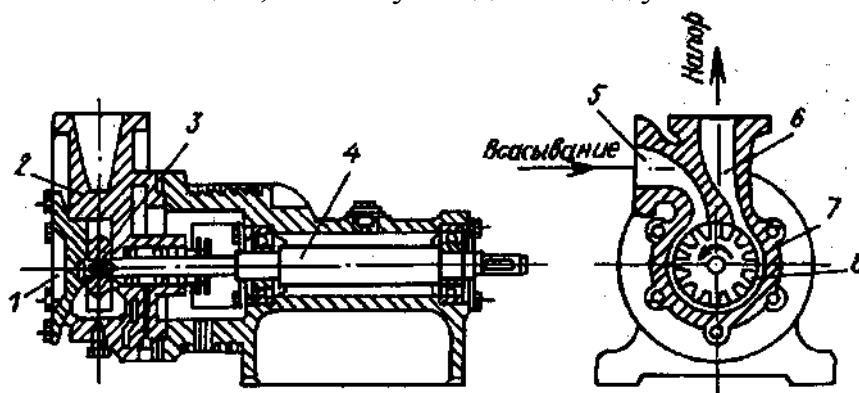
но наращивая напор, и направляется через водоподъемную трубу в водопроводную сеть.

Наибольшее распространение в животноводстве имеют консольные центробежные насосы типа *К* и *КМ* и погружные насосы типа *ЭЦВ*. В настоящее время в нашей стране принята маркировка насосов по основным техническим показателям: подаче и напору.

Большинство насосов маркируется следующим образом: после буквенного обозначения (марки) ставят через тире или косую черту две цифры – номинальную подачу, м<sup>3</sup>/ч и номинальный напор столба жидкости, м. Например, консольный насос с подачей 125 м<sup>3</sup>/ч и напором 30 м обозначается так: *К125-30* или *К125/30*. Погружные насосы типа *ЭЦВ*, например *ЭЦВ 4-1-45*, имеют следующую расшифровку: *Э* – электрический, *Ц* – центробежный, *В* – для чистой воды, 4 – минимальный диаметр буровой скважины в дюймах ( $d_{скв} = 4 \cdot 25 = 100$  мм), 1 – подача, м<sup>3</sup>/ч; 45 – напор, м вод.ст.

*Вихревой насос* – это разновидность насосов трения из числа динамических насосов. Он предназначен для перекачки чистой воды с относительно небольшой подачей, но с достаточно большим напором (в 2...3 раза больше, чем у центробежного при одинаковом диаметре рабочего колеса).

Устройство (рис. 8.7): в корпусе насоса 2 на валу 4 жестко закреплено рабочее колесо 3. Оно представляет собой диск толщиной 8...10 мм с радиальными лопатками. Внутри между корпусом и рабочим колесом имеется кольцевой зазор (канал) 7. Вихревой насос в отличие от центробежного является самовсасывающим, поэтому вход и выход у него взаимозаменяемы.



1 – фланец; 2 – корпус; 3 – рабочее колесо; 4 – вал; 5 – всасывающий патрубок; 6 – нагнетательный патрубок; 7 – кольцевой зазор; 8 – межлопаточная полость

Рисунок 8.7 – Вихревой насос

**П р и н ц и п р а б о т ы:** перед самым первым пуском насоса его корпус заполняют водой. Затем приводят во вращение рабочее колесо, лопатки которого оказывают силовое воздействие на воду, приводя ее в движение. Характер движения при этом сложный по двум причинам:

- частицы воды вращаются вместе с рабочим колесом;
- под действием центробежных и центростремительных сил создается вихревое циркуляционное движение частиц воды в пространстве между межлопаточными полостями и кольцевым каналом.

Таким образом, при прохождении межлопаточных полостей колеса на пути от входа в кольцевой канал до выхода из него жидкость получает многократное приращение энергии. По этой причине при одном и том же диаметре рабочего колеса вихревые насосы развивают напоры большие, чем центробежные. Благодаря этому вихревые насосы имеют меньшие габариты и массу по сравнению с центробежными насосами таких же рабочих параметров.

Недостатком вихревых насосов является низкий КПД, не превышающий 45 %. Наиболее распространенные конструкции имеют КПД 35...38 %.

На рис. 8.7 показано, что всасывающий патрубок имеет вертикальный участок. Это исключает вытекание воды при неработающем насосе. При повторном пуске воздух из всасывающей трубы удаляется самим насосом, в результате чего в ней создается разрежение, и вода из источника под действием атмосферного давления поступает в корпус насоса.

Вихревые насосы получили в настоящее время широкое распространение в системах водоснабжения для перекачивания чистых жидкостей. Их применяют, когда требуется получить большой напор при малой подаче.

Вихревые насосы изготовляют на подачу до 12 дм<sup>3</sup>/с. Напор вихревых насосов достигает 100 м, мощность доходит до 20 кВт, коэффициент быстроходности 6...40.

Промышленность выпускает одноступенчатые вихревые насосы типа ВК, ВКС и ВКО. Насосы типа ВКС – самовсасывающие, типа ВКО – с обогревом. В обозначении насоса буквы указывают тип насоса, первые цифры подачу, вторые – напор. Например, обозначение насоса ВКС-2/26 означает: насос вихревой консольный самовсасывающий с номинальной подачей 2 дм<sup>3</sup>/с и номинальным напором 26 м вод.ст.

Промышленность выпускает *центробежновихревые* насосы в едином корпусе. Центробежное колесо, как правило, располагают перед вихревым, то есть вода сначала попадает в центробежное колесо, где создается небольшое давление, которое затем повышается вихревым колесом. При таком сочетании достигаются большие напоры при относительно малой подаче. Промышленность выпускает центробежновихревые насосы типа ЦВК с указанием подачи (первая цифра) и напора (вторая цифра). КПД у этих насосов несколько выше, чем у вихревых, и достигает 0,45...0,48.

### **Напорно-регулирующие сооружения**

В системах водоснабжения используют специальные напорно-регулирующие сооружения, предназначенные для регулирования *подачи* воды, создания постоянного достаточного напора в водопроводной сети, а также формирования запаса воды на время отключения насосной установки.

Применяют два типа напорно-регулирующих сооружений: *водонапорную башню* и *пневматический котел* (безбашенное сооружение). В настоящее время в практике сельхозводоснабжения широкое применение имеют бесшатровые башни-колонны конструкции А.А. Рожновского.

*Водонапорная башня А.А. Рожновского* предназначена для создания наружного напора за счет подъема водонапорного резервуара на необходимую высоту. Отличительной ее особенностью является цилиндрическая опора, которая одновременно является емкостью для воды, что увеличивает запас воды в башне почти в два раза.

Устройство (рис. 8.8): башня состоит из фундамента, ствола (опоры) 1 и резервуара 2.

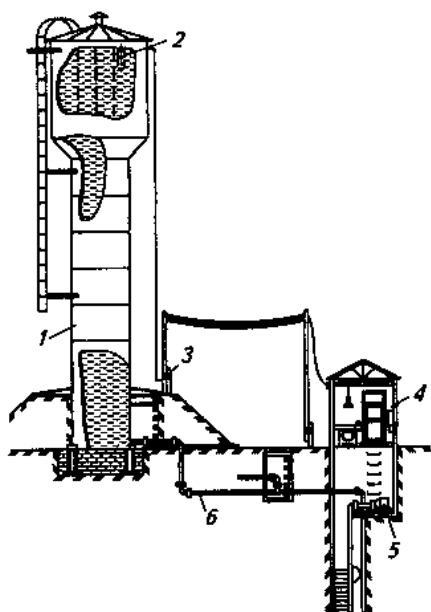
Башни этой конструкции можно использовать без утепления в местностях с зимней температурой до  $-40^{\circ}\text{C}$ , но если выполняются при этом два условия:

- температура воды в водоисточнике не ниже  $4^{\circ}\text{C}$ ;
- обеспечен регулярный водообмен.

Высота напорной башни выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечивалась подача воды в нужном количестве к наиболее удаленному и высоко расположенному водопотребителю.

Вместимость резервуара определяется с учетом расхода воды и времени работы насосной установки в течение суток. За время работы насосной установки в резервуаре должен накопиться аварийный запас воды на случай временного прекращения работы насосной установки, а также противопожарный запас воды  $W_{\text{п}}$ . Обычно резервуар выбирают вместимостью, равной 15...20% от максимального суточного расхода воды.

В нижней части ствола башни, непосредственно над фундаментом, делают земляную отсыпку и смотровой колодец для периодического осмотра состояния запорно-регулирующих устройств и проведения ремонтных работ. Сверху резервуар с водой закрыт крышкой с люком.



- 1 – ствол (опора);
- 2 – резервуар с датчиком уровня;
- 3 – пост управления;
- 4 – станция управления;
- 5 – насосная установка;
- 6 – напорная труба

Рисунок 8.8 – Водонапорная башня  
А.А. Рожновского

Рабочий процесс: в водонапорную башню воду подают по напорному трубопроводу 6 с помощью насоса водонасосной установки 5. По мере заполнения водой башни уровень ее повышается.

