МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой РЭТЭМ

__________________В.И.Туев

«___»__________________201   г

Гидрогазодинамика

Методические указания по практическим занятиям для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавра 280700.62 «Техносферная безопасность» (10 часов)

Разработчик: **к.т.н. Апкарьян А.С.**

Томск-2014

Содержание

Введение

Изучение гидрогазодинамики студентами технических высших учебных заведений предусматривает проведение определённого количества практических занятий. В основном это решение задач по темам курса.

В данных методических указаниях даются общие разделы теории, ознакомление с которыми необходимо для правильного выбора пути решения задачи.

Методическое указание не ограничивается только лишь решением задачи, но и даёт возможность проведения анализа при изменении отдельных физико-технических параметров. В отдельных работах полученные результаты способствуют проведению аналитического описания процессов гидростатики и гидродинамики.

Указанные в задачах параметры соответствуют реальным характеристикам оборудования или технологического процесса.

Перечень практических занятий

1 Определение абсолютного и избыточного гидростатического давления и вакуума. Учет изменения плотности по высоте. Определение силы давления воды и точки ее приложения на плоские и цилиндрические поверхности. Гидравлический пресс.

2 Примеры использования уравнения Бернулли в гидравлических расчетах. Построение линии энергии и пьезометрической линии для трубопроводных систем.

3 Расчет условий перехода от ламинарного течения в турбулентное. Расчет потерь напора при ламинарном и турбулентном режиме течения в трубах и местных сопротивлениях с использованием теоремы Борда, формулы Дарси и опытных данных Никурадзе.

4 Расчёт основных физико-технических параметров трубопроводов и насосов

Глава 1

Гидростатика

1. Основное уравнение гидростатики

В гидростатике рассматривается жидкость, находящаяся в относительном или абсолютном покое.

Относительным покой - состояние, при котором отдельные частицы жидкости, оставаясь в покое относительно друг друга, перемещаются вместе с сосудом, в котором жидкость заключена.

Абсолютный покой, или просто покой - состояние жидкости, при котором она неподвижна относительно земли и резервуара.

В гидростатике изучают законы равновесия жидкости, находящейся под действием внутренних и внешних сил, а также равновесия тел, погруженных в жидкость.

В любом рассматриваемом объёме, силы, действующие на данный элемент жидкости, подразделяют на массовые и поверхностные.

Массовые (объёмные) силы – это силы, приложенные непосредственно к частицам, заполняющей некоторый объём (силы тяжести).

Поверхностные силы – это силы, действующие лишь на поверхность выделенного объёма жидкости (давление твёрдого тела на обтекающую его жидкость, трение жидкости о поверхность тела и др.).

Для того чтобы определить давление в произвольной точке покоящейся жидкости, достаточно знать величину давления в какой либо другой точке, принадлежащей тому же объёму, а так же глубину погружения одной точки относительно другой.

Пусть в открытом сосуде находится однородная жидкость в состоянии покоя. На её поверхность, а следовательно и на точку 1, действует давление находящегося над жидкостью газа, которое обозначим p_0. Если окружающий газ свободно сообщается с атмосферой, то внешнее давление равно атмосферному: $p_0 = p_{атм.}$

Абсолютное (полное) давление $p_{абс}$, действующее на точку внутри жидкости испытывает давление p_0 находящегося над жидкостью газа и давление оказываемое столбом жидкости, расположенным над ней:

$$p_{абс} = p_0 + \rho g(h_1 - h_2), \qquad (1.1)$$

где ρ- плотность жидкости (кг/м^3),

g – ускорение свободного падения (м/с^2),

h_1 и h_2 – высоты, отсчитанные вверх от одной и той же условной горизонтальной плоскости (м).

В общем случае уравнение (1.1) может быть записано в виде

$$p = p_0 + \rho gh, \qquad (1.2)$$

где h высота столба жидкости над рассматриваемой точкой.

Это равенство называется основным уравнением гидростатики. Из этого уравнения следует, что в одном и том же объёме покоящейся однородной жидкости все частицы, расположенные в одной и той же горизонтальной плоскости, находятся под одним и тем же гидростатическим давлением.

