КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Л.Х. Бреслер
Д.И. Петрова

ГИДРАВЛИКА И ГИДРОМЕХАНИКА НЕФТИ И ГАЗА

Часть 3

Задачи и примеры решения

Учебно-методическое пособие

Казань

2024

УДК 532 (075.8)
ББК 22.253

Принято на заседании кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов ИГиНГТ КФУ (протокол № 6 от 18 апреля 2024г.)

Рецензенты:
канд.техн. наук, заместитель директора
Казанского филиала ФБУ «ГКЗ» **Бакиров А.И.**
кандидат наук, доцент **Султанов В.А.**

Бреслер Л.Х., Петрова Д.И.
Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика. Часть 3. Задачи и примеры решения:учебно-методическое пособие /Л.Х. Бреслер, Д.И. Петрова.– Казань: КФУ, 2024.–78 с.

В пособии рассмотрены основные вопросы курса «Гидравлика и гидромеханика нефти и газа»: гидростатика; давление в покоящейся жидкости; определение давления на стенки; особенности движения жидкости по трубам; виды и характеристики движения; основные законы гидромеханики; расчет простыхи сложных трубопроводов; гидравлический удар; кавитация.

Представлены задачи для освоения материала по дисциплине «Гидравлика и гидромеханика нефти и газ». Подбор задач охватывает круг вопросов, рассматриваемых в учебном курсе, служит более полному освоению материала студентами.

Учебно-методическое пособие 2-е, переизданное, предназначено в качестве учебно-методического пособия для студентов нефтяных и технических вузов, а также специалистам, занимающимся эксплуатацией систем водоснабжения, занятых в нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности.

УДК 532 (075.8)
ББК 22.253

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ

Данная дисциплина включена в раздел «Б1. В.04 Дисциплины (модули)» основной профессиональной образовательной программы 21.03.01 «Нефтегазовое дело (Разработка месторождений углеводородов)» и относится к вариативной части.

Целью освоения дисциплины является формирование необходимой начальной базы знаний о законах равновесия и движения жидкостей, приобретение студентами навыков расчета сил, действующих на стенки резервуаров, гидравлического расчета трубопроводов различного назначения для стационарных и нестационарных режимов течения жидкостей, задач борьбы с осложнениями и авариями, которые могут возникнуть в гидродинамических системах.

Задачами изучения дисциплины являются формирование у студентов комплекса знаний, необходимых для решения производственно-технологических, эксплуатационных задач отрасли, оценки параметров течения в технологических процессах нефтегазового производства.

Курс «Гидравлика и гидромеханика нефти и газа» базируется на курсах математических и естественнонаучных. Знания и навыки, получаемые при изучении курса, используются в специальных дисциплинах.

Согласно требованиям ФГОС ВПО «Требования к результатам освоения основных образовательных программ бакалавриата» в результате освоения дисциплины «Гидравлика и гидромеханика нефти и газа» выпускник должен обладать следующими профессиональными компетенциями: способен участвовать в разработке и реализации мероприятий в области увеличения нефтеотдачи.

Глава 1 ГИДРОСТАТИКА

1.1. Физические свойства жидкостей

Цель практического занятия: определение основных физических свойств несжимаемых и сжимаемых жидкостей.

Одной из основных механических характеристик жидкости является ее плотность. *Плотностью* жидкости называют массу жидкости заключенную в единице объема.

$$\rho = \frac{m}{V} \ (\text{кг}/\text{м}^3) \qquad (1)$$

Удельным весом называют вес единицы объема жидкости, который определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{G}{V} \ (H/\text{м}^3) \qquad (2)$$

С увеличением температуры удельный вес жидкости уменьшается.

Основные физические свойства.

1. *Сжимаемость* - свойство жидкости изменять свой объем под действием давления. Сжимаемость жидкости характеризуется коэффициентом объемного сжатия, который определяется по формуле:

$$\beta_v = \frac{1}{V}\frac{dV}{dP} \ (\text{м}^2/H), \qquad (3)$$

где V -первоначальный объем жидкости,

dV - изменение этого объема, при увеличении давления на величину dP.

Величина обратная β_v называется модулем объемной упругости жидкости:

$$K = \frac{1}{\beta} \ (H/\text{м}^2). \qquad (4)$$

Модуль объемной упругости не постоянен и зависит от давления и температуры. При гидравлических расчетах сжимаемостью жидкости обычно пренебрегают и считают жидкости практически несжимаемыми. Сжатие жидкостей в основном обусловлено сжатием растворенного в них газа.

Сжимаемость понижает жесткость гидропривода, т.к., на сжатие затрачивается энергия. Сжимаемость может явиться причиной возникновения автоколебаний в гидросистеме, создает запаздывание в срабатывании гидроаппаратуры и исполнительных механизмах.

Иногда сжимаемость жидкостей полезна - ее используют в гидравлических амортизаторах и пружинах.

2. *Температурное расширение* - относительное изменение объема жидкости при увеличении температуры на 1°С при P =*const*. Характеризуется коэффициентом температурного расширения:

$$\beta_t = \frac{1}{V}\frac{dV}{dt}\ (1/°\text{C}). \qquad (5)$$

Поскольку для капельных жидкостей коэффициент температурного расширения ничтожно мал, то при практических расчетах его не учитывают.

3. *Сопротивление растяжению.* Особыми физическими опытами было показано, что покоящаяся жидкость (в частности вода, ртуть) иногда способна сопротивляться очень большим растягивающим усилиям. Но в обычных условиях такого не происходит, и поэтому считают, что жидкость не способна сопротивляться растягивающим усилиям.

4. *Силы поверхностного натяжения* - эти силы стремятся придать сферическую форму жидкости. Силы поверхностного натяжения обусловлены поверхностными силами и направлены всегда внутрь рассматриваемого объема перпендикулярно свободной поверхности жидкости. Рассмотрим бесконечно малый объем жидкости на свободной поверхности. На него будут действовать силы со стороны соседних объемов. В результате, если сложить вектора всех сил, действующих

на рассматриваемый объем, то суммарная составляющая сила будет направлена перпендикулярно внутрь рассматриваемого объема.

5. *Вязкость жидкости* - свойство жидкости сопротивляться скольжению или сдвигу ее слоев. Суть ее заключается в возникновении внутренней силы трения между движущимися слоями жидкости, которая определяется по формуле Ньютона:

$$T = \mu S \frac{d\upsilon}{dy}\ (H), \tag{6}$$

где S - площадь слоев жидкости или стенки, соприкасающейся с жидкостью, м^2,

μ – динамический коэффициент вязкости, или сила вязкостного трения,

dυ/dy - градиент скорости, перпендикулярный к поверхности сдвига. Отсюда динамическая вязкость равна:

$$\mu = \tau \frac{dy}{d\upsilon}\ (H \cdot с/м^2), \tag{7}$$

где τ - касательные напряжения жидкости, $\tau = T/S$.

При течении вязкой жидкости вдоль твердой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью (рис.1.2). Скорость уменьшается по мере уменьшения расстояния у от стенки. При этом при у = 0, скорость падает до нуля, а между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений τ.

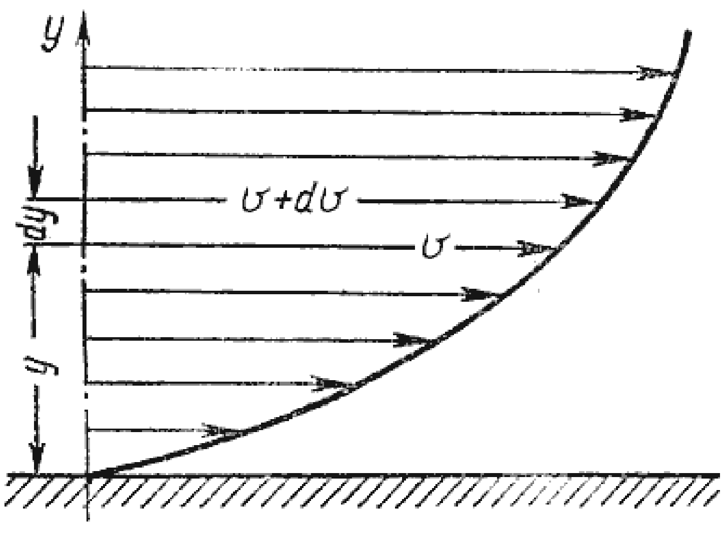


Рисунок. 1.1 Профиль скоростей при течении вязкой жидкости вдоль стенки

Величина обратная динамическому коэффициенту вязкости (1/μ) называется *текучестью жидкости*.

Отношение динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости называется кинематическим коэффициентом вязкости:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho}\ (\text{м}^2/c). \qquad (8)$$

Вязкость жидкости зависит от температуры и от давления. При повышении температуры вязкость жидкости уменьшается и наоборот. У газов наблюдается обратное явление: с повышением температуры вязкость увеличивается, с понижением температуры - уменьшается.

Пенообразование. Выделение воздуха из рабочей жидкости при падении давления может вызвать пенообразование. На интенсивность пенообразования оказывает влияние содержащаяся в рабочей жидкости вода: даже при ничтожном количестве воды (менее 0,1% по массе рабочей жидкости) возникает устойчивая пена. Особенно пенообразование происходит интенсивно в загрязненных жидкостях и бывших в эксплуатации. При температуре жидкости свыше 70 0С происходит быстрый спад пены.

6. *Химическая и механическая стойкость*. Характеризует способность жидкости сохранять свои первоначальные физические свойства при эксплуатации и хранении. Окисление жидкости сопровождается выпадением из нее смол и шлаков, которые откладываются на поверхности элементов гидропривода в виде твердого налета. Снижается вязкость и изменяется цвет жидкости. Продукты окисления вызывают коррозию металлов и уменьшают надежность работы гидроаппаратуры. Налет вызывает заклинивание подвижных соединений, плунжерных пар, дросселирующих отверстий, разрушение уплотнений и разгерметизацию гидросистемы.

7. *Совместимость.* Совместимость рабочих жидкостей с конструкционными материалами и особенно с материалами уплотнений имеет очень большое значение. Рабочие жидкости на нефтяной основе совместимы со всеми металлами, применяемыми в гидромашиностроении, и плохо совместимы с уплотнениями, изготовленными из синтетической резины и из кожи. Синтетические рабочие жидкости плохо совмещаются с некоторыми конструкционными материалами и не совместимы с уплотнениями из маслостойкой резины.

8. *Испаряемость жидкости.* Испаряемость свойственна всем капельным жидкостям, однако интенсивность испарения неодинакова у различных жидкостей и зависит от условий, в которых она находится: от температуры, от площади испарения, от давления, и от скорости движения газообразной среды над свободной поверхностью жидкости (от ветра).

9. *Растворимость газов в жидкостях* характеризуется объемом растворенного газа в единице объема жидкости и определяется по закону Генри:

$$V_{г} = V_{Ж} k \frac{P}{P_a}, \qquad (9)$$

где $V_Г$ - объем растворенного газа;

$V_Ж$ - объем жидкости;

k - коэффициент растворимости;

P - давление;

P_a - атмосферное давление.

Коэффициент k имеет следующие значения при 20 С: для воды 0,016, керосина 0,13, минеральных масел 0,08, жидкости АМГ-10 - 0,1. При понижении давления выделяется растворимый в жидкости газ. Это явление может отрицательно сказываться на работе гидросистем.

Пример

В отопительной системе (котел, радиаторы и трубопроводы) небольшого дома содержится вода объемом V=0,4 м³. Сколько воды дополнительно войдет в расширительный сосуд ΔV при нагревании ее от 20 до 90°С?

Решение. Плотность воды при температуре 20°С (см. табл.) равна 998 кг/м³, масса воды m=0,4·998≈399 кг.

Плотность воды при температуре 90°С (см. табл.) равна 965 кг/м³; объем, занимаемый водой, имеющей температуру 90°С,

$V^* = m/\rho 90 = 399:965 \approx 0,414$ м³.

Дополнительный объем

$\Delta V = V^* - V = 0,414-0,4=0,014$ м³.

Ответ: ΔV= =0,014 м³.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить плотность бензина, если 24 200 кг его занимают объем 33,5 м^3.

Ответ: 722 кг/м^3.

Задача 2. 23500 кг бензина при температуре 276° К занимают объем - 33,25 м^3.Какой объем будет занимать это количество бензина при температуре290° К, если давление не изменится? Коэффициент температурного расширения бензина β_t = 0,00065 1/°К.

Ответ: 33,546 м^3.

Задача 3. 23 500 кг бензина при температуре 15° С занимают объем 33,5 м^3. Какой объем будет занимать это же количество бензина при температуре 6° С? Коэффициент температурного расширения бензина β_t = = 0,00065 1/°С.

Ответ: 33,31 м^3.

Задача 4. В резервуар залито 15 м^3 нефти плотностью 800 кг/м^3. Сколько необходимо долить нефти плотностью 824 кг/м^3, чтобы плотность смеси стала равной 814 кг/м^3?

Ответ: 21 м^3.

Задача 5. В резервуар залито 20 м^3 нефти плотностью 850 кг/м^3 и 25 м^3 нефти плотностью 840 кг/м^3. Определить плотность смеси. 1/°С.

Ответ: 844,4 кг/м^3.

Задача 6. 50000 кг нефти занимают объем 62 м^3. Определить удельный объем нефти.

Ответ: 0,00124 м^3/кг.

Задача 7. Плотность автола при температуре 20° С равна 883 кг/м^3. Условная вязкость автола при температуре 50° С равна 7° ВУ. Определить динамический коэффициент вязкости автола при t=50^e С.

Ответ: 0,0444 Н-сек/м^2.

Задача 8. Сосуд, объем которого 2 м^3, заполнен водой. На сколько уменьшится и чему станет равным объем воды при увеличении давления на 2-10^7 Па? Истинный модуль сжатия воды равен $1962 \cdot 10^6$ Па.

Ответ: 0,0204 м³; 1,9796 м³.

Задача 9. При давлении $1 \cdot 10^5$ Па отмерен 1 м³ воды. На сколько сократится объем воды при увеличении давления в 50 раз? Ответ дать в процентах.

Ответ: 0,25%.

Контрольные вопросы

1. Что называется жидкостью?
2. Как найти объем жидкости, плотность и масса которой известны?
3. Как определяется плотность однородной жидкости?
4. Какова связь между плотностью, удельным весом и удельным объемом?
5. Каков физический смысл коэффициента объемного сжатия жидкости?
6. Каков физический смысл коэффициента объемного расширения жидкости?
7. Какими силами обусловлено поверхностное натяжение жидкости?

1.2. Давление в покоящейся жидкости

Цель практического занятия: определить избыточное, абсолютное и вакуумметрическое давления; найти разности гидростатических давлений в сосудах.

В покоящейся жидкости всегда присутствует сила давления, которая называется *гидростатическим давлением*. Жидкость оказывает силовое воздействие на дно и стенки сосуда. Частицы жидкости, расположенные в верхних слоях водоема, испытывают меньшие силы сжатия, чем частицы жидкости,находящиеся у дна.

Если рассматривать резервуар с плоскими вертикальными стенками, наполненный жидкостью, то на дно резервуара действует сила P равная весу налитой жидкости $G = \gamma V$, т.е. $P = G$. Если эту силу P разделить на площадь дна S_{abcd}, то мы получим *среднее гидростатическое давление*, действующее на дно резервуара.

$$P_{cp} = \frac{P}{S_{abcd}}$$
.

Гидростатическое давление обладает рядом свойств.

Свойство 1. *В любой точке жидкости гидростатическое давление перпендикулярно площадке касательной к выделенному объему и действует внутрь рассматриваемого объема жидкости.*

Свойство 2. *Гидростатическое давление неизменно во всех направлениях.*

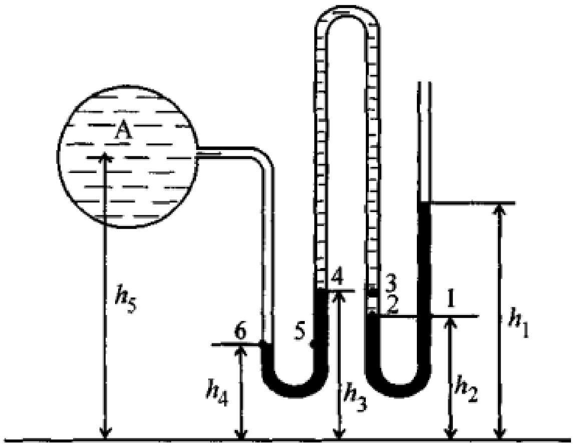
Свойство 3. *Гидростатическое давление в точке зависит от ее координат в пространстве.*

Простейшим прибором для измерения давления в сосуде с жидкостью является пьезометр, представляющий собой вертикальную, открытую сверху стеклянную трубку, присоединяемую к сосуду. Пьезометр измеряет избыточное давление на поверхности жидкости в сосуде. *Пьезометрической* поверхностью называется поверхность, проходящая через уровень жидкости в пьезометре или, что-то же, поверхность, на которой давление равно атмосферному.