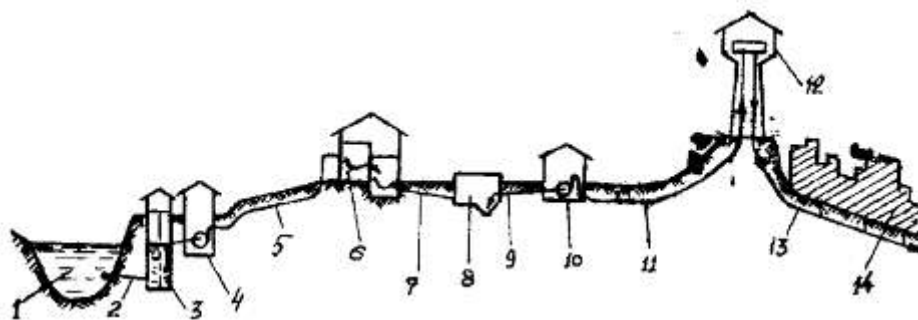
В случае использования электроконтактного манометра (ЭКМ) в системе автоматического управления работой башни включение и выключение

насоса происходит следующим образом. Как только стрелка ЭКМ достигнет отметки  $p_{max}$ , тут же размыкается цепь питания электродвигателя и насос отключается. По мере разбора воды из башни и уменьшения давления до отметки  $p_{min}$  все происходит в обратной последовательности – насос включается.

В процессе эксплуатации водонапорной башни необходимо периодически спускать осадки через грязевую трубу, промывать и дезинфицировать башню.

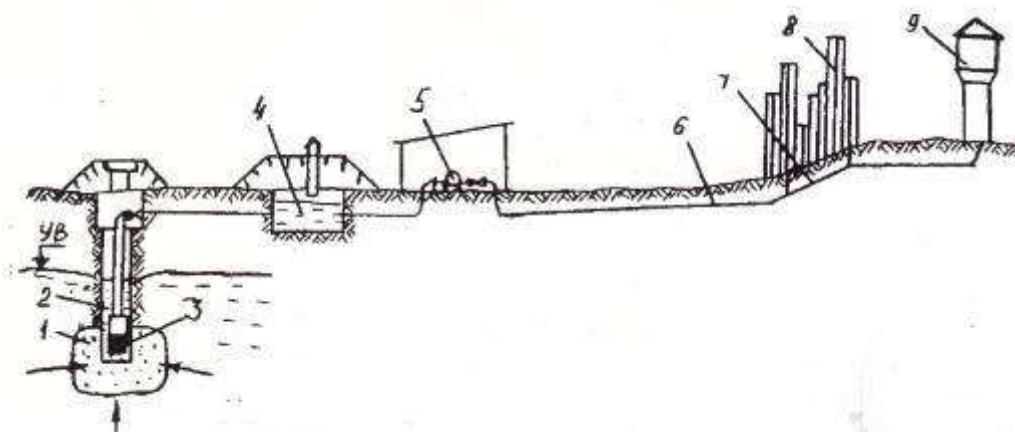
В зависимости от места расположения водонапорной башни различают две схемы систем водоснабжения:

- с проходной башней (рис. 8.9);
- с контррезервуаром (рис. 8.10).



- 1 – водоисточник; 2 – самотечная линия; 3 – береговой колодезь;  
 4 – насосная станция I-го подъема; 5 – водовод I-го подъема; 6 – очистные сооружения;  
 7, 9 – водоводы; 8 – резервуар чистой воды (РВЧ); 10 – насосная станция II-го подъема;  
 11 – водовод II-го подъема; 12 – водонапорная башня; 13 – разводящая сеть;  
 14 – водопотребитель

Рисунок 8.9 – Схема водоснабжения из поверхностного источника с проходной водонапорной башней



- 1 – водоисточник; 2 – водоприемная камера; 3 – насос; 4 – РВЧ;  
 5 – насосная станция II-го подъема; 6 – напорные водоводы; 7 – распределительная сеть;  
 8 – водопотребитель; 9 – водонапорная башня

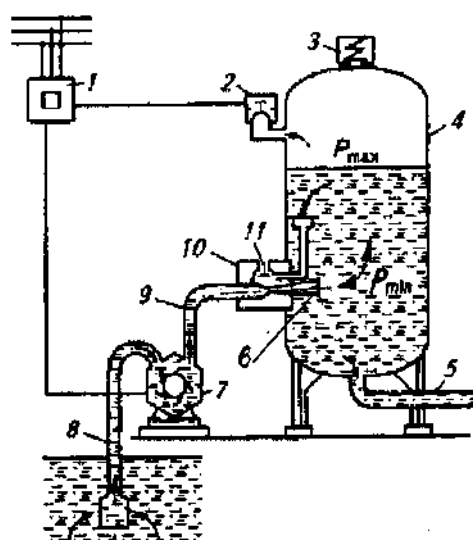
Рисунок 8.10 – Схемы водоснабжения из подземного источника

*Водоподъемная установка типа ВУ-7-65 предназначена для подъема воды из поверхностных источников. Для подъема воды из подземных источников промышленность выпускает автоматическую водоподъем-*

ную установку ВУ-7-65 с центробежным насосом, подающим воду из буровой скважины.

Устройство (рис. 8.11): в состав агрегата входит воздушно-водяной бак 4, в который вода по напорной трубе 9 подается с помощью насосного агрегата 7. Автоматическое управление работой насосного агрегата осуществляется с помощью реле давления 2. Для разбора воды из котла предназначена напорно-разводящая труба 5. Периодическое пополнение воздушно-водяного бака воздухом производится с помощью струйного регулятора 10.

Принцип работы: когда подача насосного агрегата превышает потребление, избыток воды поступает в котел, воздушная подушка сжимается и давление в котле повышается.



- 1 – станция управления;
- 2 – реле давления;
- 3, 11 – предохранительные клапаны;
- 4 - воздушно-водяной бак;
- 5 – трубопровод; 6 – сопло;
- 7 – насосный агрегат;
- 8 – всасывающая труба;
- 9 – нагнетательная труба;
- 10 – струйный регулятор

Рисунок 8.11 – Схема водоподъемной установки ВУ-5-30

Как только давление в котле при его наполнении достигнет расчетного значения  $p_{max}$ , реле давления 2 разомкнет электрическую цепь магнитного пускателя, насосный агрегат 7 выключится. В случае, когда водопотребление больше подачи или насос не работает, вода под давлением воздуха поступает из котла потребителю и давление воздушной подушки снижается. При уменьшении давления до  $p_{min}$  контакты реле замкнутся, и включится насос, который снова начнет подавать воду в котел.

Во время работы водокачки объем воздушной подушки в котле вследствие неплотностей соединений и растворения воздуха в воде уменьшается. Это приводит к увеличению частоты включения установки и ускоряет износ электродвигателя и насоса. Для автоматического заполнения котла воздухом служит струйный регулятор 10.

### Основные методы и технологические процессы обработки воды

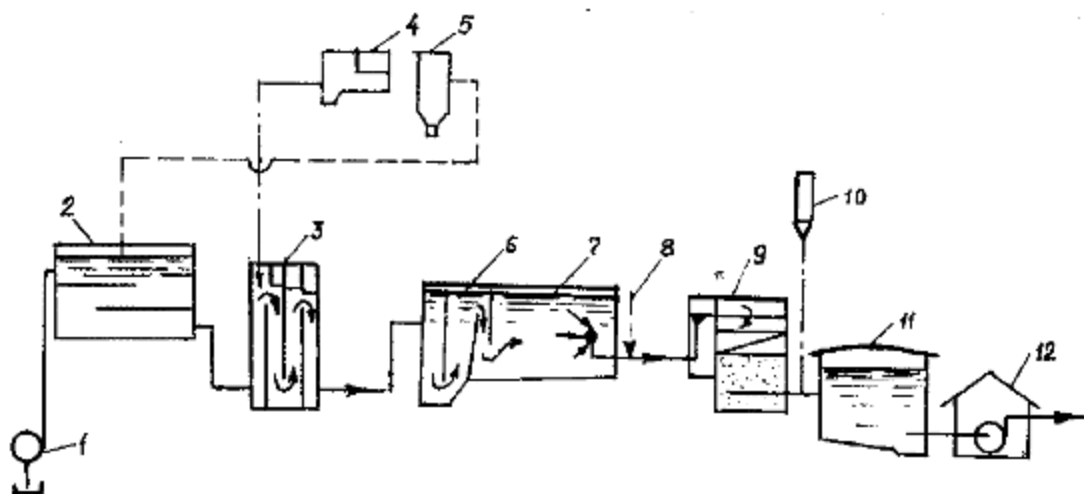
Питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства. Качество питьевой воды должно соответствовать гигиеническим нормативам перед ее поступлением в распределительную сеть, а также в точках водоразбора наружной и внутренней водопроводной сети. Безопасность питьевой воды в эпидемическом отношении опреде-

ляется ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям с учетом требований, регламентируемых СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества». Основные показатели качества питьевой воды приведены в Приложении 19.

С учетом требований СанПиНа вода из естественных водоисточников должна подвергаться предварительной водоподготовке, которая представляет собой комплекс физических, химических и биологических методов изменения ее первоначального состава путем очистки от ряда нежелательных и вредных примесей, а также путем обогащения недостающими ингредиентами. Все многообразие методов обработки воды можно разделить на следующие группы:

- улучшение органолептических свойств, в том числе: осветление, обесцвечивание, дезодорация;
- обеспечение эпидемиологической безопасности, в том числе: хлорирование, озонирование, ультрафиолетовая радиация;
- кондиционирование минерального состава, в том числе: фторирование, обезжелезивание, умягчение и обессоливание.