2. Расчёт давления жидкости на стенку

Плоская стенка. При расчёта плотин, водохранилищ и крупных резервуаров необходимо знать суммарное давление жидкости на ограничивающие её поверхности. Зная закон распределения гидростатического давления в жидкости, можно найти суммарное давление на стенки и дно резервуара.

Сила R определяется как равнодействующая системы параллельных сил, направленных в одну сторону. Силы на плоскую стенку, обусловленные гидростатическим давлением, представляют собой систему параллельных сил, равномерно возрастающих с увеличением высоты столба жидкости от нуля до максимального давления $p_{макс}$

$$p_{макс} = p_0 + pgh, \qquad (2.1)$$

где h – высота жидкости в сосуде.

Избыточное давление в центре тяжести площади равно

$$p_{ц.т} = \rho gh_{ц.т}\ , \qquad (2.2)$$

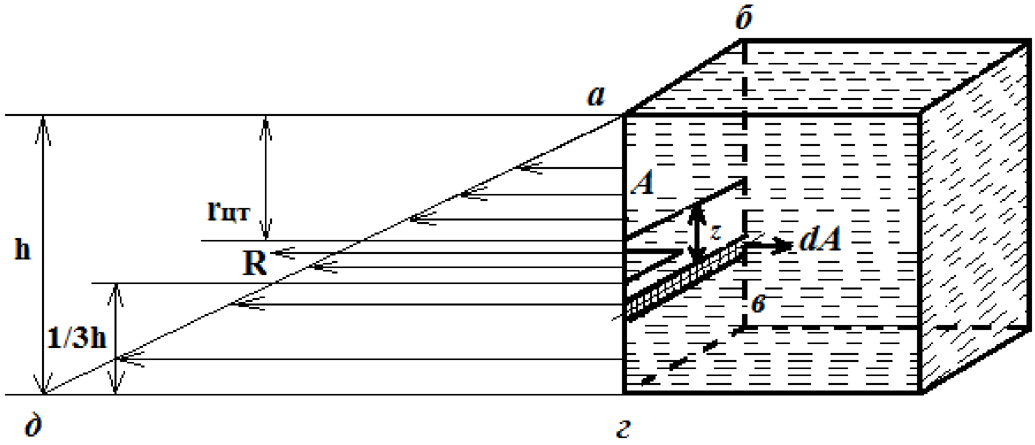

Рисунок 2.1- Давление жидкости на плоскую стенку

Значение полной силы R жидкости на плоскую стенку равно произведению площади смоченной поверхности стенки на гидростатическое давление в её центре тяжести

$$R = p_{ц.т.}A, \text{ или } R = (\rho g h_{ц.т} + p_0)\, A \qquad (2.3.)$$

Формула (2.3.) выведенная для частного случая вертикальной прямоугольной плоской стенки, оказывается справедливой и для более общего случая наклонной плоскости с произвольными очертаниями.

Точку приложения равнодействующей силы называют центром давления. Центр давления лежит обычно ниже центра тяжести площади стенки. При горизонтальной стенке (дно резервуара) они совпадают. Центр давления прямоугольной не горизонтальной стенки находится на расстоянии *h/3* от основания.

Криволинейная стенка. В случае с криволинейной стенкой, силы гидростатического давления, действующие на различные элементы её поверхности, имеют разные направления. Поэтому невозможно заранее указать направление их равнодействующей *R*, обусловленной давлением жидкости на кривую стенку.

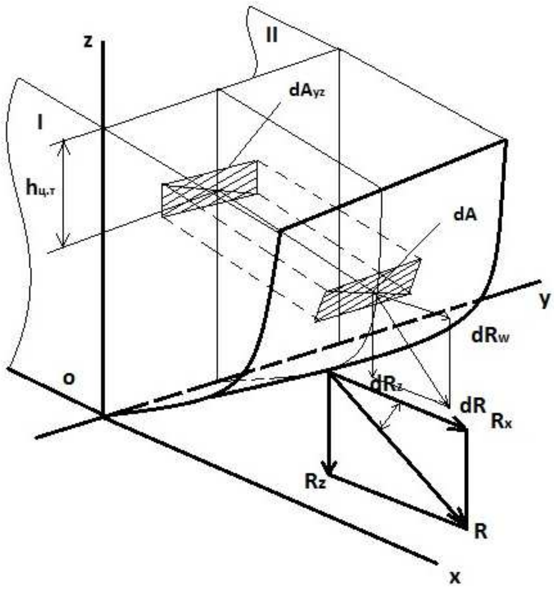

Рисунок 2.2 - Давление жидкости на криволинейную стенку

Выберем систему координат (рис. 2.2.) таким образом, чтобы ось z была направлена вертикально, а ось y – вдоль образующей цилиндрической поверхности стенки.