Для измерения давления применяют следующие приборы: барометры измеряют атмосферное давление; манометры - избыточное; вакуумметры – вакуум; для измерения разности давления в двух точках применяются дифференциальные манометры.

Пример

Найти избыточное давление в сосуде с водой по показаниям многоступенчатого ртутного манометра: h1=82 см, h2=39 см, h3=54 см, h4= 41 см, h5=100 см, $\rho=10^3$ кг/ м³, $\rho_p=1{,}36 \cdot 10^4$ кг/ м³.



Решение. Так как жидкость находится в равновесии, то давление в точках 1 и 2 равны как давления в точках одного и того же объема однородной покоящейся жидкости, расположенных на одной горизонтали, т.е. $P_1=P_2$. На том же основании P3=P4 и P5=P6. В то же время избыточное давление

$$P_1 = \rho_p g(h_1 - h_2)\ ;$$

$$P_5 = P_4 + \rho_p g(h_3 - h_4);$$

$$P_3 = P_2 - \rho_в g(h_3 - h_2);$$

$$P_a = P_6 - \rho_в g(h_5 - h_4).$$

Исключив из этих соотношений промежуточные давления P_2, P_4, P_6, получим:

$$P_a = \rho_p g[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] - \rho_в g[(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)] =$$
$$1{,}36 \cdot 10^4 \cdot 9.8(0{,}43 + 0{,}13) – 10^3 \cdot 9{,}8(0{,}15 + 0{,}59) =$$
$$= 67{,}4 Па$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Избыточное давление в нефтяном пласте составляет 4,9 МПа.

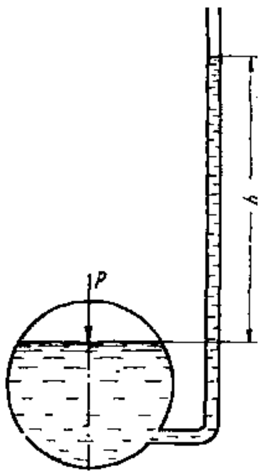
Можно ли предотвратить выброс нефти плотностью ρ=1200 кг/м^3. Глубина скважины Н=460 м.

Задача 2. В резервуаре находятся слой воды высотой 1,5 м и слой нефти, высотой 2 м, плотность которой 900 кг/м^3. Определить величину избыточного давления жидкости на уровне дна резервуара.

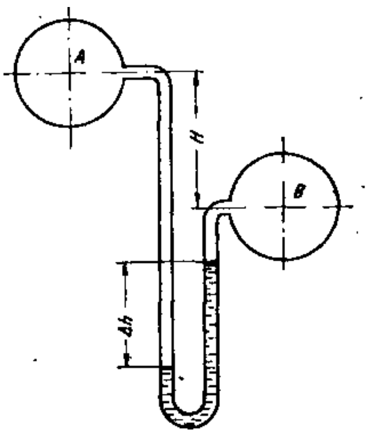
Ответ: 52 000 Па.

Задача 3. Определить величину избыточного давления на поверхность жидкости, находящейся в сосуде в состоянии покоя, если в трубке пьезометра вода поднялась на высоту h=1,8 м. Свободный конец трубки открыти сообщается с атмосферой (см. рис.).

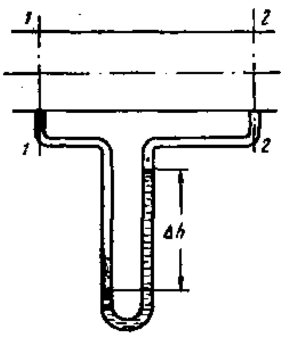
Ответ: 17 658 Па



к задаче 3



к задачам 4, 6



к задачам 5, 7

Задача 4. Определить разность давления в точках, находящихся на осях цилиндров А и В, заполненных водой, если разность уровней ртути в дифференциальном манометре Δh = 23 см.

До уровня ртути трубки заполнены водой.

Разность уровней осей цилиндров H = 1 м (см. рис.)

Ответ: 0,185 кгс/см^2.

Задача 5. В сечениях *2* и *1* горизонтального газопровода присоединены трубки дифференциального манометра (см. рис.).

Определить разность давления в этих сечениях, если разность уровней в коленах Δh водяного дифференциального манометра равна 24 см. Плотность газа равна 0,84 кг/м^3.

Ответ: 2 350 Па.

Задача 6. Определить давление в сосуде B (см. рис.), если избыточное давление в сосуде A равно 2 ат, разность уровней ртути в U-образной трубке, соединяющей сосуды, Δh = 1,6 м. В левом колене трубки находится вода.

Ответ: 0,98 кгс/см^2.

Задача 7. Определить разность уровней воды Δh в колене дифференциального манометра, (см. рис.), если давление газа в сечении 1-1 равно Р1=16 кгс/см^2, а в сечении 2-2 P_2 = 15,1 кгс/см^2.

Плотность газа в условиях газопровода равна 1,8 кг/м^3.

Ответ: 9,01 м.

Задача 8. Давление в газопроводе определяется при помощи микроманометра, заполненного спиртом. Плотность спирта 780 кг/м^3. Трубка микроманометра наклонена к горизонту под углом α=15°. Чему равно давление в газопроводе, если мениск переместился на l=62 мм?

Задача 9. Определить разность давлений в сечениях 1 и 2 горизонтального водопровода по разности высот жидкости в трубках ртутного дифференциального манометра h=150 мм.

Ответ: Δp=18,5 кПа.

Контрольные вопросы

1. Перечислить свойства, которыми обладает гидростатическое давление.

2. Какие виды давления Вы знаете, и какими приборами они измеряются?

3. Каково численное соотношение между единицами давления «паскаль» и «техническая атмосфера»?

4. Какое состояние жидкости описывают уравнения Эйлера?

5. Какое свойство гидростатического давления отражают уравнения Эйлера жидкостью? Относительный покой жидкости

1.3 Относительный покой жидкости

Цель практического занятия: рассчитать силу давления жидкости при ее относительном покое; определить профиль свободной поверхности жидкост движущемся сосуде. Поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется *поверхностью уровня* или *поверхностью равного давления*. При неравномерном или непрямолинейном движении на частицы жидкости кроме силы тяжести действуют еще и силы инерции, причем если они постоянны по времени, то жидкость принимает новое положение равновесия. Такое равновесие жидкости называется *относительным покоем*. Относительным покоем жидкости называется также состояние, при котором она неподвижна относительно стенок заключающего ее и движущегося с постоянным ускорением сосуда. В случае относительного покоя на частицы жидкости массой dm действуют две массовые силы: сила тяжести и сила инерции переносного движения.

При равномерном прямолинейном движении сосуда силы инерции переносного движения отсутствуют, и условия относительного равновесия совпадают с условиями равновесия жидкости в неподвижном сосуде.

При движении сосуда вдоль наклонной плоскости (под углом к горизонту) с постоянным ускорением вектор напряжения массовых сил одинаков для всех точек жидкости. Изобарические поверхности (поверхности уровня) – параллельные плоскости, наклоненные к горизонтали под углом α, где $\mathrm{tg}\,\alpha=-a/g$.

В случае равномерного вращения цилиндрического сосуда вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью изобарические поверхности – параболоиды вращения, ось которых совпадает с вертикальной осью OZ, а вершины смещены вдоль этой оси. Форма изобарических поверхностей не зависит от плотности жидкости.

Пример 1. Цистерна с нефтью движется по горизонтальному пути со скоростью равной 60 км/ч. Размеры цистерны, м: d=3, l=8, h=0,3. Плотность нефти ρ=850 кг/м³. В некоторый момент времени поезд начинает тормозить и, пройдя путь длиной L=100 м, останавливается.

Считая движение прямолинейным равномерно-замедленным, определить силу P давления нефти на переднее днище цистерны при движении и в состоянии покоя.

Решение. При равномерно-замедленном движении ускорение

$$\vartheta^2 \quad \left(60\cdot10^3\right)^2 \quad 1$$

$$a = -\frac{{}^{0}}{2L} = -\left(\frac{\quad}{3600}\right)\cdot\frac{\quad}{2\cdot 100} = -1{,}39\,м/с^2.$$

Ускорение цистерны направлено влево, а напряжение силы инерции переносного движения – вправо. Используя формулу tgφ= -a/g, определим угол φ наклона свободной поверхности жидкости к горизонту. Так как цистерна движется горизонтально, то:

$$\mathrm{tg}\varphi = -a/g = 1{,}39/\,9{,}8 = 0{,}142, \text{ следовательно } \varphi=8{,}07^{o}.$$

Вычислим высоту, на которой установится у передней стенки продолжение плоскости свободной поверхности жидкости:

$$\Delta h = \frac{l}{2}\,tg\varphi = \frac{8}{2}\,0{,}142 = 0{,}568\,м$$

Сила давления жидкости на переднюю стенку цистерны:

$P = \rho{\cdot}g{\cdot}hm{\cdot}$, где hm – глубина погружения центра тяжести стенки под уровень свободной поверхности; S – площадь стенки.

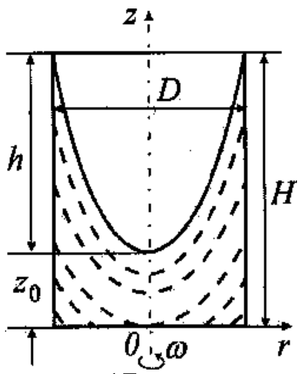
Так как $hm = \Delta h + h + d/2$, то

$$P = \rho g\left(\Delta h + h + \frac{d}{2}\right)\frac{\pi d^2}{4} = 850\cdot 9{,}8(0{,}568 + 0{,}3 + 1{,}5)\frac{3{,}14\cdot 3^2}{4} = 140\,кН$$

В состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения свободная поверхность жидкости горизонтальна, и сила, действующая на торцевую стенку равна

$$P = \rho g\left(h + \frac{d}{2}\right)\frac{\pi d^2}{4} = 850\cdot 9{,}8(0{,}3 + 1{,}5)\frac{3{,}14\cdot 3^2}{4} = 106\,кН\,.$$

Пример 2. Вертикальный цилиндрический сосуд D=40 см и высотой H=100 см наполнен до половины водой.



Определить, с каким предельным числом оборотов можно вращать этот сосуд около его геометрической вертикальной оси, чтобы из него не выливалась вода.

Решение. Из рисунка видно, что $H=z_0+h$. В соответствии с общими формулами

$$z_0 = h_0 - \frac{\omega^2 R^2}{4g}; \qquad h = \frac{\omega^2 R^2}{2g}. \quad \text{Тогда} \qquad H = z_0 + h = h_0 + \frac{\omega^2 R^2}{4g}$$

С другой стороны, начальный уровень в резервуаре h_0 по условию равен *H/2* и, следовательно, $H = \frac{H}{2} + \frac{\omega^2 R^2}{4g}$, откуда $\omega = \frac{\sqrt{2gH}}{R} + \frac{\sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 1}}{0{,}2} = 22{,}1 c^{-1}$

Предельное число оборотов в минуту:

$$n=30\frac{\omega}{\pi} = 211 \text{ об/мин.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Построить профиль свободной поверхности жидкости в сосуде, движущемся горизонтально слева направо:

1) с положительным ускорением α=1,8 м/с^2;

2) с отрицательным ускорением α= -0,6 м/с^2;

3) равномерно.

Длина сосуда l=4м, начальное наполнение сосуда H=1,2 м.

Ответ: α_1=10º22; α_2=3º30; α_3 =0.

Задача 2. Открытый вертикальный цилиндрический сосуд радиусом R= 0,5 м, наполненный до высоты H=1,5 м жидкостью, приведен в равномерное вращательное движение вокруг вертикальной оси Z; скорость вращения сосуда n=100 об/мин. Вычислить глубину воронки h и высоту H1, на которой жидкость будет стоять у краев сосуда при его вращении.

Ответ: h=1,39 м; H=2,195 м.

Задача 3. Сосуд, имеющий форму усеченного конуса, наполнен водой до половины высоты и приводится во вращение вокруг своей вертикальной оси.

Определить наибольшее число оборотов, при котором вода не будет выливаться из сосуда, если h=a=0,8 м и угол α=45º.

Ответ: n max=26,4 об/мин=0,44 об/с.

Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на жидкость при ее относительном покое?

2. Каков закон распределения давления в жидкости по вертикали при ее относительном покое?

3. Каковы форма изобарической поверхности в жидкости и описывающие их уравнения при вращении сосуда с постоянной угловой скоростью и вертикальной осью вращения?

4. Каковы форма изобарической поверхности в жидкости и описывающие их уравнения при прямолинейном движении сосуда с постоянным ускорением?

1.3. Закон Паскаля

Цель практического занятия: применение основного уравнения гидростатики при определении гидростатического давления.

Рассмотрим распространенный случай равновесия жидкости, когда на нее действует только одна массовая сила - сила тяжести, и получим уравнение, позволяющее находить гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объема жидкости. Это уравнение называется *основным уравнением гидростатики*.

Пусть жидкость содержится в сосуде (рис.4.1.) и на ее свободную поверхность действует давление P_0. Найдем гидростатическое давление P в произвольно взятой точке M, расположенной на глубине h.

Выделим около точки M элементарную горизонтальную площадку dS и построим на ней вертикальный цилиндрический объем жидкости высотой h.

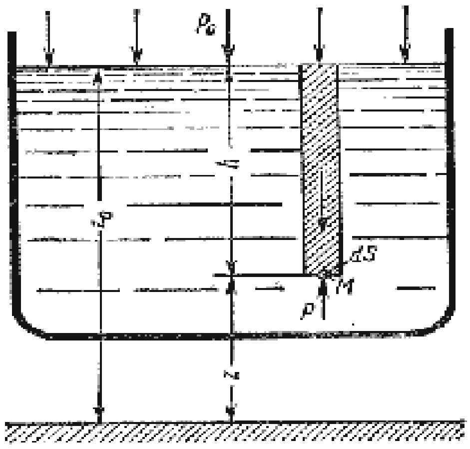


Рисунок. 1.3 Схема для вывода основного уравнения гидростатики

Рассмотрим условие равновесия указанного объема жидкости, выделенного из общей массы жидкости. Давление жидкости на нижнее основание цилиндра теперь будет внешним и направлено по нормали внутрь объема, т.е. вверх. Запишем сумму сил, действующих на рассматриваемый объем в проекции на вертикальную ось: $PdS - P_0\,dS - \rho ghdS = 0$

Последний член уравнения представляет собой вес жидкости, заключенный в рассматриваемом вертикальном цилиндре объемом hdS. Силы давления по боковой поверхности цилиндра в уравнение не входят, т.к. они перпендикулярны к этой поверхности и их проекции на вертикальную ось равны нулю. Сократив выражение на dS и, перегруппировав члены, найдем

$$P = P_0 + \rho gh = P_0 + h\gamma$$

Полученное уравнение называют *основным уравнением гидростатики*. По нему можно посчитать давление в любой точке покоящейся жидкости. Это давление, как видно из уравнения, складывается из двух величин: давления P_0 на внешней поверхности жидкости (поверхностным) и давления, обусловленного весом вышележащих слоев жидкости (весовым давлением).

Из основного уравнения гидростатики видно, что какую бы точку в объеме всего сосуда мы не взяли, на нее всегда будет действовать давление, приложенное к внешней поверхности P_0. Другими словами *давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости по всем направлениям одинаково. Это положение известно подназванием* закона Паскаля.

Пример

В закрытом резервуаре с нефтью ρ=880 кг/м^3, вакуумметр, установленный на его крышке, показывает $P_в$=1,18·10^4 Па. Определить показание манометра $P_м$, присоединенного к резервуару на глубине H=6 м от поверхности жидкости и положение пьезометрической плоскости.

Решение. Проведем плоскость на уровне присоединения манометра. В этой плоскости абсолютное давление в соответствии с основным уравнением гидростатики равно:

$$P_{1-1} = P_0 + \rho gH,$$

где P_0 – абсолютное давление на поверхности, равное $P_a - P_в$.

Тогда $P_{1-1} = P_a - P_в + \rho gH$.

С другой стороны, так как манометр измеряет избыточное давление ($P_м = P_и$), то $P_{1-1} = P_a - P_м$.

Приравняв два выражения для P_{1-1}, найдем $P_м$:

$$P_м = -P_в + \rho g H = -1{,}18 \cdot 10^4 + 880 \cdot 9{,}8 \cdot 6 = 3{,}99 \cdot 10^4\ Па.$$

Так как на поверхности жидкости давление меньше атмосферного, то пьезометрическая высота отрицательна

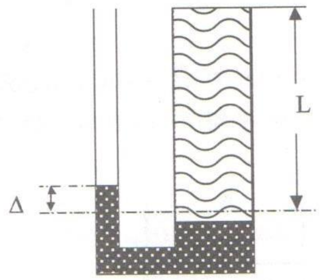
$$h = \frac{\Delta p}{\rho g} = -\frac{P_в}{\rho g} = \frac{1{,}18 \cdot 10^4}{880 \cdot 9{,}8} = -1{,}37\ м$$

и пьезометрическая плоскость расположена ниже поверхности жидкости на расстоянии 1,37 м.