О с в е т л е н и е воды – это процесс удаления из нее взвешенных примесей с помощью отстойников, фильтров, гидроциклонов и т.д. (рисунки 8.12....8.16). Для ускорения осаждения взвеси в воду вводят химические вещества (коагулянты), которые вместе с взвешенными частицами адсорбируются в виде хлопьев и затем быстро осаждаются, увлекая за собой частицы взвеси.

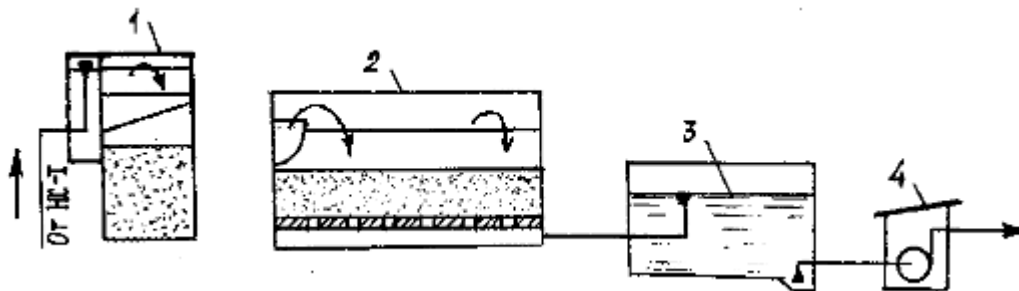


- 1 – насосная станция I-го подъема; 2 – контактный резервуар для дезодорации воды;  
 3 – перегородчатый смеситель; 4 – реагентное хозяйство; 5 – бак угольной пульпы;  
 6 – вихревая камера хлопьеобразования; 7 – горизонтальный отстойник; 8 – ввод реагентов для дезодорации, фторирования и интенсификации процесса фильтрования;  
 9 – скорый фильтр; 10 – установка для обеззараживания воды;  
 11 – резервуар чистой воды; 12 – насосная станция II-го подъема

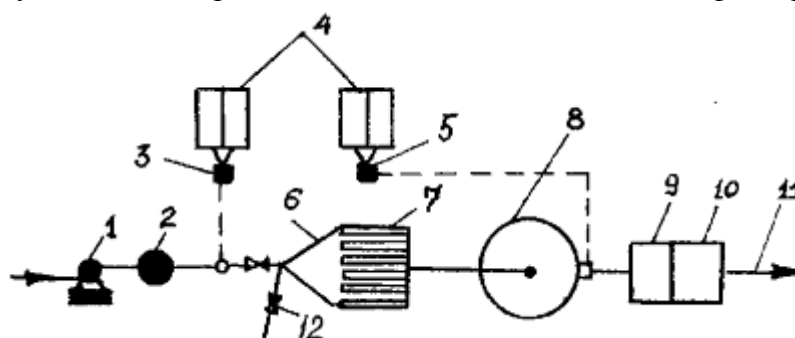
Рисунок 8.12 – Реагентная технологическая схема улучшения качества воды с отстойниками

Обесцвечивание воды осуществляют путем хлорирования, фильтрования через гранулированный активированный уголь и озонированием.

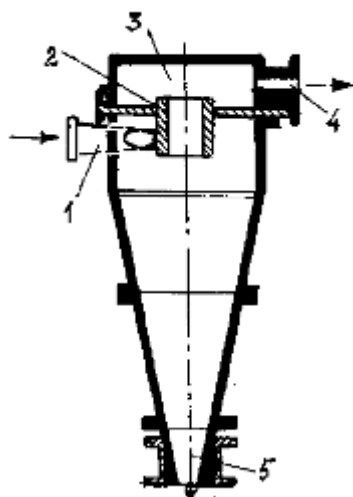
Обезжелезивание, то есть снижение содержания солей железа до регламентируемого СНиПом уровня, выполняется в основном двумя методами: реагентным и безреагентным. Наиболее перспективный безреагентный метод – это вакуумно-эжекционная аэрация и фильтрование. К реагентным относятся: упрощенная аэрация, окисление, напорная флотация, известкование с последующим фильтрованием и т.д.



1 – предварительный скорый фильтр; 2 – медленный фильтр без удаления песка при регенерации; 3 – резервуар чистой воды; 4 – насосная станция II подъема  
Рисунок 8.13 – Безреагентная технологическая схема с фильтрами

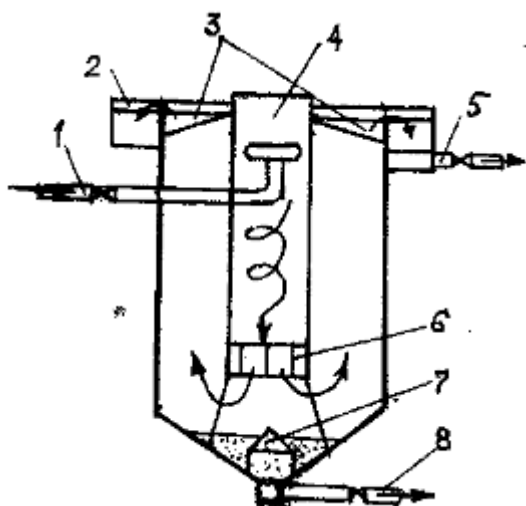


1 – насос; 2 – сетчатый фильтр; 3 и 5 – насосы-дозаторы соответственно раствора коагулянта и гипохлорита натрия; 4 – баки реагентов; 6 – камера хлопьеобразования; 7 – трубчатый отстойник; 8 – напорный осветлительный фильтр; 9 – промывной отсек башни; 10 – регулирующая емкость башни; 11 – подача воды потребителю; 12 – сброс промывной воды  
Рисунок 8.14 – Технологическая схема установки типа «Струя»



1 – входной патрубок; 2 – сливной патрубок с диафрагмой; 3 – камера сбора осветленной воды; 4 – выходной патрубок; 5 – конус для сброса шлама

Рисунок 8.15 – Напорный гидроциклон



1 – подводящая труба; 2 – сборный кольцевой лоток; 3 – радиальные лотки; 4 – водоворотная камера хлопьеобразования; 5 – отвод воды; 6 – гаситель вращательного движения; 7 – отражательный конус; 8 – сброс шлама

Рисунок 8.16 – Вертикальный отстойник с встроенной водоворотной камерой

## Системы подачи и распределения воды

Для транспортирования воды от водоприемного сооружения на территорию водоснабжаемых объектов и распределения ее между потребителями служат *системы подачи и распределения воды*. В их состав входят: насосные станции II подъема, подкачки и регулирования; водоводы и водопроводные сети на территории объекта; регулирующие и запасные емкости.

Для транспортирования и распределения воды между потребителями служат:

- водоводы (напорные и безнапорные);
- водопроводные (распределительные) сети.

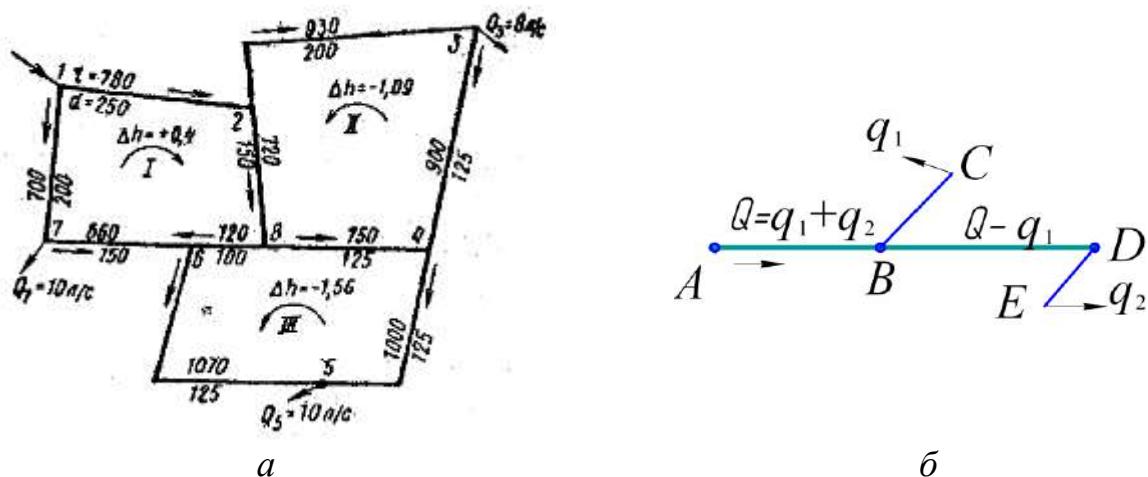
Водоводы в зависимости от места расположения в системе подразделяются на:

- водоводы I подъема – для транспортирования воды от водозабора до очистных сооружений;
- водоводы II подъема – для передачи чистой воды до водопроводной сети.

В отличие от водоводов водопроводная сеть предназначена не только для транспортирования, но и для *распределения* воды потребителям. По начертанию в плане водопроводные сети бывают *разветвленные* (или тупиковые) и *кольцевые* (рис. 8.17).

Тупиковая сеть дешевле, чем кольцевая, но она менее надежна в отношении снабжения водой потребителей. Кольцевая сеть обеспечивает более надежную подачу воды потребителям, а также более благоприятна для гашения гидравлического удара.