Так как силы действуют по нормали к стенке, а ось y параллельна стенке, то составляющая R_y равна нулю. Таким образом, для определения полной силы R достаточно определить её проекции R_x и R_z на оси x и z и сложить полученные составляющие по правилу параллелограмма.

Вычислим составляющую R_x силы R. Значение R_x можно получить, суммируя все составляющие dR_x элементарных сил dR, обусловленных давлением, действующих на соответствующие площадки dA. Согласно рис. 2.2, имеем

$$dR_x = \cos\alpha dR, \qquad (2.4.)$$

где α – угол между x и нормалью к площади dA.

Так как $dR = pdA$, то

$$dR_x = cos\alpha\, pdA = p(cos\alpha dA) = pdA_{yz}, \qquad (2.5.)$$

Здесь dA_{yz} - элемент плоской поверхности A_{yz}, перпендикулярной к оси x. Произведение $cos\alpha dA$ равно площади проекции площадки dA на плоскость A_{yz} и, таким образом dA_{yz} представляет собой элемент поверхности A_{yz}.

Суммируя все силы dR_x получим

$$R_x = \int dR_x = \int p dA_{yz}. \qquad (2.6.)$$

При этом в последнем интеграле интегрирование проводится по всей проекции A_{yz}, рассматриваемой криволинейной стенки. Поэтому интеграл $\int p dA_{yz}$ равен суммарной силе, обусловленной давлением жидкости, на плоскую поверхность A_{yz}, которую на неё оказывал бы тот же столб жидкости.

Таким образом, составляющая по оси x этой силы, действующей на криволинейную стенку, равна силе, обусловленной таким же столбом жидкости на проекцию этой стенки на плоскость, нормальную к оси x.

Формула (2.1.) для данного случая имеет вид

$$R_x = \rho g h_{ц.т} A_{yz}, \qquad (2.7.)$$

где $h_{ц.т}$ – расстояние центра тяжести проекции A_{yz} от свободной поверхности жидкости.

Вертикальная составляющая R_z, полной силы R, равна равнодействующей сил тяжести, действующей на все элементы объёма жидкости, находящейся над рассматриваемой криволинейной стенкой. Поэтому R_z равна весу жидкости в объёме V, расположенном над стенкой:

$$R_z = \rho g V. \qquad (2.8.)$$

На рис. 2.2 этот объём V ограничен поверхностью рассматриваемой цилиндрической стенки, свободной поверхностью жидкости, а также вертикальными плоскостями I и II, отсекающими от стенки рассматриваемый участок поверхности.

Таким образом, найдены составляющие R_x и R_z полной силы R, обусловленную давлением жидкости на криволинейную стенку, которую графически можно получить, складывая эти составляющие. Аналитически модуль R можно определить по теореме Пифагора:

$$R_x = \sqrt{R_x^2 + R_z^2} \qquad (2.9.)$$

Направление силы R можно определить задавая угол φ между осью x и силой R.

$$tg\,\varphi = R_z/R_x$$

Следует отметить, что точку приложения равнодействующей R элементарными приёмами можно найти только в некоторых частных случаях.

Стенки цилиндрических сосудов и труб. Тонкостенные цилиндрические сосуды, заполненные жидкостью под давлением, широко распространены в технике. К ним относятся трубы, котлы, корпуса аппаратов и т.п.

На рис 2.3 показана половина цилиндра, внутренний диаметр которого обозначим через D, длину цилиндра через l и толщину стенки через δ.

Выделим на внутренней поверхности цилиндра элементарную площадку *abcd* с площадью *dA*. Нормаль *nn* к этой площадке, проходящая через её середину (через её центр тяжести), составляет угол α с плоскостью *yOz* системы координат *xyz*.