Задачи для самостоятельного решения

Задача1.

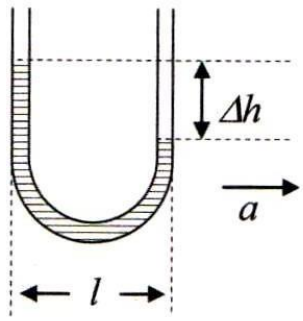
В два цилиндрических сообщающихся сосуда наливают ртуть. Площадь сечения одного из сосудов вдвое больше площади сечения другого. Первоначальный уровень ртути находится на расстоянии L от верхнего края сосудов. Плотность ртути – 13600кг/м^3; воды – 1000кг/м^3. На какую высоту Δ поднимется уровень ртути, если в другой сосуд до краев налить? Как измениться этот уровень, если наливать воду в больший или меньший сосуд?



Задача 2.

Отградуируйте гидравлический акселерометр, представляющий собой U – образную трубку, частично заполненную жидкостью. Если устройство перемещать в горизонтальной плоскости с ускорением a , уровни в коленах трубки смещаются по вертикали на величину Δh. Определить соотношение между разностью уровней в трубках Δh, расположенных на расстоянии l и ускорением a.

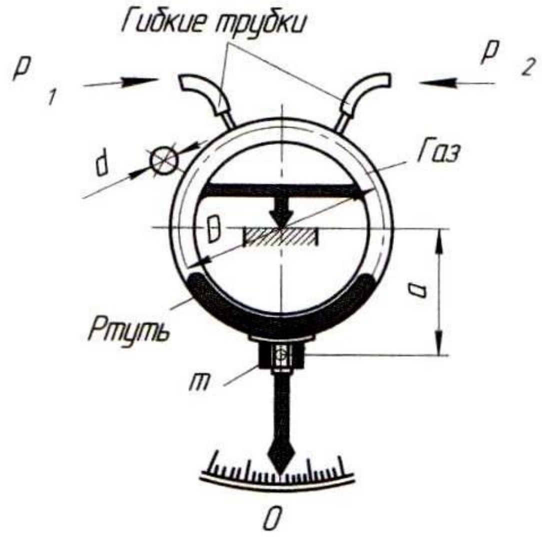
Ответ: $\Delta h = \dfrac{a}{g} \cdot l$



Задача3.

Определить, на какой угол повернется кольцевой манометр, имеющий диаметр трубки d=20мм и средний диаметр кольца D=200мм, если давление газа, подводимого к ветвям, p_1=90 кПа и p_2=80кПа, масса груза m=0,535кг (вес G=5,25 Н) и его плечо относительно оси вращения a=120мм.

Ответ: a=30°



Задача 4. Определить величину поверхностного давления P_0 в закрытом сосуде, если горизонт воды в открытом пьезометре, приключенном к сосуду, возвышается над горизонтом воды в сосуде на 300 см.

Ответ: P_0 =1,3 кГ/см^2.

Задача 5. Определить заглубление h точки под уровнем воды в водоеме, если избыточное гидростатическое давление в этой точке равно 1 кГ/см^2.

Ответ: h=1000см.

Задача 6. Избыточное давление в нефтяном пласте составляет 4,9 МПа.

Можно ли предотвратить выброс нефти из скважины, заполнив ее глинистым раствором плотностью равной 1200 кг/м^3. Глубина скважины H=460 м.

Ответ: можно (обосновать).

Контрольные вопросы

1. Основное уравнение гидростатики.

2. Из чего складывается давление в любой точке объема покоящейся жидкости?

3. В чем состоит закон Паскаля?

4. Что такое весовое давление?

5. Что такое поверхностное давление?

6. Совпадают ли понятия весового и избыточного давления в случае: открытого сосуда, закрытого сосуда?

1.4. Закон Архимеда и его приложение

Цель практического занятия: найти глубину погруженного в жидкость тела; определить метацентрическую высоту.

Тело, погруженное (полностью или частично) в жидкость, испытывает со стороны жидкости суммарное давление, направленное снизу вверх и равное весу жидкости в объеме погруженной части тела. $P_{выт} = \rho_{ж} g V_{погр}$.

Для однородного тела, плавающего на поверхности справедливо соотношение

$$\frac{V_{погр}}{V} = \frac{\rho_{т}}{\rho_{ж}}$$

где: V -объем плавающего тела;

ρ_m - плотность тела.

Способность плавающего тела, выведенного из состояния равновесия, вновь возвращаться в это состояние называется ос*тойчивостью*. Вес жидкости, взятой в объеме погруженной части судна называют *водоизмещением*, а точку приложения равнодействующей давления (т.е. центр давления) - *центром водоизмещения*. При нормальном положении судна центр тяжести C и центр водоизмещения d лежат на одной вертикальной прямой O'-O'', представляющей ось симметрии судна и называемой осью плавания (рис1.4).

Пусть под влиянием внешних сил судно наклонилось на некоторый угол α, часть судна KLM вышла из жидкости, а часть $K'L'M'$, наоборот, погрузилось в нее. При этом получили новые положения центра водоизмещения d'. Приложим к точке d' подъемную силу R и линию ее действия продолжим до пересечения с осью симметрии O'-O''. Полученная точка m называется *метацентром*, а отрезок $mC=h$ называется *метацентрической высотой*. Будем считать h положительным, если точка m лежит выше точки C, и отрицательным - в противном случае.

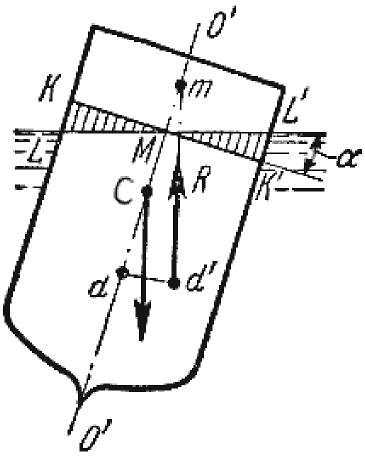


Рисунок. 1.4 Поперечный профиль

судна.Теперь рассмотрим условия равновесия судна:

1) если $h>0$, то судно возвращается в первоначальное положение;
2) если $h=0$, то это случай безразличного равновесия;
3) если $h<0$, то это случай неостойчивого равновесия, при котором продолжается дальнейшее опрокидывание судна.

Следовательно, чем ниже расположен центр тяжести и, чем больше метацентрическая высота, тем больше будет остойчивость судна.

Пример

Определить глубину погружения и остойчивость железобетонного понтона, имеющего форму параллелепипеда высотой h=1,8 м, шириной b=2,5 м, длиной l =6 м. Толщина стенок δ понтона равна 0,1 м.

Решение. Вес понтона $G = \rho Б \cdot g \cdot V = \rho б \cdot g\left[2lb\delta + 2b(h-2\delta)\delta + 2(l-2\delta)(h-2\delta)\delta\right]$,

где ρБ = 2500 кг/ м³ - плотность бетона; V – объем железобетонных стенок понтона.

Подставив численные значения, получим

$$G = 2500 \cdot 9{,}81\left[2 \cdot 6 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}1 + 2 \cdot 2{,}5(1{,}8 - 2 \cdot 0{,}1)0{,}1 + 2(6 - 2 \cdot 0{,}1)(1{,}8 - 2 \cdot 0{,}1)0{,}1\right] =$$
$$= 138713{,}4Н \approx 139кН$$

Силу вытеснения (подъемную силу) находим по формуле:

Рвыт = ρ·g·Vпогр = ρ·g·b·l·h1, где *h1* – глубина погружения понтона (знакминус отсутствует, поскольку ось z направлена вверх).

Сила вытеснения при плавании понтона в воде равна его весу, т.е. G= Рвыт, поэтому G= ρ·g·b·l·h_1 , откуда

$$h = \frac{G}{\rho gbl} = \frac{139 \cdot 10^3}{1000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}5 \cdot 6} \approx 0{,}95 \text{ м}$$

Центр давления (водоизмещения) находится над дном понтона на расстоянии

hв = h1 / 2 = 0,95:2=0,475 м.

$$h_м = \frac{J}{V} - a = \frac{bl^3/2}{blh_1} - \left(\frac{h}{2} - h_в\right) = \frac{l^2}{2h_1} - \left(\frac{h}{2} - h_в\right) =$$
$$= \frac{6^2}{2 \cdot 0{,}95} - \left(\frac{1{,}8}{2} - 0{,}475\right) \approx 18{,}5м$$

Поскольку hм=18,5>0, значит понтон остойчив.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Плоскодонная металлическая баржа длиной 36 м шириной 10 м с грузом песка имела осадку 1 м. После выгрузки песка осадка баржи стала равной 25 см.

Определить массу выгруженного песка, если объемный вес его равен 2-10^3 дин/$см^3$.

Ответ: 56,5-10^4 кг.

Задача 2. Определить глубину погружения в воду деревянного призматического бруса, площадь основания которого равна 400 х 1000 $мм^2$ и высота 300 мм, если плотность дерева 716 кг/$м^3$.

Ответ: 214 мм.

Задача 3. Плотность жидкости определяют погружением в нее поплавка. Вес поплавка в воздухе 721 Н. Вес поплавка, погруженного в испытуемую

жидкость, 537,9 Н, вес поплавка, погруженного в воду, 561,7 Н.

Определить плотность испытуемой жидкости.

Ответ: 870 кг/$м^3$.

Задача 4. Какой объем бензина можно залить в железнодорожную цистерну внутренним объемом 50 $м^3$ и массой 23 т, чтобы она еще сохраняла плавучесть в пресной воде? Будет ли при плавании цистерна устойчива?

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Архимеда.
2. Если тело тонет, то куда будет направлена Архимедова сила?
3. Что такое остойчивость плавающего тела?
4. Какой закон гидростатики лежит в основе работы гидростатических машин?

1.5. Сила статического давления жидкости на плоскую стенку

Цель практического занятия: определить равнодействующую сил давления на плоскую наклонную стенку; найти центр давления жидкости на стенку.Если на плоскую стенку, наклоненную под некоторым углом к горизонту, с одной стороны действует жидкость, а с другой - атмосферное давление, то скалярная величина равнодействующей сил давления, воспринимаемая стенкой, равна произведению величины смоченной площади стенки на гидростатическое давление ее центре тяжести:

P=Pт·S

где Pт – абсолютное давление в центре тяжести смоченной части стенки; S – площадь смоченной части стенки.

Точка пересечения линий действия силы P с плоскостью стенки называется *центром давления*. Положение центра давления относительно пьезометрической плоскости определяется выражение:

$$l_D = l_T + \frac{J}{l_T \cdot s}$$

где l_D и l_T - соответственно расстояния до центра давления и центра тяжести,

отсчитываемые вдоль плоскости стенки от линии пересечения ее с пьезометрической плоскостью; J – момент инерции площади смоченной части стенки относительно горизонтальной оси, проходящей через ее центр тяжести.

Расстояние между центром давления и центром тяжести равно: $\Delta l = l_D - l_T$.

В случае, когда стенка расположена горизонтально, т.е. представляет собой не боковую стенку, а горизонтальное дно сосуда, величина суммарного давления определяется по тем же формулам и составляет: P=γ·H·S. Следовательно, давление на дно не зависит от формы и объема сосуда, а зависит только от величины площади дна и глубины жидкости. Это свойство жидкости носит название *гидростатический парадокс.*

Пример

Открытый вертикальный резервуар квадратного сечения со стороной a=10м наполнен водой до высоты H=2м. Определить полное давление воды на боковую стенку P1 и на дно резервуара P2, а также найти точку приложения равнодействующей силы давления на стенку.

Решение. Полное давление воды P1 на боковую стенку резервуара находится по формуле P=Pт·S, где Pт·=γhт (hт –глубина погружения центра тяжести смоченной части стенки); S–площадь стенки. В рассматриваемом случае S =a·H=10·2=20 м^2, hт = H/2=1 м. Поэтому P=1000·1·20=20 т.

Полное давление P2 на дно определяется по той же формуле. Так как для дна $S=a^2=100$ м², а $h_т=H=2$ м, то $P=1000\cdot2\cdot100=200$ т.

Точка приложения равнодействующей силы давления на боковую стенку (центр давления) ввиду симметричности стенки будет лежать на вертикальной оси, проходящей через центр тяжести стенки.

Глубина погружения центра давления под свободной поверхностью выбирается из таблицы $h_o=2/3\ H=2/3\cdot2=1{,}33$ м.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Вертикальный щит, состоящий из пяти досок одинаковой ширины a = 20 см, сдерживает столб воды высотой H = 1 м.

Определить силу давления воды на щит и на каждую доску щита в отдельности.

Ответ: P = 7848 Н; P_1 = 314 Н; P_2 = 942 Н; P_3 = 1574 Н; P_4 = 2210 Н; P_5 =2808 Н.

Задача 2. Определить силу давления воды на щит, перекрывающий треугольный водослив, если уровень воды H=1,2 м, а угол при вершине равен 90°.

Ответ: 5 650 Н.

Задача 3. Вертикальный щит *А,* перекрывающий водослив плотины, может свободно двигаться в пазах *Б* вверх и вниз и в случае необходимости спуска воды подниматься при помощи канатов. Размеры щита 2600 х 2000 х 200 мм. Плотность материала щита ρ = 1200 кг/м^3.

Определить усилие, которое необходимо приложить для поднятия щита, если коэффициент трения между щитом и поверхностью пазов равен 0,3.

Ответ: 22 160 Н.

Задача 4. Щиток с размерами a х b может вращаться на горизонтальной оси, перпендикулярной к вертикальной плоскости.

Необходимо определить вес груза G на конце рычага длиной l = 60 см, жестко прикрепленного к щитку, чтобы щиток автоматически открывался при уровне воды в резервуаре H = 1,4 м.

Размеры щитка: a = 300 мм, b = 400 мм.

Ответ: 382 Н.

Задача 5. Найти усилие P, действующее на подпорную вертикальную стенку, и момент M, опрокидывающий стенку, если длина стенки 3 м, уровень воды перед стенкой $H1$ = 2,3 м, уровень воды за стенкой H_2 = 0,4 м.

Ответ: P = 75 488 Н, M = 178 095 Н-м.

Задача 6. Вертикальный деревянный щит перегораживает канал трапецеидального сечения. Глубина воды в канале H = 1,4 м, ширина по дну, b=1,6м, ширина по свободной поверхности жидкости B=3,5 м.

Определить полную силу давления жидкости на щит и точку приложения полной силы давления.

Ответ: P=21 460 Н; hд =0,867 м.

Контрольные вопросы

1. Как определяется равнодействующая сил давления на твердую поверхность и что понимается под символом Рт?
2. Может ли равнодействующая сил давления действовать с внешней стороны твердой поверхности, где жидкости нет?
3. Что такое центр давления?
4. Может ли центр давления располагаться выше центра тяжести смоченной части плоской поверхности?
5. Что называется «телом давления»?
6. В чем заключается раскрытие гидростатического парадокса?

1.6. Давление жидкости на криволинейные поверхности

Цель практического занятия: найти величину силы давления на стенки труб и резервуаров.

Пусть жидкость заполняет резервуар, правая стенка которого представляет собой цилиндрическую криволинейную поверхность ABC (рис.1.4.), простирающуюся в направлении читателя на ширину b. Восстановим из точки А перпендикуляр AO к свободной поверхности жидкости. Объем жидкости в отсеке *AOCB* находится в равновесии.Это значит, что силы, действующие на поверхности выделенного объема *V*, и силы веса взаимно уравновешиваются.

Представим, что выделенный объем *V* представляет собой твердое тело того же удельного веса, что и жидкость (этот объем на рис.7.1. заштрихован).