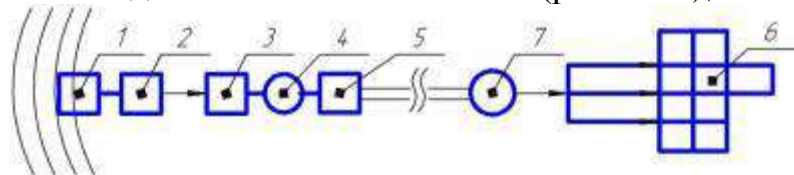


а б  
 A-B-D – магистраль; B-C, D-E – тупиковые отводы  
 а – кольцевая; б – тупиковая  
 Рисунок 8.17 – Распределительная сеть

### Классификация систем водоснабжения

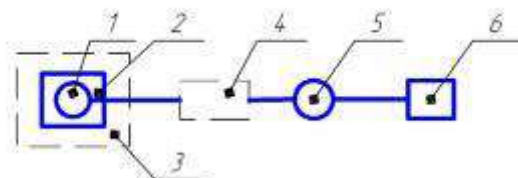
Все многообразие встречающихся на практике систем водоснабжения подразделяют по следующим признакам:

- по виду используемых природных источников – системы, забирающие воду из поверхностных источников (из рек, озери т.д.); из подземных источников и системы смешанного питания;
- по назначению – системы коммунальные, сельскохозяйственные, промышленные и т.д.;
- по территориальному признаку – локальные для одного объекта (рис. 8.19) и групповые для нескольких объектов (рис. 8.18);



1 – водоприемник; 2 – насосная станция I-го подъема; 3 – очистные сооружения;  
 4 – резервуар чистой воды (РЧВ); 5 – насосная станция II-го подъема;  
 6 – распределительная сеть; 7 – водонапорная башня

Рисунок 8.18 – Технологическая схема групповой системы водоснабжения



1 – глубинный насос; 2 – колодец; 3 – санитарная зона; 4 – очистные сооружения;  
 5 – водонапорная башня; 6 – потребитель

Рисунок 8.19 – Технологическая схема локальной системы водоснабжения

- по способам подачи воды – самотечные (гравитационные) и с механической подачей (с помощью насосов);

- по кратности использования потребляемой воды – системы прямоточные, с оборотом воды, с последовательным использованием воды на различных установках.

### **Указания к решению задач**

Задачи в этой теме не связаны с расчетами. Студенты обязаны представить схемы систем водоснабжения, составленные на базе исходных данных. При этом обязательно должно быть приведено обоснование по выбору основных элементов системы с указанием следующих данных:

- тип системы водоснабжения по территориальному признаку;
- назначение системы водоснабжения;
- вид используемых природных источников;
- способ подачи воды;
- тип водоприемного сооружения;
- тип распределительной сети;
- тип схемы водоснабжения по месту расположения водонапорной башни.

Под схемой системы водоснабжения должна быть представлена расшифровка составных её элементов.

### **Пример 21**

Составить и начертить общую схему системы водоснабжения с использованием воды из реки. Водоприемное сооружение предусматривается на пологом берегу. Качество воды не соответствует требованиям СНиПа, поэтому предусмотреть комплексную очистку. Проектируемая система водоснабжения предусматривает подачу воды на территорию фермы, а также нескольких населенных пунктов и перерабатывающего предприятия. Рельеф местности диктует проектирование разводящей сетки с проходной башней.

Дать обоснование по выбору всех составных элементов системы водоснабжения, с учетом суровых климатических условий.

### **Решение**

В соответствии с заданием разрабатываемая система водоснабжения относится к числу групповой системы, предназначенной для обеспечения водой группы объектов, в том числе: МТФ, населенных пунктов и перерабатывающего предприятия.

По назначению системы водоснабжения является сельскохозяйственной, включающей в себя два магистральных водовода и разводящую сеть из нескольких тупиковых отводов.

Для приема воды предполагается соорудить на пологом берегу реки выше населенных пунктов русловый речной водозабор раздельного типа, состоящего из берегового колодца и насосной станции I-го подъема. В береговом колодце за счет сетчатой вертикальной перегородки и обратного фильтра вода будет подвергнута предварительной очистке. Насосами насосной вода по водоводу 1-го подъема будет подаваться, затем на очистные сооружения.

Очистка воды – комплексная с использованием реагентной технологической схемы улучшения качества воды. После очистки предусмотрено хранение воды в резервуаре чистой воды (РЧВ). Из него насосом станции II-го подъема по водоводу II-го подъема вода будет поступать в водонапорную башню Рожновского, установленную на проходе к объектам водопотребления.

Водонапорная башня Рожновского выполняет двойную роль. Во-первых, с ее помощью обеспечивается равномерность работы насосных станций, Во-вторых, в баке ее содержится неприкосновенный запас воды на случай пожара. Кроме того, отличительной особенностью водонапорной башни Рожновского является ее цилиндрическая опора, которая одновременно служит емкостью для воды. В конечном итоге, запас воды в ней по сравнению с водонапорными башнями других конструкций больше практически в два раза.

В качестве водоподъемного оборудования предусмотрены центробежные насосы консольного типа марки К.

Общая схема проектируемой системы водоснабжения представлена на рис. 8.9.

**Задача 116.** Начертить общую схему водоснабжения для сельскохозяйственного населенного пункта, где в качестве водоисточника должен быть использован мощный подземный напорный водный пласт, залегающий на глубине 45 м. Анализ воды показал её повышенную жесткость и содержание в ней железа. Рельеф местности диктует проектирование разводящей водопроводной сети с контррезервуаром. Дать обоснование по выбору всех составных элементов схемы.

**Задача 117.** Начертить общую схему водоснабжения для сельскохозяйственного поселка с механическим водоподъемником, где в качестве водоисточника задействовать реку с пологими берегами, вода которой не отвечает требованиям ГОСТа. Рельеф местности диктует проектирование разводящей водопроводной сети с проходной башней. Дать обоснование по выбору всех составных элементов схемы, наметить водовод и разводящую напорную сеть.

**Задача 118.** Планируется строительство животноводческого объекта, для обеспечения водой которого рекомендовано использование подземных артезианских вод, залегающих на глубине 26 м. Анализ воды показал содержание в ней сероводорода, а также сульфатных и хлористых солей кальция и магния. Рельеф местности диктует проектирование разводящей водопроводной сети с контррезервуаром. Дать обоснование по выбору всех составных элементов схемы, наметить водовод и разводящую напорную сеть.

**Задача 119.** Водохозяйственными расчетами определена возможность использования озера в целях сельскохозяйственного водоснабжения. Начертить общую схему снабжения с-х объекта водой, которая подается потребителю насосной станции. Вода в озере не отвечает требованиям ГОСТа. Дать обоснование по выбору всех составных элементов схемы. Указать водовод и разводящую напорную сеть.

**Задача 120.** Начертить общую схему водоснабжения для сельскохозяйственного населенного пункта, на территории которого находится поверхностный водоисточник – река с устойчивыми крутыми берегами. Воды реки пригодны для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения только после комплексной очистки. Подача воды насосной станции потребителю регулируется водонапорной башней. Рельеф местности диктует проектирование разводящей сети с проходной башни. Дать обоснование по выбору всех составных элементов схемы. Наметить водовод и разводящую напорную сеть.

**Задача 121.** Составить и начертить общую схему водоснабжения для сельскохозяйственного объекта с использованием подземных грунтовых вод, залегающих на глубине 6 м водоносным пластом небольшой мощности, предусмотрев очистку воды и её подачу к объекту потребления насосной станцией. Для регулирования режима работы системы предусматривается строительство водонапорной башни. Рельеф местности диктует проектирование разводящей сети с проходной башни. Дать обоснование по выбору всех составных элементов схемы.

**Задача 122.** В качестве водоисточника для сельскохозяйственного населенного пункта планируется использовать безнапорные подземные воды залегающие на глубине 19 м. По качеству вода отвечает требованиям хозяйственно-питьевого снабжения. Анализ воды, однако, показал её повышенную жесткость. Начертить общую схему водоснабжения для населенного пункта с механическим подъемом, где подача воды потребителю регулируется водонапорной башней, стоящей на проходе. Дать обоснование по выбору всех элементов схемы.

**Задача 123.** Начертить общую схему водоснабжения для поселка и крупного животноводческого комплекса. В качестве водоисточника служит река с пологими берегами, полностью обеспечивающая потребности в воде в течение года. Вода после забора в реке подвергается комплексной очистке и улучшению её качества путем фторирования. Регулирование режима работы системы осуществляется с помощью водонапорной башни.

Дать обоснование по выбору всех элементов схемы. Наметить водовод и разводящую водопроводную сеть. Рельеф местности диктует проектирование системы водоснабжения с контррезервуаром.

**Задача 124.** Для водоснабжения двух поселков и животноводческого комплекса планируется использовать воды реки с крутыми берегами из слабых грунтов. Качество воды не отвечает требованиям хозяйственно-питьевого водоснабжения, в связи с чем требуется провести её комплексную очистку. Система водоснабжения планируется с механическим водоподъемом. Подача воды потребителям регулируется водонапорной башней. Рельеф местности диктует проектирование разводящей водонапорной сети с проходной башней. Начертить общую схему водоснабжения и дать обоснование по выбору всех её составных элементов.