По нормали *nn* на элементарную площадку *dA* действует элементарная сила *dP* давления жидкости, причём $dP_n = pdA$.

Спроектируем силу dP_n на вертикальную плоскость *yOz* и обозначим её проекцию dP_z:

$$dP_z = dP_n cos\alpha = pdAcos\alpha.$$

Определив P_z как сумму проекций ссоответствующих элементарных сил на плоскость *yOz*, пренебрегая неравномерностью распределения давления жидкости по поверхности цилиндра (по высоте *z*):

$$P = \int pcos\alpha dA = p\int cos\alpha dA.$$

Заметим, что $cos\alpha dA$, равная площадке *a'b'c'd'*, есть проекция элементарной площадки *abcd* на горизонтальную плоскость *xOy*. Поэтому $\int cos\alpha dA$ является проекцией всей боковой поверхности полуцилиндра на ту же плоскость *xOy*. Площадь этой проекции равна *Dl* и

$$P_z = pDl$$

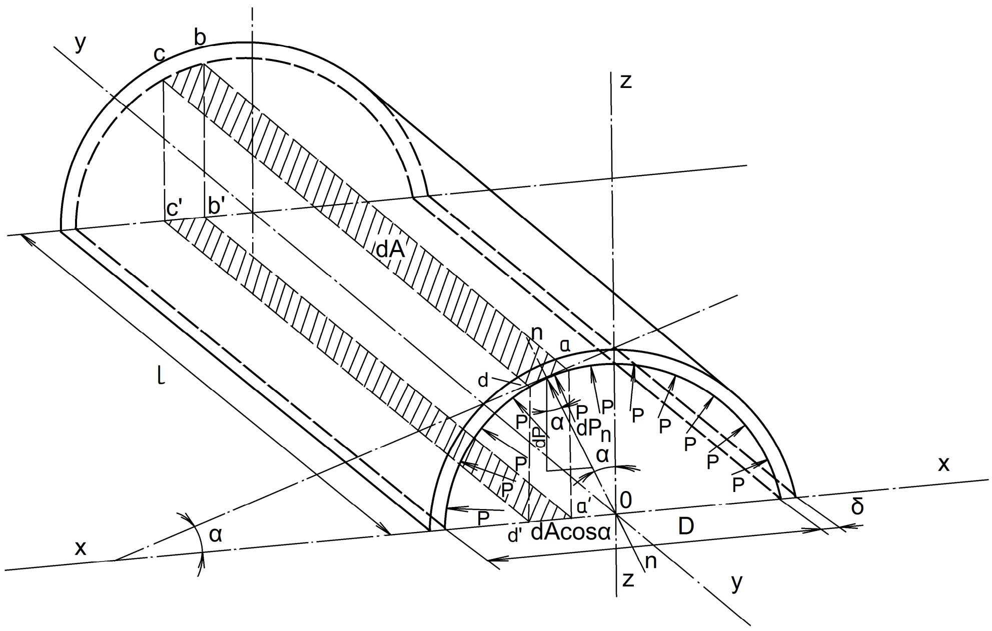

Рисунок 2.3 - Давление жидкости на стенки труб

Отметим, что суммарная сила P_z стремиться разорвать цилиндр по диаметральному сечению, лежащему в плоскости *yOz*, или, что тоже самое, оторвать верхний полуцилиндр от нижнего. Такой разрыв может произойти по двум площадкам диаметрального сечения цилиндра. Площадь каждой из этих площадок равна произведению толщины стенки δ на длину образующей цилиндра *l*.

Напряжения растяжения на этих площадках составят

$$\sigma = P_z/(2/\delta) = pDl/(2/\delta). \qquad (2.10)$$

По условиям прочности напряжения растяжения не должны превышать допускаемых напряжений [σ] или

$$\sigma = pD/(2\delta) \le [\sigma]_p \qquad (2.11)$$

По этой формуле можно определить фактические напряжения растяжения σ в стенке сосуда и, сравнивая их с допускаемыми $[\sigma]_p$, проверять прочность стенок цилиндрических сосудов, труб и пр.