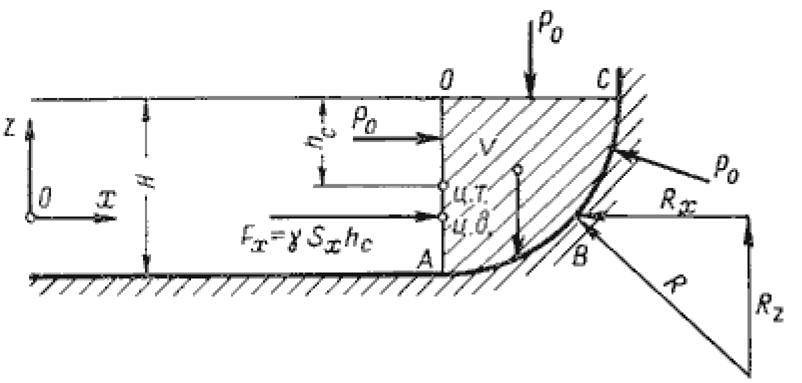


Рисунок. 1.5 Схема к определению равнодействующей гидростатического давления на цилиндрическую поверхность

Левая поверхность этого объема (на чертеже вертикальная стенка АО) имеет площадь $Sx = bH$, являющуюся проекцией криволинейной поверхности *ABC* на плоскость *yOz*. Сила гидростатического давления на площадь S_x равна $F_x = \gamma S_x h_c$. С правой стороны на отсек будет действовать реакция *R* цилиндрической поверхности. Пусть точка приложения и направление этой реакции будут таковы, как показано на рис.7.1.

Реакцию *R* разложим на две составляющие R_x и R_z. Из действующих поверхностных сил осталось учесть только давление на свободной поверхности P_0. Если резервуар открыт, то естественно, что давление P_0 одинаково со всех сторон и поэтому взаимно уравновешивается. На отсек *ABCO* будет действовать сила собственного веса G = γV, направленная вниз. Спроецируем все силы на ось *Ox*: F_x - R_x = 0 откуда $F_x = R_x = \gamma S_x h_{c.}$.Теперь спроецируем все силы на ось *Oz*: R_x - G = 0 откуда $R_x = G = \gamma V$. Составляющая силы гидростатического давления по оси O_y обращается в нуль, значит $R_y = F_y = 0$.

Таким образом, реакция цилиндрической поверхности в общем случае равна $R=\sqrt{R_x^2+R_z^2+R_y^2}$,

а поскольку реакция цилиндрической поверхности равна равнодействующей гидростатического давления *R*=*F*, то делаем вывод, что $F=\sqrt{F_x^2+F_z^2+F_y^2}$.

Таким образом, проекции результирующей силы давления жидкости, действующей на криволинейную поверхность S, на горизонтальные оси равны силам давления, действующим на проекции Sx и Sy этой поверхности на вертикальные координатные плоскости, перпендикулярные соответствующим осям. Проекция результирующей силы на вертикальную ось равна весу жидкости, заключенной в объеме вертикального столба, опирающегося на заданную криволинейную поверхность, а сверху ограниченного плоскостью свободной поверхности.

Пример

Секторный щит радиуса R и шириной B перегораживает канал с жидкостью

Определить силу давления жидкости и направление ее действия.

Решение. 1. Вертикальная составляющая силы давления Pz = ρgV

, где

$V_{тд}=\pi R^2B/4$ (пьезометрическая поверхность в этой задаче совпадает со свободной поверхностью жидкости в канале, так как на ней давление атмосферное).

Сила Pz приложена в центре тяжести объема тела давления и направлена вверх, так как любая элементарная сила давления жидкости dP в любой точке щита дает при разложении вертикальную составляющую, направленную вверх.

2. Горизонтальная составляющая силы давления $P_г=(p_т-p_а)\,S_в=\rho g\frac{R}{2}RB$

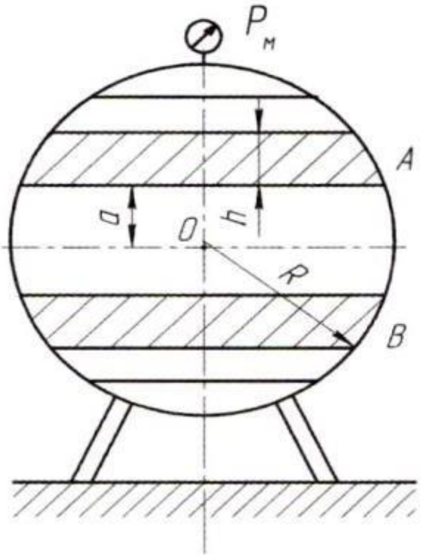
направлена слева направо (все dPг направлены от жидкости к стенке).

3. Результирующая сила давления жидкости:

$$P=\sqrt{P_г^2+P_z^2}=\rho gB\cdot R^2\sqrt{\frac{\pi}{16}+\frac{1}{4}}\approx 0{,}93\rho gB\cdot R^2$$

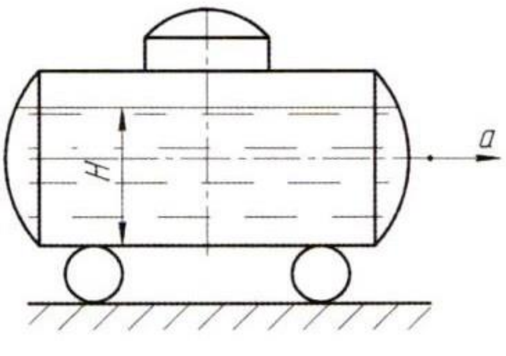
Направлена по радиусу к оси щита; угол ее наклона к горизонту определяется из выражения: $\cos\alpha = \dfrac{P_г}{P}$ =1/(2·0,93)=0,538. Следовательно, α =57º72Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Сферический резервуар для сжиженного газа плотностью ρ=700 кг/м^3 имеет радиус R=10м. Избыточное давление $p_м$=0,3 МПа.



Рассчитать горизонтальную и вертикальную составляющие силы давления жидкости на пояса А и В, имеющие высоту h=1м и расположенные симметрично горизонтальной оси на расстоянии a=3м.

Задача 2. Железнодорожная цистерна движется равноускорено с ускорением a=2м/с^2. Радиус цистерны R=2.5м, длина L=10м.



Определить силу давления нефти с плотностью ρ=850 кг/м^3 на левое и правое днище цистерны, угол уклона свободной поверхности. Цистерна заполнена на высоту H=1,7м, избыточное давление в ней равно нулю.

Ответ: α=11,5^0, $P_{лев}$=146,9кН, $P_{прав}$=32,1кН.

Задача 3. Цилиндрический сосуд заполнен водой на высоту *h*=0,60 м. Диаметр сосуда *D*=40 см, диаметр горловины *d*=10 см. На свободную поверхность жидкости при помощи поршня приложена сила Р=50 Н.

Определить силу P_1 давления воды на дно сосуда.

Ответ: 1 540 Н.

Задача 4. Определить силу давления жидкости на криволинейную поверхность АВ, представляющую собой часть круговой цилиндрической поверхности, если Н=6м, $\alpha=60^{o}$, ширина поверхности b=10м.

Задача 5. Определить величину суммарного давления на секторный затвор, у которого радиус r=H=2 м, длина затвора L=15 м.

Контрольные вопросы

1. В чем сходство и различие формул для определения горизонтальной составляющей силы давления жидкости на криволинейную поверхность и силы давления на плоскую поверхность?

2. От каких геометрических параметров сосуда зависит давление жидкости на его дно?

3. Как действует (снизу вверх или сверху вниз) вертикальная составляющая давления, если тело давления полностью или частично заполнено жидкостью?

4. Как действует (снизу вверх или сверху вниз) вертикальная составляющая давления, если тело давления пустое.

5. Чем выражается сила суммарного давления жидкости на цилиндрическую поверхность?

Глава 2. ГИДРОДИНАМИКА

2.1. Уравнение Бернулли для реальных жидкостей

Цель практического занятия: применение уравнения сохранения энергии при решении задач; вычисление гидравлического радиуса и гидравлического уклона; нахождение числа Рейнольдса для определения режимов движения жидкости.

В гидравлике существуют такие понятия как реальная и идеальная жидкость.

Жидкость, называемая *идеальной* - воображаемая, она абсолютно не сжимаема
неспособна сопротивляться разрыву. Ее характерной особенностью является отсутствие вязкости. Таких жидкостей в природе не существует.

Реальная жидкость– жидкость вязкая, способная оказывать сопротивление сдвигающим усилиям.

Уравнение Даниила Бернулли, полученное в 1738 г., является фундаментальным уравнением гидродинамики. Оно дает связь между давлением P, средней скоростью υ и пьезометрической высотой z в различных сечениях потока и выражает закон сохранения энергии движущейся жидкости. С помощью этого уравнения решается большой круг задач. Его можно прочитать так: *сумма трех членов уравнения Бернулли для любого сечения потока идеальной жидкости есть величина постоянная.*

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\upsilon_2^2}{2g} = H = \text{const}$$

С энергетической точки зрения каждый член уравнения представляет собой определенные виды энергии:

z1 и z2 - удельные энергии положения, характеризующие потенциальную энергию в сечениях *1-1* и *2-2*;

$\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - удельные энергии давления, характеризующие потенциальную энергию давления в тех же сечениях;

$\frac{\upsilon_1^2}{2g}$ и $\frac{\upsilon_2^2}{2g}$ - удельные кинетические энергии в тех же сечениях.

Следовательно, согласно уравнению Бернулли, *полная удельная энергия идеальной жидкости в любом сечении постоянна*.

Уравнение Бернулли можно истолковать и чисто геометрически. Дело в том, что каждый член уравнения имеет линейную размерность, где:

z_1 и z_2 - геометрические высоты сечений *1-1* и *2-2* над плоскостью сравнения;

$\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - пьезометрические высоты;

$\frac{\upsilon_1^2}{2g}$ и $\frac{\upsilon_2^2}{2g}$ - скоростные высоты в указанных сечениях.

В этом случае уравнение Бернулли можно прочитать так: *сумма геометрической, пьезометрической и скоростной высоты для идеальной жидкости есть величина постоянная*. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости несколько отличается от уравнения для идеальной жидкости, т.к. при движении реальной вязкой жидкости возникают силы трения, на преодоление которых жидкость затрачивает энергию. В результате полная удельная энергия жидкости в сечении *1-1* будет больше полной удельной энергии в сечении *2-2* на величину потерянной энергии. Уравнение Бернулли для реальной жидкости будет иметь вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\upsilon_2^2}{2g} + h_{пот}^{1-2} = H = \text{const}$$

По мере движения жидкости от сечения *1-1* до сечения *2-2* потерянный напор все время увеличивается. Таким образом, уровень первоначальной энергии, которой обладает жидкость в первом сечении, для второго сечения будет складываться из четырех составляющих: геометрической высоты, пьезометрической высоты, скоростной высоты и потерянного напора между сечениями *1-1* и *2-2*. Кроме этого в уравнении появились еще два коэффициента α_1 и α_2, которые называются *коэффициентами Кориолиса* и зависят от режима течения жидкости ($\alpha = 2$ для ламинарного режима, $\alpha = 1$ для турбулентного режима). Потерянная высота $h_{пот}^{1-2}$ складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока)

$$h_{пот}^{1-2} = h_{лин} + h_{мест}$$

С помощью уравнения Бернулли решается большинство задач практической гидравлики. Для этого выбирают два сечения по длине потока, таким образом, чтобы для одного из них были известны величины P, ρ, g, а для другого сечения одна или величины подлежали определению. При двух неизвестных для второго сечения используют уравнение постоянства расхода жидкости $\upsilon_1\omega_1 = \upsilon_2\omega_2 = cons$. Потери напора на единицу длины потока называются *гидравлическим уклоном.*

Пример

Определить, на какую высоту поднимается вода в трубке, один конец которой присоединен к суженному сечению трубопровода, а другой конец опущенв воду. Расход воды в трубопроводе Q=0,025 м³/с, избыточное давление $p1=49 \cdot 10^3$ Па, диаметр d1=100 мм, d2=50 мм.

Решение. Выберем два сечения относительно оси трубопровода: 1-1 в трубке, конец которой присоединен к суженному сечению трубопровода, 2-2 в трубке, конец которой опущен в воду. Напишем уравнение Бернулли для выбранных сечений (потерями напора пренебрегаем и считаем, что $\alpha 1 = \alpha 2 = 1$):

$$\frac{P_{11}}{\rho g}+\frac{\vartheta_1^2}{2g}=\frac{P_2}{\rho g}+\frac{\vartheta_2^2}{2g}$$

Учитывая, что

$$\vartheta_1=\frac{4Q}{\pi d_1^2} \quad \text{и} \quad \vartheta_2=\frac{4Q}{\pi d_2^2}$$

после преобразования получим

$$\frac{P_2}{\rho g}=\frac{P_1}{\rho g}+\frac{4^2Q^2}{2g\pi^2}\left(\frac{1}{d_1^4}-\frac{1}{d_2^4}\right)=\frac{49\cdot 10^3}{1000\cdot 9{,}81}+\frac{4^2\cdot 0{,}025^2}{2\cdot 9{,}81\cdot 3{,}14^2}\left(\frac{1}{0{,}1^4}-\frac{1}{0{,}05^4}\right)=-2{,}76\text{м}$$

Полученная отрицательная высота – вакуумметрическая высота. На эту высоту и поднимается вода в трубке.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. В трубе внутренним диаметром 62 мм течет жидкость со средней скоростью 1,2 м/сек. Определить объемный расход жидкости.

Ответ: 0,00367 м^3/сек.

Задача 2. По трубопроводу внутренним диаметром 100,3 мм перекачивается нефть плотностью 860,0 кг/м^3 со средней скоростью 1,1 м/сек. Определить суточную пропускную способность трубопровода.

Ответ: 6,45-10^5 кг.

Задача 3. Вычислить гидравлический радиус потока воды в открытом канале трапецеидальной формы, размеры которого: узкой части 2,5 м, уровень воды в канале 1 м.

Ответ: 0,657м

Задача 4. Вычислить гидравлический радиус потока воды в открытом канале треугольного сечения при H = 0,8 м.

Ответ: 0,1655 м.

Задача 5. По вентиляционному каналу прямоугольного сечения, размеры которого 400 х 500 мм, движется воздух. Определить гидравлический радиус потока воздуха. Ответ: 111 мм.

Задача 6. Для потока жидкости прямоугольного сечения с площадью живого сечения F=1,2 $м^2$ найти такие размеры потока b и h, чтобы гидравлический радиус был наименьшим.

Ответ: h = 0,774 м, b = 1,548 м.

Задача 7. Насос перекачивает 65 $дм^3$/сек воды из открытого бассейна в резервуар, в котором поддерживается давление на 2,5 ат выше атмосферного. Начальная точка трубопровода выше конечной на 8 м. Длина трубопровода 2650 м, гидравлический уклон 0,0095.

Определить мощность двигателя, приводящего в движение насос, если к. п. д. насоса равен 0,72, к. п. д. передачи от двигателя к насосу равен 1,0.

Ответ: 37,8 кВт.

Задача 8. На какую высоту h может засосаться вода из резервуара по трубе, присоединенной к узкому сечению трубопровода, если по нему протекает вода с расходом Q= 6,5 $м^3$/сек.

Средняя скорость движения воды в широком сечении равна 1,2 м/сек, давление в нем равно 12000 Па. Площадь широкого сечения в 3 раза больше площади узкого сечения.

Потерями напора пренебречь.

Ответ: ~0,7 м.

Задача 9. По трубопроводу, имеющему сужение, перекачивается вода. Расход воды Q=22 $дм^3$/сек. Диаметр трубопровода d_1=200 мм, давление в первом сечении P1= 12000 Па.

Каким должен быть диаметр узкой части трубопровода, чтобы обеспечить всасывание воды из резервуара на высоту h = 3,1 м? Потерями напора пренебречь.

Ответ: 52,3 мм.

Контрольные вопросы

1. Дать определение идеальной и реальной жидкости.

2. Отличие уравнений Бернулли для потока реальной жидкости от

уравнения Бернулли для идеальной жидкости?

3. В чем заключается физический смысл числа Рейнольдса?

4. Какой физический закон лежит в основе вывода уравнения Бернулли?

5. Какие параметры потока жидкости связывает между собой уравнение Бернулли?

6. Что такое гидравлический уклон?

7. Чем отличается уравнение Бернулли для струйки тока от уравнения Бернулли для потока?

2.2. Гидравлические сопротивления

Цель практического занятия: применение формулы Дарси-Вейсбаха для нахождения величины потери напора при ламинарном и турбулентном режимах; определение эквивалентной шероховатости трубопровода.

Потери энергии (уменьшение гидравлического напора) можно наблюдать в движущейся жидкости не только на сравнительно длинных участках, но и на коротких. В одних случаях потери напора распределяются (иногда равномерно) по длине трубопровода — это линейные потери; в других - они сосредоточены на очень коротких участках, длиной которых можно пренебречь, - на так называемых местных гидравлических сопротивлениях: вентили, всевозможные закругления, сужения, расширения и т.д., короче всюду, где поток претерпевает деформацию. Источником потерь во всех случаях является вязкость жидкости. При наблюдении за движением жидкости в трубах и каналах, можно заметить, что в одном случае жидкость сохраняет определенный строй своих частиц, а в других - перемещаются бессистемно. Однако исчерпывающие опыты по этому вопросу были проведены Рейнольдсом в 1883 г. *Ламинарным* называется слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсации скорости и давления. При ламинарном течении жидкости в прямой трубе постоянного сечения все линии тока направлены параллельно оси трубы, при этом отсутствуют поперечные перемещения частиц жидкости. *Турбулентным* называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений. Наряду с основным продольным перемещением жидкости наблюдаются поперечные перемещения и вращательные движения отдельных объемов жидкости. Переход от ламинарного режима к турбулентному наблюдается при определенной скорости движения жидкости. Эта скорость называется *критической* $\upsilon_{кр}$. Значение этой скорости прямо пропорционально кинематической вязкости жидкости и обратно пропорционально диаметру трубы: $$\upsilon_{кр} = \frac{\nu}{d} \cdot k$$

где ν - кинематическая вязкость;

k - безразмерный коэффициент;

d - внутренний диаметр трубы.