**Задача 125.** Составить и начертить общую схему водоснабжения крупного животноводческого комплекса. В качестве водосточника планируется использовать подземные грунтовые воды, залегающие на глубине 8 м, водоносным пластом достаточной мощности. Для регулирования режима работы системы планируется строительство водонапорной башни. Рельеф местности диктует проектирование разводящей водонапорной сети с проходной башней. Дать обоснование по выбору всех элементов схемы и предусмотреть осветление и обеззараживание воды.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Министерство сельского хозяйства РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пермская государственная сельскохозяйственная академия  
имени академика Д.Н. Прянишникова»

Кафедра «Технологическое  
и энергетическое оборудование»

Расчетно-графическая работа по дисциплине «Гидравлика»

Задание \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Выполнил студент \_\_\_\_\_ гр.  
Специальности \_\_\_\_\_

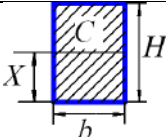
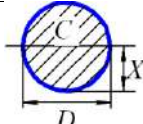
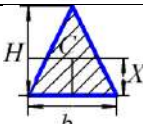
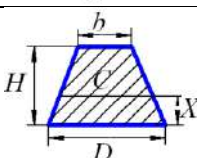
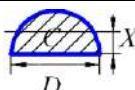
Ф.И.О. \_\_\_\_\_  
Шифр \_\_\_\_\_

Проверил  
доцент кафедры ТЭО Кошман В.С.

Пермь, 20 \_\_\_\_ г

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Положение центра тяжести плоских фигур и формулы моментов инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести

|   |   |
|---|---|
|  | $X = \frac{H}{2}; J_0 = \frac{bH^3}{12}$  |
|  | $X = \frac{D}{2}; J_0 = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{D^4}{20,4}$                  |
|  | $X = \frac{H}{3}; J_0 = \frac{bH^3}{36}$  |
|  | $X = \frac{H}{3}; \frac{2b+a}{a+b}; J_0 = \frac{H^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)}$ |
|  | $X = 0,424 \quad r = \frac{D}{4,71}; J_0 = \frac{D^4}{145,4}$                   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Плотность  $\rho$  и кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  жидкостей [10]

| Жидкость               | $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $\nu, 10^{-4}, \text{м}^2/\text{с}$ |
|------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Бензин автомобильный   | 18                  | 712...761*            | 0,0065                              |
| Бензол                 | 20                  | 876...880             | 0,0007                              |
| Вода пресная           | 20                  | 1000                  | 0,01                                |
| Глицерин безводный     | 20                  | 1260                  | 8,7                                 |
| Гудрон                 | 15                  | 930...950             | -                                   |
| Деготь каменноугольный | 20                  | 1030                  | -                                   |
| Дизельное топливо      | 20                  | 831...861             | 0,018...0,060                       |
| Керосин                | 18                  | 790...860*            | 0,025                               |
| Мазут                  | 80                  | 890...940**           | 0,438...1,18                        |
| Масло промышленное     | 50                  | 880...920             | 0,04...1,18                         |
| Масло льняное          | 20                  | 910...940             | -                                   |
| Масло трансформаторное | 50                  | 886                   | -                                   |
| Масло турбинное        | 50                  | 900                   | 0,28...0,48                         |
| Масло моторное         | 20                  | 886...916             | -                                   |
| Молоко цельное         | 20                  | 1029                  | 0,0174                              |
| Нефть натуральная      | 18                  | 760...900*            | 0,25...1,40                         |
| Патока                 | 18                  | 1450***               | 600                                 |
| Пиво                   | 15                  | 1040                  | -                                   |
| Ртуть                  | 15                  | 13546                 | 0,0011                              |
| Серовуглерод           | 20                  | 1260...1290           | 0,0029                              |
| Скипидар               | 16                  | 870                   | 0,0183                              |
| Спирт:                 |                     |                       |                                     |
| этиловый безводный     | 20                  | 789                   | 0,0151                              |
| метиловый              | 15                  | 810                   | -                                   |
| Эфир этиловый          | 20                  | 715...719             | 0,0039                              |

\* - при  $t = 20^\circ\text{C}$ ; \*\* - при  $t = 15^\circ\text{C}$ ; \*\*\* - при  $t = 0^\circ\text{C}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Коэффициент кинематической вязкости воды  $\nu$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{см}^2/\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{см}^2/\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{см}^2/\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{см}^2/\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu, \text{см}^2/\text{с}$ |
|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 0                   | 0,0179                      | 12                  | 0,0124                      | 24                  | 0,0092                      | 36                  | 0,00706                     | 48                  | 0,00568                     |
| 1                   | 0,0173                      | 13                  | 0,0121                      | 25                  | 0,0089                      | 37                  | 0,00693                     | 49                  | 0,00558                     |
| 2                   | 0,0167                      | 14                  | 0,0117                      | 26                  | 0,0087                      | 38                  | 0,00679                     | 50                  | 0,00549                     |
| 3                   | 0,0162                      | 15                  | 0,0114                      | 27                  | 0,0086                      | 39                  | 0,00666                     | 51                  | 0,00541                     |
| 4                   | 0,0157                      | 16                  | 0,0112                      | 28                  | 0,0084                      | 40                  | 0,00654                     | 52                  | 0,00532                     |
| 5                   | 0,0152                      | 17                  | 0,0109                      | 29                  | 0,0082                      | 41                  | 0,00642                     | 53                  | 0,00524                     |
| 6                   | 0,0147                      | 18                  | 0,0106                      | 30                  | 0,0080                      | 42                  | 0,00630                     | 54                  | 0,00515                     |
| 7                   | 0,0143                      | 19                  | 0,0103                      | 31                  | 0,00783                     | 43                  | 0,00618                     | 55                  | 0,00507                     |
| 8                   | 0,0139                      | 20                  | 0,0101                      | 32                  | 0,00767                     | 44                  | 0,00608                     | 56                  | 0,00499                     |
| 9                   | 0,0135                      | 21                  | 0,0098                      | 33                  | 0,00751                     | 45                  | 0,00597                     | 57                  | 0,00492                     |
| 10                  | 0,0131                      | 22                  | 0,0096                      | 34                  | 0,00736                     | 46                  | 0,00587                     | 58                  | 0,00484                     |
| 11                  | 0,0127                      | 23                  | 0,0094                      | 35                  | 0,00721                     | 47                  | 0,00577                     | 59                  | 0,00477                     |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

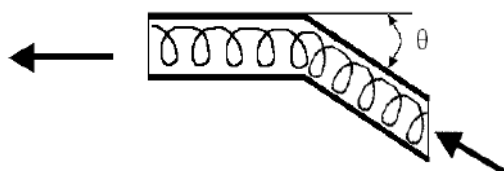
Рекомендуемые значения эквивалентной шероховатости  
для труб из различных материалов

| Материал и вид труб       | Состояние труб                    | $\Delta$ , мм |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Стальные бесшовные        | Новые и чистые                    | 0,015         |
|                           | После нескольких лет эксплуатации | 0,15...0,3    |
| Стальные сварные          | Новые и чистые                    | 0,03...0,1    |
|                           | Умеренно заржавевшие              | 0,3...0,7     |
|                           | Старые заржавевшие                | 0,8...1,5     |
| Чугунные                  | Новые асфальтированные            | 0...0,16      |
|                           | Новые без покрытия                | 0,2...0,5     |
|                           | Бывшие в употреблении             | 0,5...1,5     |
|                           | Очень старые                      | до 3          |
| Асбестоцементные          | Новые                             | 0,05...0,1    |
| Оцинкованные              | Новые и чистые                    | 0,1...0,2     |
| Стальные                  | После нескольких лет эксплуатации | 0,4...0,7     |
| Рукава и шланги резиновые | Новые                             | 0,03          |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Значение коэффициентов местных сопротивлений (в области  
квадратичного сопротивления)

а) поворот без скругления в зависимости от угла поворота  $\theta$



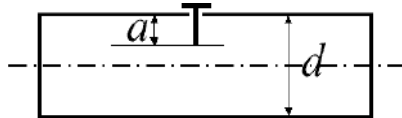
| $\theta$ , град      | 20    | 30   | 45   | 60   | 75   | 90   | 110  | 130  | 150  | 180 |
|----------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| $\zeta_{\text{пов}}$ | 0,125 | 0,16 | 0,32 | 0,56 | 0,81 | 1,19 | 1,56 | 2,16 | 2,67 | 3,0 |

б) кран в зависимости от степени его закрытия



|                      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| $\theta$ , град      | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60  | 65  | 82,5 |
| $\zeta_{\text{пов}}$ | 0,05 | 0,29 | 1,56 | 5,47 | 17,3 | 52,6 | 206 | 486 |      |

в) простая плоская односторонняя задвижка в зависимости от соотношения  $a/d$ .



|                       |       |     |     |     |      |      |      |      |      |   |
|-----------------------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|---|
| $a/d$                 | 0,875 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,1  | 0 |
| $\zeta_{\text{завд}}$ | 97,8  | 35  | 10  | 4,6 | 2,06 | 0,98 | 0,44 | 0,17 | 0,06 | 0 |

г) обратный клапан с сеткой в зависимости от диаметра всасывающих труб

|                     |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d$ , мм            | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 750 |
| $\zeta_{\text{ок}}$ | 12 | 10 | 8  | 7   | 6,5 | 6   | 5,2 | 4,5 | 3,7 | 3,0 | 2,5 | 1,6 |

д) вход в трубу  $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$

е) выход из трубы в резервуар больших размеров  $\zeta_{\text{вых}} = 1,0$

ж) внезапное сужение потока  $\zeta_{\text{вн.суж.}} = 0,5(1 - S_2/S_1)$

з) внезапное расширение потока  $\zeta_{\text{вн.расш.}} = (S_2/S_1 - 1)^2$

и) плавный поворот на  $\theta = 90^\circ$   $\zeta_{\text{пл.пов.}} = 0,1$

к) крутой поворот на  $90^\circ$  в зависимости от диаметра трубопровода

|          |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| $d$ , мм | 50   | 75   | 100  | 125  | 150  | 200  | 250 | 300  | 350  | 400  |
| $\zeta$  | 0,76 | 0,58 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,4 | 0,45 | 0,45 | 0,42 |

л) запорная и регулирующая арматура

|         | Вентиль | Приемный клапан с сеткой | Приемный клапан без сетки | Обратный клапан | Кран проходной | Фильтр |
|---------|---------|--------------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------|
| $\zeta$ | 4,5     | 10                       | 5...6                     | 6,5...5,5       | 2...4          | 10     |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

### Физические свойства жидкостей и твердых тел

| Жидкость             | Плотность $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Модуль упругости<br>$E$ , 10 <sup>9</sup> , Па | Твердые тела          | Модуль упругости<br>$E$ , 10 <sup>9</sup> , Па |
|----------------------|---|--|-----------------------|--|
| Бензин авиац.        | 710...780                               | 1,35   | Сталь углеродист.     | 206  |
| Вода                 | 1000                                    | 2,06   | Сталь легирован.      | 216  |
| Глицерин (безводный) | 12560                                   | 4,464  | Чугун черный          | 152  |
| Керосин              | 790...860                               | 1,275  | Чугун белый           | 134  |
| Спирт этиловый       | 790                                     | 0,98   | Алюминий              |  |
| Нефть                | 760...900                               | 1,12   | Алюминий вальцованный | 68   |
| Дизельное топливо    | 846                                     | 1,35   | Дюралюминий           | 70   |
| Масла:<br>АМГ-10     | 850                                     | 1,305  | Латунь, бронза        | 118  |
| турбинное 30         | 900                                     | 1,72   | Полиэтилен            | 1,4...2,06                                     |
| индустриальное 20    | 891                                     | 1,362  | Асбестоцемент         | 18,73  |
| индустриальное 50    | 910                                     |  | Оргстекло             | 4,1...2,6                                      |
|                      |   |  | Резина                | 0,006...0,017                                  |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Удельное сопротивление  $A_{\text{кв}}$ ,  $\text{с}^2/\text{м}^6$  для стальных труб различных диаметров в области квадратичного сопротивления (при  $v \geq 1,2 \text{ м/с}$ )

| Диаметр ус-<br>ловного<br>прохода $d_y$ ,<br>мм | Водогазопроводные | Электросварные |       | Цельнотянутые |
|---|-------------------|----------------|-------|---------------|
|   | ГОСТ 3262-75      | ГОСТ 10704-76  |       | ГОСТ 10704-76 |
|   |                   | новые          | б/у   |               |
| 8   | 211 000 000       |                |       |               |
| 10  | 31 430 000        |                |       |               |
| 15  | 8 966 000         |                |       |               |
| 20  | 1 660 000         |                |       |               |
| 25  | 427 800           |                |       |               |
| 32  | 91 720            |                |       |               |
| 40  | 44 480            |                |       |               |
| 50  | 11 080            |                |       | 3 686,0       |
| 60  |                   |                |       | 2 292,0       |
| 70  | 3 009             |                |       |               |
| 75  |                   |                |       | 929,4         |
| 80  | 1 167             |                |       | 454,3         |
| 90  | 529,4             |                |       |               |
| 100   | 281,3             | 119,8          | 267   | 172,9         |
| 125   | 86,22             | 53,88          | 106   | 76,36         |
| 150   | 33,94             | 22,04          | 45    | 30,65         |
| 175   |                   | 15,03          | 19    | 20,79         |
| 200   |                   | 5,149          | 9,27  | 6,959         |
| 250   |                   | 2,187          | 2,58  | 2,187         |
| 300   |                   | 0,8466         | 0,96  | 0,8466        |
| 350   |                   | 0,3731         | 0,41  | 0,3731        |
| 400   |                   | 0,1859         | 0,206 | 0,1859        |
| 450   |                   | 0,09928        | 0,109 | 0,09928       |
| 500   |                   | 0,05784        | 0,062 | 0,05784       |
| 600   |                   |                |       | 0,02262       |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Удельные сопротивления  $A$  ( $\text{с}^2/\text{м}^6$ ) для неметаллических труб различных диаметров при скорости  $v = 1 \text{ м/с}$

| Диаметр условного прохода $d_y$ , мм | Асбестоцементные ГОСТ 539-80 класса |         | Пластмассовые МРТУ-6-05-917-7 типа |        |         | Полиэтиленовые типа ГГОСТ 1899-73 |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|------------------------------------|--------|---------|-----------------------------------|
|                                      | ВТ3;6;9                             | ВТ12    | СЛ                                 | С      | Т       |                                   |
| 20                                   |                                     |         |                                    |        | 2695000 |                                   |
| 25                                   |                                     |         |                                    |        | 757000  |                                   |
| 32                                   |                                     |         |                                    |        | 204800  |                                   |
| 40                                   |                                     |         |                                    |        | 63290   |                                   |
| 50                                   | 6851                                |         |                                    |        | 19780   | 6051                              |
| 60                                   |                                     |         |                                    |        |         | 2431                              |
| 63                                   |                                     |         |                                    |        | 5929    |                                   |
| 75                                   | 835,3                               |         |                                    |        | 2390    |                                   |
| 80                                   |                                     |         |                                    |        |         | 927                               |
| 90                                   |                                     |         |                                    |        | 926,8   |                                   |
| 100                                  | 187,7                               |         |                                    |        |         | 324                               |
| 110                                  |                                     |         |                                    |        | 323,9   |                                   |
| 125                                  | 76,08                               |         |                                    |        | 166,7   | 93                                |
| 140                                  |                                     |         |                                    |        | 91,62   |                                   |
| 150                                  | 31,55                               | 39,54   |                                    |        |         | 45,90                             |
| 160                                  |                                     |         |                                    |        | 45,91   |                                   |
| 180                                  |                                     |         |                                    |        | 24,76   |                                   |
| 200                                  | 6,898                               | 8,632   |                                    |        | 14,26   | 5,07                              |
| 225                                  |                                     |         |                                    |        | 7,715   |                                   |
| 250                                  | 2,75                                | 2,227   |                                    |        | 4,454   | 1,31                              |
| 280                                  |                                     |         |                                    |        | 2,459   |                                   |
| 300                                  | 0,914                               | 1,083   |                                    |        |         | 0,71                              |
| 315                                  |                                     |         |                                    | 0,8761 |         |                                   |
| 350                                  | 0,4342                              | 0,5115  |                                    |        |         |                                   |
| 355                                  |                                     |         |                                    | 0,4662 |         |                                   |
| 400                                  | 0,2171                              | 0,2579  |                                    | 0,2502 |         |                                   |
| 450                                  |                                     |         |                                    | 0,1351 |         |                                   |
| 500                                  | 0,07138                             | 0,08489 | 0,06322                            |        |         |                                   |
| 560                                  |                                     |         | 0,03495                            |        |         |                                   |
| 630                                  |                                     |         | 001889                             |        |         |                                   |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Удельное сопротивление  $A$ ,  $\text{с}^2/\text{м}^6$  для чугунных труб различных диаметров в области квадратичного сопротивления ( $v \geq 1,2 \text{ м/с}$ )

| Условный проход $d_y$ , мм | Трубы, изготавливаемые по ГОСТ |                               |                               |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                            | 9583-75                        | 5525-75                       |                               |
|                            |                                | Новые                         | Бывшие в эксплуатации         |
|                            | $A$ , $\text{с}^2/\text{м}^6$  | $A$ , $\text{с}^2/\text{м}^6$ | $A$ , $\text{с}^2/\text{м}^6$ |
| 50                         | 11540                          | 13360                         |                               |
| 80                         | 953,4                          |                               |                               |
| 100                        | 311,7                          | 339,1                         | 368                           |
| 125                        | 96,72                          | 103,5                         | 111                           |
| 150                        | 37,11                          | 39,54                         | 41,8                          |
| 200                        | 8,092                          | 8,608                         | 9,03                          |
| 250                        | 2,528                          | 2,638                         | 2,75                          |
| 300                        | 0,9485                         | 0,9863                        | 1,03                          |
| 350                        | 0,4365                         | 0,4368                        | 0,46                          |
| 400                        | 0,2189                         | 0,2191                        | 0,233                         |
| 450                        | 0,1186                         | 0,1187                        | 0,119                         |
| 500                        | 0,06778                        | 0,6782                        | 0,068                         |
| 600                        | 0,02596                        | 0,02596                       | 0,026                         |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Значение поправочных коэффициентов  $K$  к расчетным значениям удельных сопротивлений  $A$  для водопроводных труб.