Входящий в эту формулу безразмерный коэффициент k, одинаков для всех жидкостей и газов, а также для любых диаметров труб. Этот коэффициент называется *критическим числом Рейнольдса* $Re_{кр}$ и определяется следующим образом:

$$Re_{кр} = \frac{\upsilon_{кр} d}{\nu}$$. Как показывает опыт, для труб круглого сечения $Re_{кр}$ примерно равно 2300. Таким образом, критерий подобия Рейнольдса позволяет судить о режиме течения жидкости в трубе. При $Re < Re_{кр}$ течение является ламинарным, а при $Re > Re_{кр}$ течение является турбулентным. Точнее говоря, вполне развитое турбулентное течение в трубах устанавливается лишь при Re примерно равно 4000, а при Re = 2300…4000 имеет место переходная, критическая область. Режим движения жидкости напрямую влияет на степень гидравлического сопротивления трубопроводов.

Потери напора при ламинарном течении жидкости

Как показывают исследования, при ламинарном течении жидкости в круглой трубе максимальная скорость находится на оси трубы. У стенок трубы скорость равна нулю, т.к. частицы жидкости покрывают внутреннюю поверхность трубопровода тонким неподвижным слоем. От стенок трубы к ее оси скорости нарастаю плавно. *График распределения скоростей по поперечному сечению потока представляет собой параболоид вращения*, а сечение параболоида осевой плоскостью - квадратичную параболу. Для определения потерь напора в круглой трубе применяется формула Дарси-Вейсбаха

$h_{пот} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}$, где коэффициент гидравлического трения λ определяется как: $\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$. Однако при ламинарном режиме для определения коэффициента гидравлического трения Т.М. Башта рекомендует при Re < 2300 применять формулу $\lambda = \frac{75}{\mathrm{Re}}$.

Режим движения		**Число Рейнольдса**	**Определение λ**
Ламинарный		Re < 2300	$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$ или $\lambda = \frac{75}{\mathrm{Re}}$
Переходный		2300 < Re < 4000	*Проектирование трубопроводов не рекомендуется*
Турбулентный	1-я область	$4000 < \mathrm{Re} < 10\frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_т = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0,25}}$ (ф-ла Блазиуса) $\lambda_т = \frac{1}{(1{,}81\lg \mathrm{Re} - 1{,}5)^2}$ (ф-ла Конакова)
	2-я область	$10\frac{d}{\Delta_э} < \mathrm{Re} < 560\frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_т = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля)
	3-я область	$\mathrm{Re} > 560\frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_т = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{d}\right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля) $\frac{1}{\sqrt{\lambda_т}} = -2\lg\left(\frac{\Delta_э}{3{,}71d}\right)$ (ф-ла Никурадзе)

Потери напора при турбулентном течении жидкости

Основной расчетной формулой для потерь напора при турбулентном течении жидкости в круглых трубах является уже приводившаяся выше эмпирическая формула, называемая формулой Вейсбаха-Дарси и имеющая следующий вид:

$$h_{пот} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}$$

Различие заключается лишь в значениях коэффициента гидравлического трения λ. Этот коэффициент зависит от числа Рейнольдса Re и от безразмерного геометрического фактора - относительной шероховатости Δ/d (или Δ/r_0, где r_0 - радиус трубы).

Пример

Горизонтальная труба диаметром d1=0,1 м внезапно переходит в трубу диаметром d2=0,15 м. Расход воды Q=0,03 м³/с. Требуется определить: а) потери напора при внезапном расширении трубы; б) разность давлений при постепенном расширении трубы (считая потери напора пренебрежимо малыми).

Решение. а) Находим потери напора трубопровода при внезапном расширении трубопровода по формуле Борда

$$h_{вр} = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)^2}{2g}$$

$$\vartheta_1 = \frac{Q}{F_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{0{,}03 \cdot 4}{3{,}14 \cdot 10^{-2}} = 3{,}82 \text{ м/с};$$

$$\vartheta_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \vartheta_1 = \left(\frac{0{,}1}{0{,}15}\right)^2 \cdot 3{,}82 = 1{,}7 \text{ м/с};$$

$$h_{вр} = \frac{(3{,}82 - 1{,}7)^2}{2 \cdot 9{,}81} = 0{,}23 \text{ м}$$

б) Если бы был обеспечен плавный переход от трубы узкого сечения к трубе широкого сечения, то разность давлений определялась бы из уравнения

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\vartheta_1^2 - \vartheta_2^2}{2g} = \frac{(3{,}82^2 - 1{,}7^2)}{2 \cdot 9{,}81} = 0{,}596 \text{ м}$$

$$p_2 - p_1 = 0{,}596 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 = 5847 \text{ Па.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. На трубопроводе диаметром 76 мм имеется внезапное сужение до диаметра 50 мм. По трубопроводу перекачивается вода со скоростью 6,5 л/сек. Определить потерю напора воды при прохождении ее через сужение трубопровода.

Ответ: 0,185 м.

Задача 2. На трубопроводе диаметром 50 мм имеется внезапное расширение до диаметра 76 мм. По трубопроводу перекачивается вода со скоростью 6,5 л/сек. Определить потерю напора при протекании воды через местное сопротивление.

Ответ: 0,0314 м.

Задача 3. Вода по трубопроводу с установленным на нем тройником перекачивается в два резервуара. Скорость движения воды в трубопроводе за тройником равна 0,86 м/сек. Определить потерю напора воды при прохождении ее через тройник.Ответ: 0,0565 м.

Задача 4. На всасывающем трубопроводе диаметром 200 мм и длиной 21 м имеется всасывающий клапан с сеткой и отвод, изогнутый по кривой радиуса350 мм. Скорость движения воды по трубе 0,9 м/сек.

Эквивалентная шероховатость труб $kэ$=0,14 мм. Определить расчетную длину всасывающего трубопровода.

Ответ: 75,53 м.

Задача 5. С целью опытного определения коэффициента шероховатости стального трубопровода диаметром 76 мм была измерена потеря напора на участке длиной 10,2 м. При перекачке по нему 163 $м^3/ч$ воды потеря напора оказалась равной 1,6 м.

Вычислить эквивалентную шероховатость труб.

Ответ: 0,17 мм.

Задача 6. По трубопроводу диаметром 100 мм и длиной 2850 м перекачивается

нефть плотностью 845 кг/м^3. Вязкость нефти равна 3 сСт, расход - 9,5 дм^3/сек.

На трубопроводе имеется четыре полностью открытые задвижки, один обратный клапан и одна диафрагма с диаметром отверстия 56 мм.

Эквивалентная шероховатость труб $\kappa_э$ = 0,15 мм.

Определить потерю напора в трубопроводе и эквивалентную длину трубопровода.

Ответ: h_{1-2} = 49 м; $1_Э$ = 113,5 м.

Задача 7. Найти эквивалентную длину и потерю напора в трубопроводе, состоящем из трубы диаметром 100 мм, длиной 300 м, четырех отводов радиусами 200 мм, шести открытых задвижек и одного обратного клапана.

Коэффициент гидравлического сопротивления принять равным λ=0,024; среднюю скорость течения жидкости ϑ =1 м/сек.

Ответ: h_{1-2} =4,12м; lэкв=36,2 м.

Задача 8. По стальной трубе диаметром 1000 мм течет вода со скоростью 4 м/сек. Эквивалентная шероховатость трубы $\kappa_э$=0,5 мм. Определить закон сопротивлений и гидравлический уклон *i*.

Ответ: квадратичный, i = 0,0159.

Задача 9. Определить режим движения воды по прямоугольному каналу. Расход воды Q=240 м^3/ч, глубина заполнения канала h=0,8 м, ширина канала b=1,2 м.

Ответ: турбулентный.

Задача 10. Определить критический расход воды по прямоугольному каналу шириной 1200 мм, если глубина заполнения канала h=42 см.

Ответ: 0,0018 м^3/сек.

Задача 11. Определить потерю напора в нефтепроводе длиной 56 км и диаметром 200 мм при следующих данных; средняя скорость движения нефти 1,3 м/сек, плотность нефти 892 кг/м^3, кинематический коэффициент вязкости нефти 3,5 сПз.

Ответ: 2340 м.

Задача 12. По трубопроводу диаметром 150 мм перекачивается нефть, кинематический коэффициент вязкости которой $2{,}8\text{-}10^{-6}$м^2/сек. Расход нефти равен 44 дм^3/сек.

Приняв режим движения ламинарным, определить гидравлический уклон потока нефти.

Ответ: 0,00101.

Контрольные вопросы

1. По каким формулам определяются потери напора в трубах по длине?
2. От каких безразмерных величин может зависеть коэффициент гидравлического сопротивления?

3.Написать формулу Дарси-Вейсбаха.

4.Объяснить физический смысл коэффициента потерь на трение по длине трубы.

5. Назвать основные зоны сопротивления при турбулентном течении на графике И.И. Никурадзе и объяснить их физический смысл.

6. Что называется относительной шероховатостью и относительной гладкостью поверхности?

7. Эквивалентная шероховатость.

2.3. Определение скоростей и расходов жидкости

Цель практического занятия: найти расход жидкости в трубопроводе; определить кинетическую энергию реальной жидкости.

Для измерения скорости в точках потока широко используется работающая на принципе уравнения Бернулли трубка Пито (рис.10.1.), загнутый конец которой направлен навстречу потоку. Пусть требуется измерить скорость жидкости в какой-то точке потока. Поместив конец трубки в указанную точку, и составив уравнение Бернулли для сечения *1-1* и сечения, проходящего науровне жидкости в трубке Пито, получим

$$\frac{P_{am}+\gamma h}{\gamma}+\frac{\upsilon^2}{2g}=H+h+\frac{P_{am}}{\gamma} \quad \text{или} \quad \upsilon=\sqrt{2gH}$$

где H - столб жидкости в трубке Пито.

Для измерения расхода жидкости в трубопроводах часто используют расходомер Вентури, действие которого основано так же на принципе уравнения Бернулли.

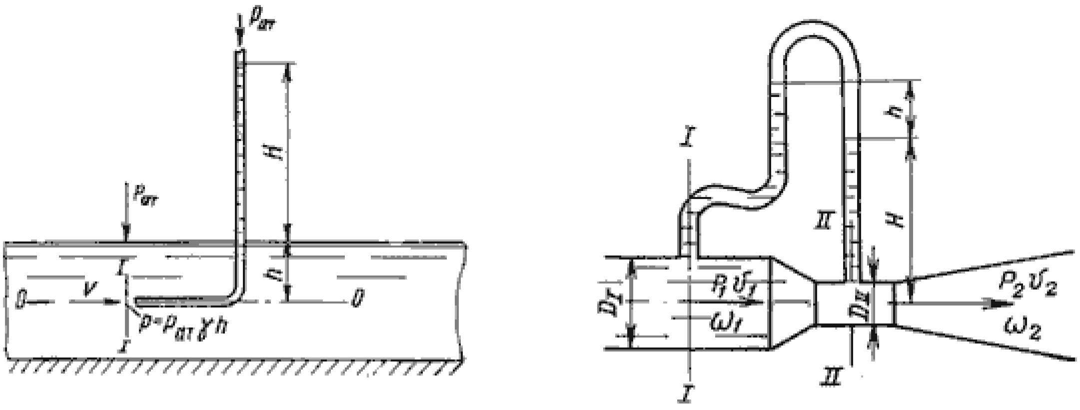


Рисунок. 2.1 Трубка Пито и расходомер Вентури

Расходомер Вентури состоит из двух конических насадков с цилиндрической вставкой между ними (рис.10.1.). Если в сечениях *I-I* и *II-II* поставить пьезометры, то разность уровней в них будет зависеть от расхода жидкости, протекающей по трубе. Пренебрегая потерями напора и считая z1 = z2 , напишем уравнение Бернулли для сечений *I-I* и *II-II*:

$$\frac{P_1}{\gamma}+\frac{\upsilon_1^2}{2g}=\frac{P_2}{\gamma}+\frac{\upsilon_2^2}{2g} \qquad \text{или} \qquad h=\frac{P_1-P_2}{\gamma}=\frac{\upsilon_1^2}{2g}\left[-1+\left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^2\right]$$

Используя уравнение неразрывности

$$Q=\upsilon_1\omega_1=\upsilon_2\omega_2$$

сделаем замену в полученном выражении:

$$h=\frac{Q^2}{2g\omega_1^2}\left[-1+\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\right].$$

Решая относительно Q, получим:

$$Q=\omega_1\omega_2\sqrt{\frac{2g}{\omega_1^2-\omega_2^2}}\cdot\sqrt{h}$$

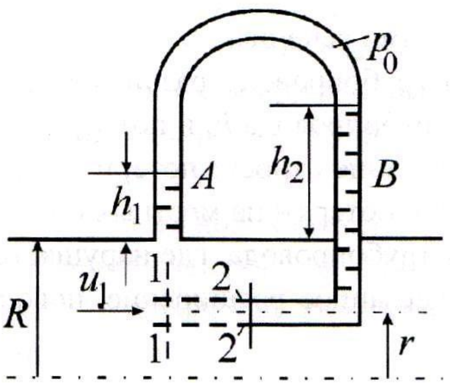
Выражение, стоящее перед $\sqrt{h}$,, является постоянной величиной, носящей название постоянной водомера Вентури. Из полученного уравнения видно, что h зависит от расхода Q. Часто эту зависимость строят в виде тарировочной кривой h от Q, которая имеет параболический характер.

Пример

Определить, пренебрегая потерями напора, скорость течения нефти на расстоянии r от оси трубопровода радиусом R при помощи трубки Пито. Уровень жидкости в трубке А h_1=1,2 м, в трубке В h_2=1,35 м.

Решение: Учитывая, что h_{1-2} по условию из уравнения Бернулли для струйки, проходящей на расстоянии r от оси трубы, имеем:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g}.$$



С учетом того, что давление в трубках и живых сечениях потока распределено по гидростатическому закону, получим:

$$p_1 = p_0 + pg(h_1 + R - r), p_2 = p_0 + pg(h_2 + R - r)$$

и $$\frac{u_1^2}{2} = h_2 - h_1,$$

откуда $$u_1 = \sqrt{2g(h_2 - h_1)} = \sqrt{2 \cdot 9{,}8(1{,}35 - 1{,}20)} = 1{,}71 м/с.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Во сколько раз увеличивается удельная кинетическая энергия жидкости при ее переходе в трубу меньшего диаметра, если отношение диаметров труб 3:1? Режим течения не изменяется.

Задача 2. Жидкость течет по конической трубе кругового сечения. При x=0 радиус трубы R_1=0,1м, а при x=1м R=0,2м. Расход жидкости Q=0,01 $м^3/с$.

Определить зависимость средней скорости ν от x и построить линии тока и живые сечения.

Ответ: $\nu=1/(\pi(1+x)^2)$; линии тока - радиусы с центром в точке x=-1м, живые сечения - участки сферы, ограниченные конусом, и с центром в той же точке.

Задача 3. По трубопроводу диаметром d=0,15м перекачивается нефть плотностью ρ=950 $кг/м^3$ в количестве 1500 т/сут.

Определить объемный расход Q и среднюю скорость течения ν.

Ответ: Q=0,0183 $м^3$/сек, ν=1,03 м/с.

Задача 4. Определить критический расход воды по прямоугольному каналу шириной 1200 мм, если глубина заполнения канала h=42 см.

Ответ: 0,0018 $м^3$/сек.

Задача 5. Определить потерю напора в нефтепроводе длиной 56 км и диаметром 200 мм при следующих данных; средняя скорость движения нефти 1,3 м/сек, плотность нефти 892 $кг/м^3$, кинематический коэффициент вязкости нефти 3,5 сПз.

Ответ: 2340 м.

Задача 6. По трубопроводу диаметром 150 мм перекачивается нефть, кинематический коэффициент вязкости которой 2,8-10^{-6} $м^2$/сек. Расход нефти равен 44 $дм^3$/сек.

Приняв режим движения ламинарным, определить гидравлический уклон потока нефти.