| Скорость $v$ , м/с | Материал труб    |                  |               |
|--------------------|------------------|------------------|---------------|
|                    | Стальн. и чугун. | Асбестоцементные | Пластмассовые |
| 0,2                | 1,41             | 1,308            | 1,439         |
| 0,25               | 1,33             | 1,257            | 1,368         |
| 0,3                | 1,28             | 1,217            | 1,313         |
| 0,35               | 1,24             | 1,185            | 1,268         |
| 0,4                | 1,2              | 1,158            | 1,23          |
| 0,45               | 1,175            | 1,135            | 1,198         |
| 0,5                | 1,15             | 1,115            | 1,17          |
| 0,55               | 1,13             | 1,098            | 1,145         |
| 0,6                | 1,115            | 1,082            | 1,123         |
| 0,65               | 1,1              | 1,069            | 1,102         |
| 0,7                | 1,085            | 1,056            | 1,084         |
| 0,75               | 1,07             | 1,045            | 1,067         |
| 0,8                | 1,06             | 1,034            | 1,052         |
| 0,85               | 1,05             | 1,025            | 1,043         |
| 0,9                | 1,04             | 1,016            | 1,024         |
| 1,0                | 1,03             | 1,0              | 1,0           |
| 1,1                | 1,015            | 0,986            | 0,981         |
| 1,2                | 1,0              | 0,974            | 0,96          |
| 1,3                |                  | 0,963            | 0,943         |
| 1,4                |                  | 0,953            | 0,926         |
| 1,5                |                  | 0,944            | 0,912         |
| 1,6                |                  | 0,936            | 0,899         |
| 1,7                |                  | 0,928            | 0,877         |
| 1,8                |                  | 0,922            | 0,876         |
| 1,9                |                  | 0,916            | 0,865         |
| 2,0                |                  | 0,91             | 0,855         |
| 2,1                |                  | 0,905            | 0,846         |
| 2,2                |                  | 0,9              | 0,837         |
| 2,3                |                  | 0,895            | 0,828         |
| 2,4                |                  | 0,891            | 0,821         |
| 2,5                |                  | 0,887            | 0,813         |
| 2,6                |                  | 0,883            | 0,806         |
| 2,7                |                  | 0,88             | 0,799         |
| 2,8                |                  | 0,876            | 0,792         |
| 2,9                |                  | 0,873            | 0,786         |
| 3,0                |                  | 0,87             | 0,78          |
| 3,2                |                  | 0,864            |               |
| 3,4                |                  | 0,859            |               |
| 3,6                |                  | 0,855            |               |
| 3,8                |                  | 0,85             |               |
| 4,0                |                  | 0,846            |               |

# ПРИЛОЖЕНИЕ 18

## Основные технические параметры шестеренных гидромашин

| Показатели                           | Марки насосов |       |        |        |        |        |
|--------------------------------------|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                                      | НШ-4          | НШ-6  | НШ-10  | НШ-32  | НШ-40  | НШ-46  |
| Рабочий объем: см <sup>3</sup> /об   | 4             | 6,3   | 10     | 31,5   | 40     | 45,7   |
| Давление на выходе, МПа: номинальное | 20            | 20    | 16     | 16     | 16     | 16     |
| максимальное                         | 25            | 25    | 20     | 20     | 20     | 20     |
| Давление на входе, МПа: минимальное  | 0,08          | 0,074 | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   |
| максимальное                         | 0,15          | 0,15  | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,15   |
| Частота вращения, об/мин номинальная | 2400          | 1980  | 2400   | 1820   | 1500   | 1500   |
| минимальная                          | 1200          | 720   | 960    | 1200   | 1200   | 1200   |
| максимальная                         | 3000          | 2520  | 3000   | 2400   | 1920   | 1920   |
| Номинальная мощность, кВт КПД:       | 3,9           | 6,0   | 7,5    | 17,6   | 20,9   | 24     |
| объемный                             | 0,9           | 0,91  | 0,92   | 0,94   | 0,92   | 0,92   |
| механический                         | 0,9           | 0,91  | 0,9    | 0,91   | 0,9    | 0,9    |
| Общий                                | 0,8           | 0,82  | 0,82   | 0,83   | 0,82   | 0,82   |
| Масса, кг                            | 1,7           | 2,13  | 2,48   | 6,4    | 6,8    | 7,0    |
| Показатели                           | Марки насосов |       |        |        |        |        |
|                                      | НШ-50         | НШ-71 | НШ-100 | НШ-140 | НШ-250 | НШ-400 |
| Рабочий объем: см <sup>3</sup> /об   | 49,1          | 69,7  | 98,8   | 140    | 250    | 400    |
| Давление на выходе, МПа: номинальное | 16            | 16    | 16     | 16     | 16     | 16     |
| максимальное                         | 20            | 20    | 20     | 20     | 20     | 20     |
| Давление на входе, МПа: минимальное  | 0,08          | 0,08  | 0,08   | 0,08   | 0,08   | 0,08   |
| максимальное                         | 0,15          | 0,15  | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,15   |
| Частота вращения, об/мин номинальная | 1920          | 1500  | 1500   | 1500   | 1500   | 900    |
| минимальная                          | 960           | 960   | 960    | 960    | 960    | 750    |
| максимальная                         | 2400          | 1920  | 1920   | 1920   | 1920   | 1170   |
| Номинальная мощность, кВт КПД:       | 28,2          | 30,53 | 43,15  | 60     | 106,2  | 170    |
| объемный                             | 0,92          | 0,94  | 0,94   | 0,94   | 0,94   | 0,94   |
| механический                         | 0,9           | 0,91  | 0,91   | 0,91   | 0,91   | 0,91   |
| общий                                | 0,82          | 0,85  | 0,85   | 0,85   | 0,85   | 0,85   |
| Масса, кг                            | 7,47          | 16,8  | 16,8   | —      | 44     | 45     |

| Показатели                               | Марки гидромоторов |          |          |          |           |
|--|--------------------|----------|----------|----------|-----------|
|  | ГМШ-10М            | ГМШ-50-2 | ГМШ-32-3 | ГМШ-50-3 | ГМШ-100-3 |
| Рабочий объем, см <sup>3</sup> /об.      | 10                 | 49,1     | 32       | 50       | 100       |
| Рабочие давление, МПа:                   |                    |          |          |          |           |
| Номинальное                              | 10                 | 14       | -        | -        | -         |
| Максимальное                             | 12,5               | 16       | 17,5     | 17,5     | 17,5      |
| Частота вращения вала, с <sup>-1</sup> : |                    |          |          |          |           |
| Номинальная                              | 63                 | 25       | 25       | 25       | 25        |
| Максимальная                             | 80                 | 32       | 32       | 32       | 32        |
| Минимальная                              | 12,5               | 8,33     | 8,33     | 8,33     | 8,33      |
| Номинальная мощность, кВт                | -                  | -        | 10,7     | 16,6     | 32,9      |
| Номинальный крутящий момент, Нм          | 13,5               | 93       | 69,7     | 108      | 213,8     |
| КПД, %                                   | 0,78               | 0,78     | 0,8      | 0,8      | 0,8       |
| Масса, кг                                | 2,45               | 6,2      | 6,5      | 7,3      | 16,7      |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 19

Основные показатели качества питьевой воды в соответствии с требованиями СанПиН

2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к  
качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения.

### Контроль качества»

| Показатели                          | Единицы измерения                            | Нормативы (предельно допустимые концентрации (ПДК)), не более | Показатели вредности | Класс опасности |
|-------------------------------------|--|---|----------------------|-----------------|
| Запах                               | Баллы  | 2   |                      |                 |
| Привкус                             | Баллы  | 2   |                      |                 |
| Цветность                           | Градусы                                      | 20(35)*   |                      |                 |
| Мутность                            | ЕМФ (единицы мутности по Формазину) или мг/л | 1,5(2)*   |                      |                 |
| Общая жесткость                     | Мг-экв./л                                    | 7,0/(10)*   |                      |                 |
| Общая минерализация (сухой остаток) | Мг/л   | В пределах 6-9  |                      |                 |
| Водородный показатель               | Единицы pH                                   | 1000(1500)**  |                      |                 |
| <i>Неорганические вещества</i>      |  |   |                      |                 |
| Бериллий, Be                        | Мг/л   | 0,0002  | с.-т.                | 1               |
| Железо, Fe                          | Мг/л   | 0,3(1,0)**  | орг.                 | 3               |
| Нитраты                             | Мг/л   | 45  | с.-т.                | 3               |
| Ртуть, Hg                           | Мг/л   | 0,0005  | с.-т.                | 1               |
| Хлор                                | Мг/л   |   |                      |                 |
| -остаточный свободный               | Мг/л   | В пределах 0,3-0,5  | орг.                 | 3               |
| - остаточный связанный              | Мг/л   | В пределах 0,8-1,2  | орг.                 |                 |
| Хлороформ (при хлорировании воды)   | Мг/л   | 0,2**   | с.-т.                | 2               |
| <i>Органические вещества</i>        |  |   |                      |                 |
| Гамма - ГЦХЗ (линдап)               | Мг/л   | 0,002**   | с.-т.                |                 |
| ДДТ (сумма изолиров)                | Мг/л   | 0,002**   | с.-т.                |                 |

Примечания:

\* Лимитирующий признак вредности вещества по которому установлен норматив: «с.-т.» - санитарно-токсикологический, «орг» - органолептический.

\*\* Величина, указанная в скобках, может быть установлена по постановлению главного государственного санитарного врача по соответствующей территории для конкретной системы водоснабжения на основании оценки санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки.

\*\*\*Нормативы приняты в соответствии с рекомендациями ВОЗ.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 20

| Предпоследняя цифра шифра | Последняя цифра шифра                   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|                           | 0                                       | 1                                       | 2                                       | 3                                       | 4                                       | 5                                       | 6                                       | 7                                       | 8                                       | 9                                       |
| 0                         | 5; 90<br>50; 100<br>55; 107<br>70; 116  | 1; 90<br>50; 101<br>53; 114<br>85; 116  | 6; 89<br>36; 105<br>53; 106<br>69; 120  | 11; 87<br>26; 96<br>68; 108<br>71; 121  | 16; 87<br>26; 97<br>51 106<br>84; 116   | 21; 88<br>27; 98<br>67; 106<br>83; 125  | 2; 89<br>36; 96<br>52; 107<br>80; 122   | 7; 90<br>49; 99<br>60; 108<br>78; 123   | 12; 92<br>33; 102<br>57; 109<br>76; 124 | 17; 94<br>29; 103<br>54; 110<br>74; 125 |
| 1                         | 3; 91<br>27; 100<br>36; 107<br>81; 125  | 8; 86<br>26; 97<br>57; 109<br>80; 117   | 13; 94<br>41; 104<br>58; 107<br>71; 125 | 18; 95<br>31; 101<br>63; 113<br>76; 119 | 23; 91<br>50; 103<br>52; 108<br>69; 117 | 4; 93<br>32; 101<br>66; 111<br>71; 124  | 9; 95<br>38; 102<br>54; 112<br>73; 116  | 14; 94<br>46; 98<br>59; 113<br>76; 117  | 19; 92<br>34; 97<br>60; 114<br>79; 118  | 24; 90<br>28; 105<br>56; 115<br>82; 119 |
| 2                         | 10; 92<br>32; 99<br>53; 115<br>69; 120  | 15; 87<br>49; 102<br>62; 106<br>75; 118 | 20; 86<br>46; 103<br>59; 108<br>76; 117 | 25; 94<br>36; 98<br>58; 114<br>81; 117  | 15; 86<br>45; 96<br>54; 109<br>70; 118  | 25; 87<br>40; 97<br>65; 107<br>71; 123  | 24; 95<br>42; 105<br>56; 115<br>72; 121 | 23; 94<br>43; 104<br>57; 113<br>73; 122 | 22; 93<br>35; 103<br>63; 111<br>84; 116 | 21; 92<br>27; 102<br>58; 109<br>83; 118 |
| 3                         | 20; 93<br>37; 98<br>58; 108<br>74; 124  | 19; 88<br>27; 105<br>53; 111<br>70; 119 | 18; 91<br>50; 100<br>60; 109<br>81; 122 | 17; 88<br>41; 99<br>53; 113<br>72; 118  | 16; 88<br>40; 98<br>55; 110<br>85; 119  | 15; 93<br>37; 103<br>52; 114<br>84; 122 | 14; 92<br>44; 102<br>61; 112<br>83; 117 | 13; 95<br>40; 105<br>51; 110<br>70; 119 | 12; 94<br>49; 104<br>66; 108<br>72; 121 | 11; 93<br>46; 103<br>60; 106<br>74; 123 |
| 4                         | 10; 94<br>42; 97<br>63; 114<br>79; 121  | 9; 89<br>48; 104<br>58; 107<br>84; 120  | 8; 87<br>49; 99<br>57; 110<br>70; 124   | 7; 93<br>46; 102<br>67; 109<br>77; 120  | 6; 89<br>35; 99<br>68; 109<br>76; 120   | 5; 90<br>42; 100<br>53; 110<br>78; 121  | 4; 91<br>46; 101<br>66; 106<br>80; 124  | 3; 93<br>37; 103<br>61; 107<br>82; 122  | 2; 91<br>47; 101<br>65; 108<br>84; 120  | 1; 89<br>44; 99<br>62; 110<br>85; 119   |
| 5                         | 2; 95<br>47; 96<br>54; 109<br>84; 117   | 7; 90<br>28; 103<br>63; 112<br>79; 125  | 12; 92<br>48; 98<br>62; 111<br>71; 119  | 17; 88<br>49; 105<br>62; 112<br>82; 122 | 22; 87<br>30; 97<br>61; 111<br>70; 116  | 3; 89<br>47; 99<br>58; 112<br>71; 125   | 8; 92<br>48; 102<br>67; 110<br>72; 117  | 13; 88<br>34; 98<br>65; 112<br>73; 124  | 18; 90<br>45; 100<br>61; 114<br>75; 118 | 23; 91<br>42; 101<br>64; 115<br>77; 123 |
| 6                         | 4; 86<br>28; 105<br>59; 113<br>85; 118  | 9; 91<br>47; 102<br>68; 108<br>74; 124  | 14; 88<br>47; 102<br>67; 115<br>72; 125 | 19; 89<br>44; 102<br>57; 107<br>73; 122 | 24; 90<br>27; 100<br>60; 112<br>79; 116 | 5; 91<br>28; 101<br>63; 113<br>81; 117  | 10; 92<br>47; 102<br>66; 106<br>83; 123 | 15; 93<br>31; 103<br>68; 107<br>77; 121 | 20; 87<br>43; 97<br>57; 108<br>76; 119  | 25; 93<br>40; 103<br>66; 109<br>75; 117 |
| 7                         | 6; 87<br>33; 104<br>64; 110<br>80; 123  | 11; 92<br>27; 101<br>67; 113<br>69; 123 | 16; 93<br>42; 101<br>56; 114<br>73; 118 | 21; 80<br>39; 99<br>52; 110<br>78; 124  | 7; 86<br>30; 96<br>59; 113<br>72; 116   | 12; 93<br>30; 103<br>68; 114<br>74; 117 | 17; 94<br>46; 104<br>65; 106<br>76; 118 | 22; 93<br>28; 103<br>64; 107<br>78; 119 | 8; 92<br>41; 102<br>53; 111<br>80; 120  | 13; 91<br>38; 101<br>67; 113<br>82; 121 |
| 8                         | 9; 88<br>38; 103<br>54; 112<br>75; 122  | 14; 93<br>46; 100<br>62; 109<br>83; 122 | 19; 94<br>37; 97<br>61; 113<br>78; 121  | 24; 87<br>34; 96<br>53; 113<br>83; 119  | 10; 90<br>33; 104<br>55; 112<br>84; 117 | 15; 94<br>32; 103<br>55; 108<br>81; 119 | 20; 88<br>45; 102<br>60; 110<br>78; 121 | 25; 86<br>26; 101<br>60; 114<br>75; 123 | 11; 90<br>45; 97<br>67; 108<br>73; 125  | 16; 95<br>36; 104<br>64; 115<br>70; 118 |
| 9                         | 10; 89<br>43; 102<br>59; 111<br>70; 121 | 15; 94<br>45; 99<br>57; 114<br>78; 121  | 20; 93<br>32; 98<br>66; 112<br>83; 117  | 25; 86<br>29; 104<br>58; 11<br>72; 120  | 11; 91<br>36; 101<br>66; 111<br>71; 119 | 16; 95<br>34; 105<br>53; 109<br>73; 120 | 21; 87<br>44; 97<br>54; 112<br>75; 121  | 12; 89<br>30; 99<br>56; 112<br>76; 125  | 17; 95<br>44; 105<br>66; 113<br>79; 124 | 22; 88<br>34; 98<br>65; 114<br>82; 123  |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Примерная программа дисциплины «Гидравлика». Направление подготовки 110800 – Агроинженерия. Квалификация (степень) – бакалавр. – М.: УМО вузов по агроинженерному образованию, 2012. – 16с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидропривод/ Под ред. С.П. Стесина. – М.: Недра, 1991. – 156 с.
3. Инженерная гидравлика/ Под ред. Б.В. Ухина – М.: АСВ, 2007. – 343 с.
4. Каверзин С.В. Сборник задач по гидравлике и гидравлическому приводу. – Красноярск: Офсет, 1999. – 35 с.
5. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация.- М.: Стройиздат, 2000. – 398 с.
6. Кошман В.С. Аэрогидромеханика. Конспект лекций. Ч.1. Основы гидравлики и теории насосов.– Пермь: ПВИ РВ, 1990.
7. Кошман В.С. Машкарева И.П. Основы теории и особенности подбора насосов. – Пермь: ПГСХА, 2012.
8. Кудинов В.А. Гидравлика. – М.: Высшая школа, 2008. – 198 с.
9. Лапшев Н.Н. Гидравлика. – М.: Академия, 2007. – 269 с.
10. Машкарева И.П. Гидропривод в сельскохозяйственной технике. Пермь, 1988.
11. Мацевичус Ю.Ю. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод. МУ и контрольные задания для студентов-заочников инженерно-технических специальностей ВУЗов. – М., 1984.
12. Метревели В.Н. Сборник задач по курсу гидравлика с решениями. – М.: Высшая школа, 2008. – 191 с.
13. Насосы центробежные консольного типа 1К и агрегаты электронасосные на их основе. Руководство по эксплуатации Н49.899.00.000 РЭ.
14. Николадзе Г.И. Водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1999.
15. Сабашвили Р.Г. Гидравлика и гидравлические машины. МУ по изучению дисциплины и задания для контрольных работ. – М., 1994.
16. Соколова В.И. Стандарт предприятия. – Пермь: ПГСХА, 2010.
17. Сборник задач по гидравлике. Уч. пособие для вузов/ Под ред. В.А. Большакова, Киев: Вища школа, 1979.
18. ГОСТР 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.