Ответ: 0,00101.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы используются для измерения скорости жидкости?
2. Какие приборы используются для измерения расхода жидкости?
3. На чем основан принцип работы расходомера Вентури?
4. Как измеряется скорость при помощи трубки Пито?
5. Перечислить стандартные сужающие устройства.
6. С помощью какого уравнения устанавливается зависимость между расходом потока жидкости и разностью давлений?
7. Гидростатическое давление в пределах суженного сечения будет большим или меньшим относительно давления перед сужающим устройством?

Глава 3. Расчет трубопроводов

3.1. Расчет простых трубопроводов

Цель практического занятия: определить расход жидкости в простом трубопроводе; определить гидравлические потери и гидравлический уклон при движении жидкости в простом трубопроводе.

При расчетах напорных трубопроводов основной задачей является либо определение пропускной способности (расхода), либо потери напора на том или ином участке, равно как и на всей длине, либо диаметра трубопровода на заданных расходе и потерях напора. В практике трубопроводы делятся на *короткие* и *длинные*. К первым относятся все трубопроводы, в которых местные потери напора превышают 5…10% потерь напора по длине. При расчетах таких трубопроводов обязательно учитывают потери напора в местных сопротивлениях. К ним относят, к примеру, маслопроводы объемных передач. Ко вторым относятся трубопроводы, в которых местные потери меньше 5…10% потерь напора по длине. Их расчет ведется без учета местных потерь. Ктаким трубопроводам относятся, например, магистральные водоводы, нефтепроводы. Учитывая гидравлическую схему работы длинных трубопроводов, их можно разделить также на *простые* и *сложные*. Простыми называются последовательно соединенные трубопроводы одного или различных сечений, не имеющих никаких ответвлений. К сложным трубопроводам относятся системы труб с одним или несколькими ответвлениями, параллельными ветвями и т.д. К сложным относятся и так называемые кольцевые трубопроводы.

Пример

Насос (рис. 3.1.) подает дизельное топливо (ρ = 840 кг/м^3, ν = 5,5·10^{-6} м^2/с) из нижнего резервуара в верхний с расходом Q = 16 дм^3/с, давление на поверхностях жидкости в резервуарах одинаковое. Высота подъема топлива H = 20 м, H_1=3 м. На всасывающей линии ($l_в$ = 10 м, $d_в$ = 125 мм) установлены фильтр для светлых нефтепродуктов и задвижка, на нагнетательной линии ($l_н$= 800 м, $d_н$ = 100 мм) эквивалентная длина местных сопротивлений оценивается в 5% от ее реальной длины. Все трубы новые сварные.

Определить:

1) напор, создаваемый насосом, и его полезную мощность;

2) тип прибора (манометр или вакуумметр), установленный перед насосом в конце всасывающей линии.

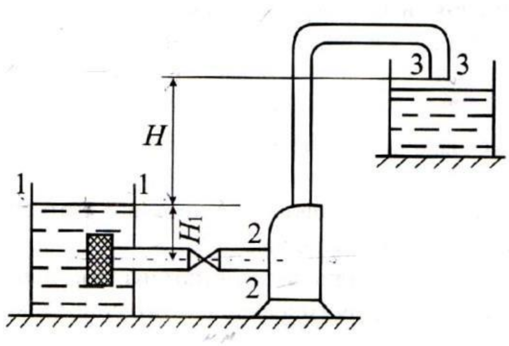


Рисунок. 3.1

Решение 1. Для определения создаваемого насосом напора $H_{нас}$ запишем уравнение баланса напоров для начального *1 – 1* и конечного *3 – 3* живых сечений потока:

$$H_{нас} - H - \frac{\alpha_н \upsilon_н^2}{2g} = h_{1-3} = \left(\lambda_в \frac{l_в}{d_в} + \sum \zeta_в\right)\frac{\upsilon_в^2}{2g} + \lambda_н \frac{l_{пр}}{d_н}\frac{\upsilon_н^2}{2g}, \qquad (1)$$

где индекс «в» относится к всасывающей, а «н» – к нагнетательной линии соответственно.

2. Найдем входящие в это уравнение неизвестные величины.

Для всасывающей линии:

$$\upsilon_в = \frac{Q}{s_в} = \frac{4 \cdot 16 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot 0{,}125^2} = 1{,}3 м/с; \qquad \mathrm{Re} = \frac{\upsilon_в d_в}{\nu} = \frac{1{,}3 \cdot 0{,}125}{5{,}5 \cdot 10^{-6}} = 29{,}6 \cdot 10^3;$$

Режим течения - турбулентный. Необходимо установить зону сопротивления. По величине, взятой из таблицы, шероховатость Δ = 0,05 мм. Тогда

$$10\frac{d_в}{\Delta} = 10\frac{125}{0{,}05} = 25\cdot 10^3;\ 500\frac{d_в}{\Delta} = 125\cdot 10^3;$$

$$10\frac{d}{\Delta} < \mathrm{Re} < 500\frac{d}{\Delta},$$

т.е. зона сопротивления – гидравлически шероховатые трубы.

$$\lambda_в = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}_в} + \frac{\Delta}{d_в}\right)^{0{,}25} = 0{,}11\left(\frac{68}{29{,}6\cdot 10^3} + \frac{0{,}05}{125}\right)^{0{,}25} = 0{,}0251.$$

Определим значения коэффициентов местных сопротивлений (по таблице). Для фильтра $\zeta_ф = 1{,}7$, для задвижки $\zeta_з = 0{,}15$; $\sum \zeta_в = 1{,}85$.

Для нагнетательной линии:

$$\upsilon_н = Q/s_н = \frac{4\cdot 16\cdot 10^{-3}}{3{,}14\cdot 10^{-2}} = 2{,}04 м/с;$$

$$\mathrm{Re}_н = \frac{\upsilon_н d_н}{\nu} = \frac{2{,}04\cdot 0{,}1}{5{,}5\cdot 10^{-6}} = 37\cdot 10^3;$$

$$\alpha_н = 1; \qquad 10\frac{d_н}{\Delta} = 10\frac{100}{0{,}05} = 20\cdot 10^3;$$

$$500\frac{d_н}{\Delta} = 500\frac{100}{0{,}05} = 10^5;\ 10\frac{d}{\Delta} < \mathrm{Re} < 500\frac{d}{\Delta};$$

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}_н} + \frac{\Delta}{d_н}\right)^{0{,}25} = 0{,} = 242;$$

$$l_{пр} = l_н + 0{,}05 l_н = 800 + 800\cdot 0{,}05 = 840 м.$$

3. Из уравнения (1) имеем:

$$H_{нас} = H + \frac{\alpha_н \upsilon_н^2}{2g} + \left(\lambda_в \frac{l_в}{d_в} + \sum \zeta_в\right)\frac{\upsilon_в^2}{2g} + \lambda_н \frac{l_{пр}}{d_н}\frac{\upsilon_н^2}{2g};$$

$$H_{нас} = 20 + \frac{2\cdot 0{,}4^2}{19{,}62} + (0{,}0251\frac{10}{0{,}125} + 1{,}85)\frac{1{,}3^2}{19{,}62} + 0{,}0242\frac{840}{0{,}1}\frac{2{,}04^2}{19{,}62} =$$
$$20 + 0{,}21 + 0{,}33 + 43{,}09 = 63{,}6 м.$$

Попутно, сравнивая полученные значения входящих в уравнения величин, видим, что скоростной напор (0,21 м) по сравнению с H и $h_{1\text{-}3}$ величина пренебрежимо малая (около 0,3% от их суммы).

4. Определим полезную мощность насоса:

$$N_п = \rho g Q H_{нас} = 840 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}016 \cdot 63{,}6 = 8{,}39 кВт.$$

5. Определим тип прибора, установленный у насоса (в сечении *2 – 2*). Для этого составим уравнение Бернулли для сечений *1 – 1* и *2 – 2*.

$$H_1 + \frac{p_а - p_2}{\rho g} - \frac{\alpha_н \upsilon_н^2}{2g} = h_{1-2} = \left(\lambda_в \frac{l_в}{d_в} + \sum \zeta_в\right)\frac{\upsilon_в^2}{2g};$$

откуда

$$p_а - p_2 = \left[-H_1 + \left(\lambda_в \frac{l_в}{d_в} + \sum \zeta_в\right)\frac{\upsilon_в^2}{2g} + \frac{\alpha_в \upsilon_в^2}{2g}\right]\rho g = (-3 + 0{,}33 + 0{,}09) \cdot 840 \cdot 9{,}81 = -21{,}3 кПа.$$

Если $p_а$ – p_2 – величина отрицательная, то $p_2 > p_а$ и p_2 - $p_а$ = +21,3 кПа – давление избыточное. Следовательно, в сечении *2 – 2* установлен манометр.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Керосин (ρ = 780 кг/м^3, ν = 1,5·10^{-6} м^2/с) поступает из резервуара (рис. 11.2.) в стояк для налива цистерн. Разность нивелирных отметок

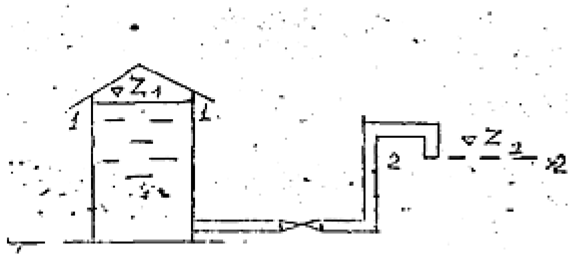


Рисунок.3.2

уровня жидкости в резервуаре и сечения выхода жидкости из стояка $z_1 - z_2$ = 8 м, трубы (l = 300 м, d = 205 мм) стальные сварные умеренно заржавленные. Местные сопротивления показаны на рисунке. Определить расход керосина.

Ответ: Q=64,4 дм^3/с.

Задача 2. По приведенному на рис. 11.3. сифонному сливу (l = 50 м, d = 100 мм, Δ = 0,06 мм) подается топливо (ρ = 840 кг/м^3, ν = 5,5·10^{-6} м^2/с) при разности отметок уровней в резервуарах H_1 = 1,38 м. На сливе имеются фильтр длясветлых нефтепродуктов, два колена и вентиль; H_2 = 3 м, H_3 = 2 м, давление насыщенных паров при температуре перекачки $p_п$ = 2 кПа, $p_а$ = 10^5 Па.

Определить расход жидкости и проверить условие нормальной работы сифона.

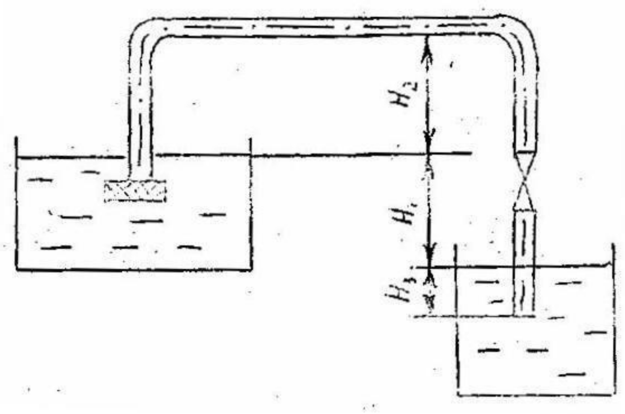


Рисунок.3.3

Ответ: Q=10 дм^3/с; сифонный слив работать не будет.

Задача 3. Минеральное масло (плотностью ρ=810 кг/м^3, вязкостью $\nu=3*10^{-4}$ м^2/с) перекачивается из открытого резервуара (рис 11.4.) потребителю с расходом Q=7,55 дм^3/с. Высота всасывания h=2м, показания вакуумметра, установленного в конце всасывающей линии (L=10м, d=80 мм, трубы сварные, новые), $p_{всас}$=49,1 кПа.

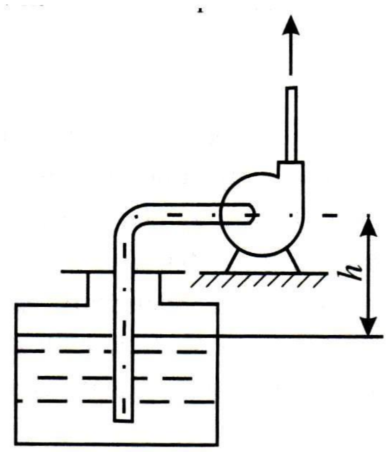


Рисунок.3.4

Определить суммарный коэффициент местных сопротивлений на всасывающей линии, считая его не зависящим от числа Re.

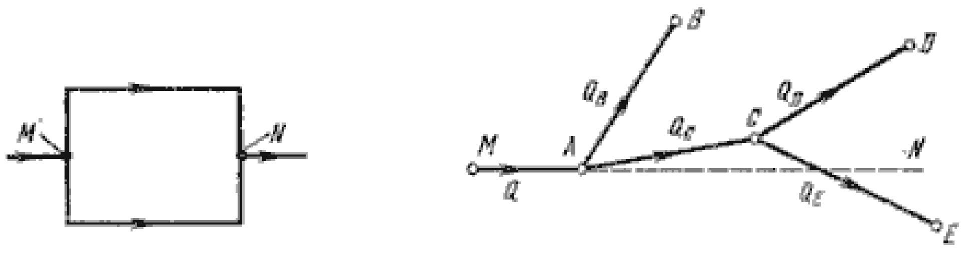
Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены трубопроводы?
2. Классификация трубопроводов.
3. В чем отличие простого трубопровода от трубопровода с последовательным соединением (сложного)?
4. Какие трубопроводы называются простыми?
5. Какие трубопроводы называются сложными?
6. Основные задачи расчета простого трубопровода.

3.2. Расчет сложных трубопроводов

Цель практического занятия: построение кривой потребного напора сложных трубопроводов; построение гидравлической характеристики трубопровода для нахождения расхода жидкости.

Сложный трубопровод в общем случае составлен из простых трубопроводов с последовательным и параллельным их соединением (рис. 12.1, а) или с разветвлениями (рис. 12.1. б).



а) б)

Рисунок. 3.5 Схемы сложных трубопроводов

Расчет сложных трубопроводов часто выполняют графоаналитическим способом, т.е. с применением кривых потребного напора и характеристик трубопроводов. Кривую потребного напора для сложного трубопровода следует строить следующим образом:

1) сложный трубопровод разбивают на ряд простых;
2) строят кривые потребных напоров для каждого из простых трубопроводов;складывают кривые потребных напоров для ветвей (и параллельных линий, если они имеются) по правилу сложения характеристик параллельных трубопроводов;
3) полученную кривую складывают с характеристикой последовательно присоединенного трубопровода по соответствующему правилу.

Таким образом, при расчете идут от конечных точек трубопровода к начальной точке, т.е. против течения жидкости.

Пример

Вода (t = 20°C) перетекает из резервуара A в резервуар B, давления на поверхности жидкости в которых одинаковы (рис. 12.2.). Соединительный трубопровод состоит из двух последовательно соединенных участков новых бесшовных труб (l_1 = 200 м, d_1 = 100 мм и l_2 = 150 м, d_2 = 80 мм), для обеих труб $l_{экв} = 0{,}05l$, h = 3 м.

Определить: Расход воды.

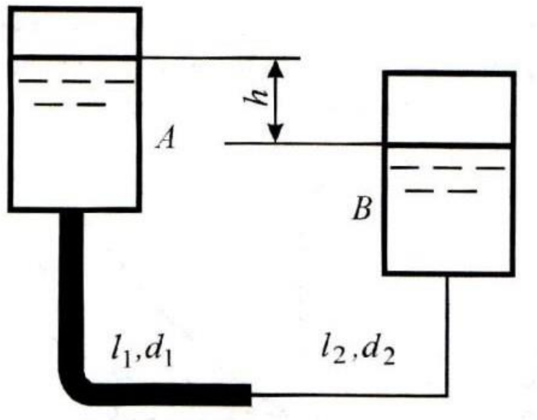


Рисунок. 3.6

Решение. Хотя вода - жидкость маловязкая ($\eta = 10^{-3}$ Па· с), но квадратичная зона сопротивления сомнительна, так как мала эквивалентная шероховатость труб (Δ = 0,014 мм). Поэтому решаем задачу графоаналитическим способом.

1. Зададимся рядом значений Q и вычислим соответствующие этим значениям $h_{пот}$ для каждого из участков, после чего суммируем их для каждого Q. Полученные результаты приведены ниже, где $h_{общ} = h_1 + h_2$.

$Q\ 10^3$, м^3/с............	2	3	4	5	6	7	8
h_1, м.....................	0,18	0,36	0,60	0,89	1,23	1,62	2,06
h_2, м…	0,38	0,79	1,31	1,96	2,72	3,59	4,56
$h_{общ}$, м.................	0,56	1,15	1,91	2,85	3,95	5,21	6,63

2. По выбранным значениям Q и вычисленным для них $h_{общ}$ строим

гидравлическую характеристику всего трубопровода.

3. Составив уравнение Бернулли для живых сечений, выбранных по уровням жидкости в резервуарах, получим: $h = H_д = h_{общ}$,

4. Отложив на оси ординат величину $H_д$ = 3 м, находим искомый расход Q = 5, 15 дм^3 /с.

Ответ: Q=5,15 дм^3/с.

Убедимся, что предположение о квадратичном законе сопротивления было бы ошибочным.

$$\mathrm{Re}_2 = \frac{4Q\rho}{\pi d_2 \eta} = \frac{4 \cdot 5{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{3}}{3{,}14 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3}} = 82 \cdot 10^{3},$$

$$500\frac{d_2}{\Delta} = 500\,\frac{80}{0{,}014} = 2{,}85 \cdot 10^{6}.$$

Проверка велась только по d_2, так как $Re_2 > Re_1$. Ответвления от основной магистрали быть замкнутыми (рис.12.3, *а*) и разомкнутыми (рис. 12.3, *б*).

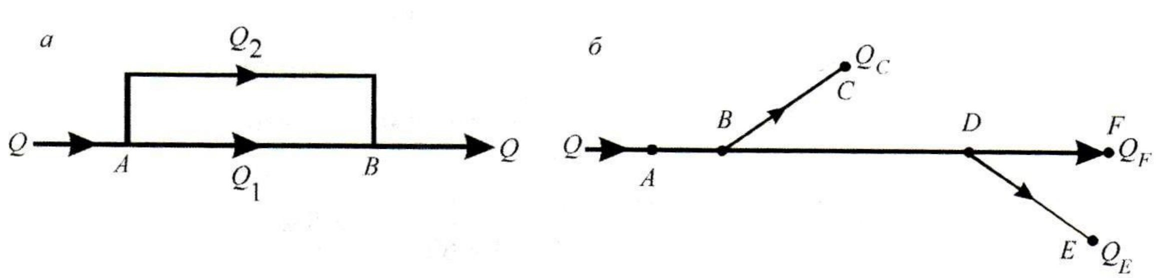


Рисунок. 3.7 Схемы сложных трубопроводов:

а – трубопровод с замкнутым ответвлением (лупингом); б – трубопровод с разомкнутыми ответвлениями

Для замкнутых ответвлений (лупингов) справедливы соотношения

$$Q_{\text{íáù}} = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n, \qquad (1)$$

$$h_{\text{íáù}} = h_1 = h_2 = \ldots = h_n, \qquad (2)$$

где $Q_{общ}$ и $h_{общ}$ – соответственно расход и потери напора на всем разветвленном участке. Следовательно, расход, проходящий через весь разветвленный участок, равен сумме расходов в отдельных ветвях (для рис. 12.3, *а* $Q_{общ} = Q_1 + Q_2$), а потери напора для всего разветвления и в любой его ветви равны между собой.

При аналитическом способе решения задачи на основании анализа исходных данных предсказывается режим движения (для турбулентного движения также зона сопротивления). Затем, используя соотношение (1) и (2), определяют скорость (или расход) в каждой из ветвей, после чего находят потери напора в одной из них. Принятое предположение подтверждается проверочными расчетами.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. По трубопроводу (см. рис. 2.9, *а*) перекачивается нефть (ρ = 900 кг/м^3, $\nu = 2\cdot10^4$ м^2/с) с расходом Q = 50 дм^3/с.

Определить относительное изменение потерь напора на участке *А-В* = 5 км (d_1 = 200 мм), если к нему подключить лупинг той же длины (d_2 = 260 мм). Трубы сварные новые, местными сопротивлениями пренебречь.

Ответ: $h/h_{А\text{-}В}$=3,85.

Задача 2. По временному трубопроводу (рис. 12.4) бензин (Q = 50 дм^3/с, ρ = 740 кг/м^3, ν = 0,55 10^{-6} м^2/с) подается в стоянки для залива цистерн. От основной линии ($AB = l$ = 2 км, $d_{AB} = d$ = 200 мм) в узле B поток разделяется в линии BC ($l_{BC} = l_1$ = 100 м, $d_{BC} = d_1$ = 125 мм) и BD ($l_{BD} = l_2$ = 150 м, $d_{BD} = d_2$ = 150 мм). Все трубы сварные умеренно заржавленные, превышение точек C и D над горизонтальной осью трубы AB: z_C = 10 м, z_D = 13 м.

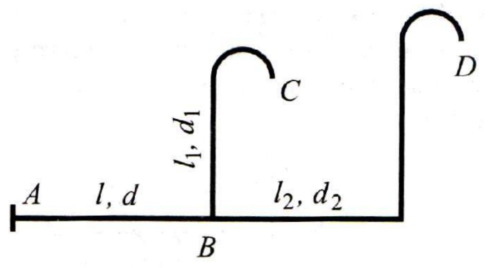


Рисунок.3.8

Определить расходы бензина Q_C и Q_D и избыточное давление p_A, развиваемое насосом. Местными сопротивлениями и скоростными напорами, пренебречь, конечное давление p_C и p_D атмосферное.

Ответ: p_A=111,5 кПа (избыточное); Q_c=26,6 дм^3/с; Q_D=23,4 дм^3/с.

Задача3.

Минеральное масло (ρ = 840 кг/м^3, ν = 10^{-4} м^2/с) по горизонтальному трубопроводу (см. рис. 2.9, *б*) подается к раздаточным пунктам *C, E* и *F*.

Расходы масла в этих пунктах: Q_C = 10,6 дм^3/с; Q_E = 6,8 дм^3/с; Q_F = 14 дм^3/с; концевые свободные напоры: H_C = 67 м, H_E = 0, H_F = 7 м; длины участков трубопровода l_{AB} = 3 м, l_{BC} = 1 км, l_{BD} = 2 км; l_{DE} = 1,5 км, l_{DF} = 1,5 км. Насос при заданных расходам в пунктах раздачи может создать напор H_A = 100 м, в наличии имеются новые сварные трубы диаметрами 80, 100, 125, 200, 250 мм.

Подобрать диаметры всех участков трубопровода, считая потери напора в местных сопротивлениях пренебрежимо малыми. Допустимое расхождение между реальными напорами H_A и расчетным – не более 5%.

Контрольные вопросы

1. Что включает в себя расчет сложного трубопровода?

2. На какие соединения подразделяются сложные трубопроводы?

3.Что такое кривая потребного напора?

4. как построить кривую потребного напора для трубопровода с последовательным соединением?

5. Как построить кривую потребного напора для трубопровода с параллельным соединением?

6. Что такое характеристическая кривая?

7. Как определить расход жидкости при последовательном соединении труб?

8. Как определяется напор в сложных трубопроводах?

3.3. Расчет толщины стенок цилиндрических поверхностей и труб

Цель практического занятия: рассчитать минимальную толщину стенки в случае возникновения гидравлического удара в трубопроводе.

В расчетной практике используется несколько различных формул для определения толщины стенки цилиндрических резервуаров и труб, находящихся под действием внутреннего давления. Так, согласно нормам ЦКТИ, толщину стенки δ следует определять по формуле

$$\delta = \frac{pD}{(2{,}3[\sigma] - p)\varphi} + C,$$

где p — внутреннее давление в *кГ/см*^{2}.;

D — внутренний диаметр цилиндра в *мм;*

$[\sigma]$ — допускаемое напряжение на растяжение для рассматриваемого материала трубы или резервуара в *кГ/см*^{2},

φ — коэффициент прочности;

C — прибавка к расчетной толщине стенки в *мм.*

$$\left(\frac{D}{\delta} \geq 1{,}6\right)$$

Для расчета $\delta = \frac{pD}{2\sigma}$ тонкостенных симметричных оболочек по безмоментной теории используется формула где σ-нормальное напряжение, действующее в окружном направлении. Практическая $\delta = \frac{pnD}{2[\sigma]}$, формула имеет следующий вид: где n- коэффициент надежности по нагрузке.

Толщину стенки толстостенного однослойного цилиндра можно вычислить по формуле Ляме, которая в принятых нами обозначениях имеет вид

$$\delta = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{[\sigma]+p}{[\sigma]-p}}-1\right).$$

Формулу Ляме применяют в основном для расчета цилиндров из хрупких материалов. Для расчета толстостенных цилиндров из вязких материалов следует пользоваться формулой

$$\delta = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{[\sigma]+p(1-2\mu)}{[\sigma]-p(1+\mu)}}-1\right).$$

где μ — коэффициент Пуассона; для стали μ = 0,3.

Для стальных цилиндров формула приобретает следующий вид:

$$\delta = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{[\sigma]+0{,}4p}{[\sigma]-1{,}3p}}-1\right).$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить толщину стенки нефтепродуктопровода диаметром d=530м и длиной L=160 км без промежуточных насосных станций, рассчитанного на рабочее давление P=6,4 МПа. Температура нефтеперекачиваемого продукта T=282 K.

Ответ: δ=0,00634 м.

Контрольные вопросы

1. Может ли деформироваться стенка трубопровода в случае гидравлического удара?

2. Зависит ли выбор толщины стенки от рабочего давления в трубопроводе?

3. От каких параметров зависит толщина стенки?

4. Какие силы действуют на материал стенки трубы круглого поперечного сечения?

5. Какие силы возникают в материале трубы при движении жидкости в трубопроводе?

3.4. Гидравлический удар в трубопроводах. Формула Жуковского

Цель практического занятия: определение перепада давления в трубопроводе по формуле Жуковского; определение напряжения в материале трубы вслучае внезапной остановки жидкости.

Гидравлический удар в трубопроводе – это явление скачкообразного изменения давления в жидкости, происходящее вследствие резкого изменения ее скорости движения. Гидравлический удар может происходить при резком открытии или закрытии задвижки в трубопроводе, при остановке насоса или турбины и в других случаях. При быстром закрытии задвижки происходит торможение жидкости у задвижки и резкое увеличение давления. Область повышенного давления распространяется по жидкости в сторону, противоположную начальному направлению ее движения. Скорость движения границы этой обла- сти называется *скоростью распространения волны гидравлического удара с*

и для тонкостенного трубопровода определяется по формуле *Н.Е.Жуковского*:

$$c = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{Kd}{E\delta}}}$$

где К – модуль упругости жидкости; ρ – ее плотность; δ – толщина стенок трубопровода; d – внутренний диаметр; E – модуль упругости материала стенок трубопровода. Если трубопровод недеформируем, то скорость распространения волны гидравлического удара становится равной скорости звука в данной жидкости:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Фазой гидравлического удара Т называется удвоенное время пробега ударной волны от места возникновения гидравлического удара до области потока, в которой давление можно считать постоянным (например, резервуар с жидкостью, из которого начинается трубопровод, воздушный колпак насоса)

T=2·l / c, где l – расстояние от места возникновения гидравлического удара до области, где давление постоянно. *Прямым* называется гидравлический удар, при котором время изменения скорости течения жидкости меньше фазы гидравлического удара. Если время изменения скорости жидкости больше фазы гидравлического удара, то гидравлический удар называется непрямым.

Для прямого гидравлического удара повышение давления определяется по формуле Н.Е. Жуковского $\Delta p = \rho c \Delta \vartheta$,

Пример

П

По трубопроводу длиной $l_{прив} = 20$ м, диаметром d=0,05, толщиной стенок трубопровода δ=3,5 мм, соединенному с баком, под напором Н=2,5 м течет вода (модуль упругости К=2·10 ^{9} Па). В некоторый момент времени происходит мгновенное перекрытие потока в конце трубопровода.

Найти скорость распространения волны гидравлического удара, если труба стальная (Е=2·10^{11} Па). Коэффициент гидравлического сопротивления принять равным 0,03.

Решение. Из уравнения Бернулли определим скорость течения воды в трубе до закрытия задвижки. Считая, что α =1, имеем: $H = \frac{\vartheta^2}{2g} + \lambda \frac{l_{прив}}{d} \frac{\vartheta^2}{2g}$,

откуда $\vartheta = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \lambda \frac{l_{прив}}{d}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}5}{1 + 0{,}03 \frac{20}{0{,}05}}} = 1{,}94$ м/с.

Найдем скорость распространения волны гидравлического удара в стальной трубе c = $\sqrt{\frac{K}{\rho\left(1 + \frac{K}{E}\frac{d}{\delta}\right)}}$ $\sqrt{\frac{2 \cdot 10^{0}}{10^{3}\left(1 + \frac{2 \cdot 10^{9} \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{11} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-3}}\right)}} = 1{,}32 \cdot 10^{3}$ м/с.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. По стальному трубопроводу, наружный диаметр которого 88,9 мм и толщина стенки 6,5 мм, движется нефть. Расход нефти 32 м^3/ч, плотность нефти 875 кг/м^3.

Определить повышение давления в нефтепроводе вследствие прямого гидравлического удара, приняв истинный модуль сжатия нефти равным 13 500 кгс/см^2.

Ответ: 20,4-10^5 Па.

Задача 2. Как изменится величина повышения давления в нефтепроводе (по условию задачи 1), если вместо стальных труб применить чугунные, модуль упругости которых $E = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па?

Ответ: уменьшится на 2,7%.

Задача 3. По условию задачи 1 определить повышение давления при движении по трубопроводу воды.

Ответ: 26,1 -10^5 Па.

Задача 4. Сравнить повышение давления в результате прямого гидравлического удара в трех стальных трубопроводах с толщиной стенок 5,5 мм и внутренними диаметрами 50, 100, 200 мм при движении в этих трубопроводах воды с одинаковыми средними скоростями.

Результаты выразить в процентах, приняв за 100% повышение давления в трубопроводе, диаметр которого равен 50 мм.

Ответ: 100%, 95,5%, 90,2%.

Задача 5. Сравнить повышение давления в результате прямого гидравлического удара в трех стальных трубопроводах внутренним диаметром 100 мм и стенками толщиной 6, 8 и 10 мм при движении в этих трубах воды с одинаковыми средними скоростями.

Результаты выразить в процентах, приняв за 100% повышение давления в трубопроводе с толщиной стенки труб 6 мм.

Ответ: 100%, 101,6 %, 102,5%.

Задача 6. По стальному трубопроводу, наружный диаметр которого равен 101,6 мм и толщина стенки 6,5 мм, перекачивается нефть плотностью 860 кг/м^3.

Определить, может ли возникнуть прямой гидравлический удар, если перекрыть задвижку за 25 сек, находящуюся на расстоянии 56 км от подающего нефть насоса.

Задача 7. Определить давление в нефтепроводе при быстром закрытии крана (за 1,2 сек), установленного на расстоянии 1420 м от начальной точки трубопровода. Давление в нефтепроводе при нормальной его работе равно $4\text{-}10^5$ Па. Трубопровод стальной, наружный диаметр труб 73 мм, толщина стенки 5,5 мм. Плотность нефти 855 кг/м^3, средняя скорость ее движения 1,4 м/сек.

Ответ: $18{,}3\text{-}10^5$ Па.

Задача 8. Определить ударное повышение давления в стальном трубопроводе диаметром d=100 мм и длиной l=4200 м при толщине стенки δ=7 мм. По трубопроводу движется нефть плотностью ρ=856 кг/м^3 со средней скоростью ϑ =1,2 м/сек. Время закрытия задвижки $t_{ЗАК}$=2,1 сек. Истинный модуль сжатия нефти 135 000 Н/см^2.

Ответ: $1{,}47\text{-}10^6$ Па.

Задача 9. Требуется определить напряжение в материале трубы при мгновенной остановке воды, двигавшейся со средней скоростью ϑ =1,2 м/сек. Давление P перед задвижкой до ее закрытия равно $5\text{-}10^5$ Па. Диаметр трубы 205 мм, толщина стенки 10,5 мм. Трубы стальные.

Ответ: $298\text{-}10^5$ Па.

Контрольные вопросы

1. Объяснить явление гидравлического удара в трубах.
2. Ударное повышение давления больше при прямом или непрямом гидравлическом ударе?
3. Что будет происходить с ударным давлением при увеличении упругости стенок трубопровода?
4. Как будет изменяться ударное давление при увеличении диаметра трубы и сохранения толщины ее стенки?
5. С чем связано явление кавитации?

6. Какие нежелательные последствия влечет за собой кавитация?

7. Как предотвратить явление кавитации?

3.5. Истечение жидкости через отверстия и насадки

Цель практического занятия: определить коэффициент расхода жидкости при истечении жидкости; нахождение времени полного опорожнения резервуара.

Основным вопросом, который интересует в данном случае, является определение скорости истечения и расхода жидкости для различных форм отверстийи насадков. В процессе такого истечения запас потенциальной энергии, которым обладает жидкость, находящаяся в резервуаре, превращается в кинетическуюэнергию свободной струи.

Насадками называются короткие патрубки различных форм, через которые происходит истечение жидкости. Обычно длина насадка l=(3….8)d. В некоторых случаях (при малых геометрических размерах отверстий) в качестве насадка может выступать и толстая стенка. Насадки имеют различные характеристики истечения. Коэффициенты истечения для насадок, так же, как и для отверстий, зависят от числа Re. Различают следующие типы насадков: внешний цилиндрический, внутренний цилиндрический, конический сходящийся, конический расходящийся, коноидальный, насадок для забора жидкости из резервуараи др.

Пример

Из отверстия в тонкой стенке диаметром d=0,005 м вытекает вода, имеющая температуру 20ºС. Определить расход воды и сравнить с расходом глицерина, вытекающего в тех же условиях. Высота уровня жидкости над центром отверстия Н=0,05 м.

Решение. Определяем числа Рейнольдса, характеризующие истечения воды и глицерина (при 20ºС $\nu_в=1{,}01\cdot10^{-6}$ м²/с, $\nu_{гл}=1{,}19\cdot10^{-3}$ м²/с):

для воды $\quad \mathrm{Re}_{H_{воды}} = \dfrac{\sqrt{2gH}}{\nu} d = \dfrac{\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 0{,}05}}{1{,}01\cdot 10^{-6}} 5\cdot 10^{-3} = 4900;$

для глицерина $\quad \mathrm{Re}_{H_{глицерина}} = \dfrac{\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 0{,}05}}{1{,}19\cdot 10^{-3}} 5\cdot 10^{-3} = 4{,}16$

Коэффициент расхода при истечении воды (табл. данные) μ=0,66. Тогда расход воды: $\quad Q_{воды} = \mu \dfrac{\pi d^2}{4}\sqrt{2gH} = 0{,}66\dfrac{3{,}14\left(5\cdot 10^{-3}\right)^2}{4}\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 5\cdot 10^{-2}} = 12{,}8\cdot 10^{-6}\, м^3/с$

Коэффициент расхода при истечении глицерина

$$\mu = \sqrt{\frac{\mathrm{Re}_{H_{глицерина}}}{25{,}2 + \mathrm{Re}_{H_{глицерина}}}} = \sqrt{\frac{4{,}16}{25{,}2 + 4{,}16}} = 0{,}376$$

Расход глицерина

$$Q_{глицерина} = 0{,}376\frac{3{,}14\left(5\cdot 10^{-3}\right)^2}{4}\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 5\cdot 10^{-2}} = 7{,}3\cdot 10^{-6}\, м^3/с$$

В сходных условиях расход глицерина вследствие существенно большей его вязкости оказался на 43% меньше расхода воды.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить коэффициенты расхода, скорости, сжатия и сопротивления при истечении воды в атмосферу через отверстие диаметром d=80 мм под напором H=3 м, если расход воды равен Q=23,6 дм^3/сек, а координаты центра одного из сечений струи x = 3,34 м и y = 990 мм.

Ответ: μ = 0,61; φ = 0,97; ε = 0,63; ζ = 0,08.

Задача 2. Требуется определить расход бензина через калиброванное отверстие, *а* некоторого устройства.

Площадь сечения отверстия F= 2 мм^2. Высота обреза отверстия *b* колпака резервуара H=2 см.

Коэффициент расхода принять равным μ = 0,64.

Ответ: 0,8 см^3/сек.

Задача 3. Определить расход жидкости через цилиндрический насадок диаметром d = 100 мм и длиной l=400 мм. Напор жидкости над центром насадка H = 3,4 м.

Ответ: 0,0525 $м^3$/сек ~52,5 $дм^3$/сек.

Задача 4. Из горизонтальной цистерны, диаметр которой 2,21 м, а длина

8,2 м, сливают горячий нефтепродукт. Диаметр сливного отверстия равен 100,3 мм.

Определить время слива нефтепродукта.

Как изменится время слива нефтепродукта, если на его поверхности поддерживать давление на 60 000 Па выше атмосферного. Плотность нефтепродукта 898 кг/$м^3$.

Коэффициент расхода μ принять равным 0,62.

Ответ: $T1$ = 70,33 мин, T_2 = 21,1 мин.

Задача 5. Цилиндрический резервуар диаметром D=4 м и высотой H=6 м имеет у дна отверстие диаметром d=100 мм.

Определить время полного опорожнения резервуара, если коэффициент расхода отверстия μ = 0,62.

Ответ: 47 мин 24 сек.

Задача 6. Определить, какое количество воды вытекло из цилиндрического вертикального бака диаметром D=1,2 м за 1 мин через отверстие в дне диаметром d=100 мм, если уровень воды в баке поддерживался постоянным, равным 1,3 м.

Ответ: 1,48 $м^3$.

Контрольные вопросы

1. Какое отверстие в стенке бака, из которого происходит истечение,

2. Как определяются коэффициенты истечения (сжатия струи, скорости, расхода)?

3. Какое отверстие называют затопленным?

4. Каковы особенности истечения жидкости через отверстие в толстой стенке?

5. Что такое насадок?

6. Почему при истечении жидкости через насадки расходуется больше кинетической энергии, чем при истечении жидкости через отверстие?

7. Какой напор жидкости называют переменным?

3.6. Фильтрация жидкости. Закон Дарси

Цель практического занятия: определение скорости фильтрации жидкости в пласте.

Фильтрацией называется движение жидкости или газа в пористой и трещиноватой средах. Основной задачей при практических расчетах в области фильтрации является определение расхода, т.е. количества фильтрующейся жидкости и *скорости фильтрации* (фиктивная скорость), под которой понимают расход жидкости через единицу площади поперечного сечения всего фильтрующего слоя (включая как сам грунт, так и поры между его частицами). *Пористостью* (или коэффициентом пористости) называют отношение объема пор, т.е. пустот между отдельными частицами грунта, ко всему объему грунта. Н. Дарси были проведены опыты в условиях установившейся фильтрации воды через песчаный грунт. В своих опытах Дарси установил основной закон фильтрации, которому подчиняются различные несжимаемые жидкости (вода, нефть) при своем движении через грунт - *скорость фильтрации жидкости в пористой среде прямо пропорциональна градиенту давления и направлена в сторону падения давления:*

$$Q = kS\frac{\Delta H}{L},$$

где *к* - коэффициент фильтрации, характеризующий водопроницаемость песчаного грунта;

S - площадь сечения трубы (площадь фильтрации);

ΔH- потери напора, определяемая по разности показаний пьезометров;

L - длина песчаного фильтра.

Контрольные вопросы

1. Какой опыт проводил Н.Дарси?
2. Существует ли линейная зависимость между фильтрационным расходом в трубе (с песчаными грунтами) и гидравлическими потерями?
3. Что такое фильтрация жидкости?
4. Основная задача фильтрации.
5. Что представляет собой скорость фильтрации?
6. Что такое пористость?

3.7. Границы применимости закона Дарси

Цель практического занятия: определение числа Рейнольдса в пористых средах.

Закон Дарси часто называют законом ламинарной фильтрации, т.к. согласно этому закону, расход и скорость фильтрации линейно зависят от потерь напора, что является первым признаком ламинарного режима (при движении жидкости в трубопроводах). В большинстве случаев движение жидкости в пористых телах действительно происходит с малыми скоростями. В отдельных случаях, когда движение жидкости в грунте характеризуется значительными скоростями (например, в скальных породах), наблюдается переход к турбулентному режиму. Закон Дарси имеет верхнюю и нижнюю границы применимости. Верхняя граница применимости определяется группой причин, связанных с проявлением инерционных сил при высоких скоростях фильтрации. Ее обычно связывают с некоторыми критическим (предельным) значением числа Re. Для определения числа Re при фильтрации предложен ряд формул, например, Н.Н. Павловского, В.Н. Щелкачева, формула Краснопольского, Смрекера.

Нижняя граница применимости закона Дарси определяется проявлением неньютоновских реологических свойств жидкости, ее взаимодействием с твердым скелетом пористой среды при достаточно малых скоростях фильтрации.

Контрольные вопросы

1. Можно ли назвать закон Дарси законом ламинарной фильтрации и почему?

2. Чем характеризуется движение жидкости?

3. Чем определяется верхняя граница применимости закона Дарси?

4. Чем определяется нижняя граница применимости Закона Дарси?

5. Применима ли формула по определению числа Re в трубопроводах для пористых сред?

3.8. Одномерные течения газа. Скачки уплотнения

Цель практического занятия: нахождение числа Маха в некоторых сечениях изоэнтропического потока воздуха; определение скорости звука в заторможенном газе.

Одномерными называются такие течения, характеристики которых (T, p,υ, ρ) зависят только от одной координаты и времени. Примером одномерного течения является течение газа в трубке тока, если характеристики распределены равномерно по ее сечению.

Скорость звука или скорость распространения *бесконечно малых мущений* в газе определяется по формуле, общей для всего термодинамического процесса: $a = \sqrt{\dfrac{dp}{d\rho}}$. Для изоэнтропического процесса распространения звука в совершенном газе: $a = \sqrt{kRT} = \sqrt{\dfrac{dp}{\rho}}$.

Отношение скорости течения газа υ в данной точке потока к скорости звука *a* в этой же точке называется *числом Маха:* $M = \dfrac{\upsilon}{a}$.

Если υ ▪ *a*, то М ▪ 1 и режим является *дозвуковым*; если υ▪ *a*, то М▪ 1 и режим *сверхзвуковой, если* υ=*a*, то М=1 и режим называется *критическим.*

Если площадь поперечного сечения струйки газа изменяется по длине, то критическое состояние (М=1) может установиться только в самом узком сечении струйки. Это сечение называется *критическим* $s_{кр}$.

Отношение скорости течения газа в данной точке потока к критической скорости $a_{кр}$ называется *коэффициентом скорости (λ):* $\lambda=\upsilon/a_{кр}$.

Зависимости параметров потоков газа (p,T, ρ) от числа Маха (или от коэффициента скорости) и от параметров торможения (p_0,T_0, ρ_0) называются *газодинамическими функциями.*

Для получения сверхзвуковой скорости используют *сопло Лаваля,* которое состоит из суживающейся и расширяющейся частей.

Поверхность, при прохождении через которую давление, плотность, скорость и температура газа изменяются скачком, называется *ударной волной.* Ударная волна может возникнуть только при сверхзвуковой скорости движения газа. Образующиеся в потоке ударные волны в различных случаях могут быть подвижными и неподвижными. Неподвижная волна называется *скачком уплотнения.*

Пример

Воздух при нормальных условиях (h_0=760 мм.рт.ст., t=15^{0}С), имеющий скорость υ_1=136 м/с. Найти температуру, давление и плотность в конце сопла, а также температуру и давление торможения, считая движения изоэнтропическим.

Решение. Определяем число Маха в сечении 1:

$M_1=\frac{\upsilon_1}{a_1}=\upsilon_1\sqrt{\kappa RT_1}=136\sqrt{1{,}4\cdot 287\cdot 288}=0{,}4$, по таблицам газодинамических функций, зная ρ_1 и T_1, $p_1=\rho_p g h_0=1{,}36\cdot10^4\cdot9{,}8\cdot0{,}76=1{,}013\cdot10^5$Па и T_1=288К, находим параметры торможения.

$$p_0=p_1/\pi(M_1)=1{,}013\cdot10^5/0{,}895=1{,}13\cdot10^5\,\text{Па},$$

$$T_0=T_1/\tau(M_1)=288/0{,}969=297K.$$

Из уравнения закона сохранения энергии определяем температуру в сечении 2

$$T_0 = T_0 - v_2^2 / \left(2C_p\right) = 297 - 280^2 / 2000 = 258K;$$

И число Маха

$$M_2 = v_2 \; | a_2 = v_2 \Big/ \sqrt{kRT_2} = 280 \Big/ \sqrt{1{,}4 \cdot 287 \cdot 258} = 280 \; | 322 = 0{,}870$$

По таблицам газодинамических функций находим давление в конце сопла

$$p = \pi\left(M_2\right)p = \pi_2\left(0{,}870\right)\cdot 1{,}13\cdot 10^5 = 0{,}611\cdot 1{,}13\cdot 10^5 = 6{,}90\cdot 10^4 \text{ Па}$$

Из уравнения Клапейрона – Менделеева плотность

$$p_2 = p_2 \; | \left(RT_2\right) = 6{,}90\cdot 10^4 \; | \left(287\cdot 258\right) = 0{,}932 \text{кг/м}^3.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Формулу для определения скорости звука можно записать в виде $a = C\sqrt{T}$, где T – абсолютная температура.

Найти значение константы C для воздуха и метана.

Ответ: $C_{возд} = 20 м / \left(c \cdot градус^{1\,2}\right)$; $C_{метан} = 26 м / \left(c \cdot градус^{1\,2}\right)$.

Задача 2. В камере жидкостного реактивного двигателя газ с молекулярной массой 24,2 кг/моль имеет температуру $T_0 = 2800K$.

Определить скорость звука в заторможенном газе в камере двигателя и критическую скорость звука (κ=1,3).

Ответ: $a_0 = 1{,}12\cdot 10^3 м/с$; $a_{кр} = 1{,}04 \cdot 10^3 м / с$.

Задача 3. Дана температура торможения T_0=357 К и температура T = 250К в некотором сечении изоэнтропического потока воздуха.

Найти скорость звука в заторможенном газе a_0, скорость звука a, коэффициент скорости λ, число Маха M и скорость v в этом сечении.

Ответ: $a_0 = 378$м/с; a = 317м17м λ = 1,34; M = 1,46; v = 463м63

Задача 4. В двух сечениях изоэнтропического потока воздуха коэффициенты скорости λ_1=1,50, λ_2 =2,20. Температура торможения T_0=303К.

Найти числа Маха и скорости в этих сечениях.

Ответ: $M_1 = 1{,}73; M_2 = 4{,}57; v_1 = 478$м/с; $v_2 = 701$м/с.

Вопросы для самоконтроля

1. Физические свойства жидкостей.
2. Гидростатика. Силы, действующие в жидкости.
3. Единицы измерений и размерности давлений. Свойства гидростатического давления.
4. Эпюры гидростатического давления.
5. Дифференциальное уравнение равновесия (покоя) жидкости. Уравнения Эйлера.
6. Закон Паскаля. Основное уравнение гидростатики.
7. Поверхности равного давления. Относительный покой жидкости.
8. Определение гидростатического давления при помощи пьезометров, пьезометрическая высота.
9. Приборы для измерения давления.
10. Силы давления на плоскую стенку.
11. Силы давления жидкости на дно сосуда. Гидростатический парадокс.
12. Силы давления жидкости на цилиндрическую стенку.
13. Сообщающиеся сосуды.
14. Закон Архимеда. Остойчивость, метацентр, центр водоизмещения.
15. Определение толщины стенок труб.
16. Идеальные и аномальные жидкости.
17. Основные понятия кинематики и динамики жидкости. Метод Лагранжа и метод Эйлера.
18. Элементы потока жидкости.

19. Уравнение неразрывности потока (уравнение сохранения массы).
20. Уравнение Бернулли для струйки идеальной и реальной жидкости. Геометрический и физический смысл уравнения.
21. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
22. Пьезометрический и гидравлический уклоны.
23. Графики уравнений Бернулли.
24. Практическое применение уравнения Бернулли.
25. Классификация гидравлических потерь.
26. Режимы течения жидкости.
27. Опыты Рейнольдса. Число Рейнольдса.
28. Общая формула потери напора.
29. Эпюры скоростей при ламинарном и турбулентном режимах.
30. Метод наложения потерь. Коэффициент сопротивления системы.
31. Понятие о кавитации жидкости.
32. Гидравлический удар в трубопроводах.
33. Классификация трубопроводов.
34. Построение гидравлических характеристик трубопровода.
35. Расчет трубопроводов. Вторая водопроводная формула.
36. Расчет коротких и длинных трубопроводов.
37. Основные расчетные задачи.
38. Определение экономически выгодного диаметра трубопровода.
39. Основные характеристики истечения жидкости.
40. Инверсия струи.
41. Фильтрация жидкости. Закон Дарси.
42. Скачки уплотнения.

Библиографический список

1. Астрахан И. М., Иванников В. Г., Кадет В. В. Сборник задач по гидравлике и газодинамике для нефтегазовых вузов. – 2017.
2. Основы гидравлики и теплотехники: учебник для вузов/ Брюханов О.Н., Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И.-Москва. Академия, 2006.-240 с.
3. Дмитриев Н. М., Кадет В. В. Подземная гидромеханика //Пособие для семинарских занятий. М.: РГУ нефти и газа им. ИМ Губкина. – 2008.
4. Басниев К. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д. Нефтегазовая гидромеханика. – 2003. -544 с.
5. Гидравлика: в 2 т. — Т. 1: Основы механики жидкостей и газов : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / [В.И.Иванов, И.И.Сазанов, А.Г.Схиртладзе, Г.О.Трифонова]. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 192 с.
6. Стесин С. П. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы в примерах решения задач //Учебное пособие. – 2013.- 208 стр.
7. Схиртладзе А. Г. и др. Гидравлика в машиностроении //Ч. – 2008. – №. 2. – С. 496.г.- 888 стр.