В ряде случаев бывает необходимо определить толщину стенки δ для цилиндрического сосуда или трубы при заданном её диаметре *D*, давлении *p* и допускаемом напряжении $[\sigma]_р$. Для этого формулу (2.11) решают относительно δ и записывают в виде

$$\sigma \geq pD/(2[\sigma]_р) \qquad (2.12)$$

Рассмотрим также напряжения, возникающие в стенках цилиндрического сосуда или трубы под воздействием осевого усилия P_y , направленного вдоль оси y. Осевое усилие P_y в этом случае определится как произведение давления p внутри сосуда на площадь проекции его крышки или днища на плоскость, нормальную оси сосуда,

$$P_y = p(\pi D^2/4)$$

Поперечное сечение стенок цилиндрического сосуда, лежащего в плоскости, нормальной к оси цилиндра, имеет форму кольца, площадь которого A' приближённо составит

$$A' \approx \pi D\delta$$

Под действием осевой силы P_y разрыв цилиндра может произойти по указанному кольцевому поперечному сечению A'. Условия прочности сосуда по кольцевому поперечному сечению запишем в виде условия, что фактические напряжения растяжения в этом сечении также не превышают допускаемого $[\sigma]_р$. Т.е.

$$\sigma' = P_y/A' = \frac{p(\pi D^2/4)}{\pi D\delta} = \pi D/4\delta < [\sigma]_р, \qquad (2.13)$$

Формула (2.11) позволяет определить фактические растягивающие напряжения σ, возникающие в стенке сосуда в сечении, плоскость которого совпадает с образующей цилиндра (т.е. по его диаметральному , продольному сечению). Формула (2.13) позволяет определять фактические растягивающие напряжения σ', возникающие в поперечном т.е нормальном к оси цилиндра, кольцевом сечении.

Сравнение формул (2.11) и (2.13) показывает, что растягивающие напряжения σ в продольном сечении цилиндра в два раза превышают напряжения σ', возникающие в поперечном кольцевом сечении. Таким образом, более опасным является разрыв цилиндрического сосуда по образующей и расчёт прочности по напряжениям растяжения σ, и определение толщины стенки необходимо вести по формулам (2.11) и (1.12).

3. Закон Архимеда

Рассмотрим произвольное тело объёмом V, погружённое в жидкость, и найдём силу, действующую на него со стороны жидкости (рис.3.1). Как уже было сказано, такая сила есть, равнодействующая всех сил, обусловленных давлением, действующих на элементы поверхности тела. Однако теперь сумма горизонтальных составляющих сил, действующих на элементы поверхности тела, равна нулю (иначе покоящееся тело пришло бы в самопроизвольное движение по горизонтали). Поэтому полная сила R, обусловленная давлением жидкости на тело, направлена вертикально, а следовательно, вектор R совпадает со своей вертикальной составляющей.

Чтобы найти проведём касательно к телу цилиндрическую поверхность *ABCDA'B'C'D'* с вертикальной образующей. Другими словами, спроектируем тело на свободную поверхность жидкости (*A'B'C'D'* – проекция тела). Проектирующая цилиндрическая поверхность линией касания *ABCD* разделит поверхность тела на две части.

Определим отдельно силу R_1, направленную вниз и действующую на верхнюю поверхность *AEC* тела, и силу R_2, направленную вверх и действующую на нижнюю поверхность *AFC* тела. По своей сути, R_1 равна равнодействующей сил тяжести, действующих на все элементы объёма жидкости, находящейся непосредственно над верхней поверхностью тела. Поэтому модуль силы R_1 равен весу этой жидкости, т.е. жидкости, заполняющей фигуру *ABCDEA'B'C'D'E'*. Обозначив через V_1 объём этой фигуры, имеем

$$R_1 = \rho g\, V_1 \qquad (3.1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2, ρ – плотность рассматриваемой жидкости, кг/м^3.

Чтобы найти R_2 представим , что вся внутренняя часть рассматриваемого тела удалена и сохранена лишь бесконечно тонкая оболочка – нижняя поверхность *ABCDF* тела. Заполним всю внутреннюю часть тела жидкостью. На оболочку *ABCDF* теперь действует сверху вниз сила R_2', при этом $R_2' = \rho g\ (V + V_1)$, *т.к.* $V + V_1$ – объём жидкости непосредственно над оболочкой (т.е. $V + V_1$ – объём фигуры *ABCDFA'B'C'D'F')*.

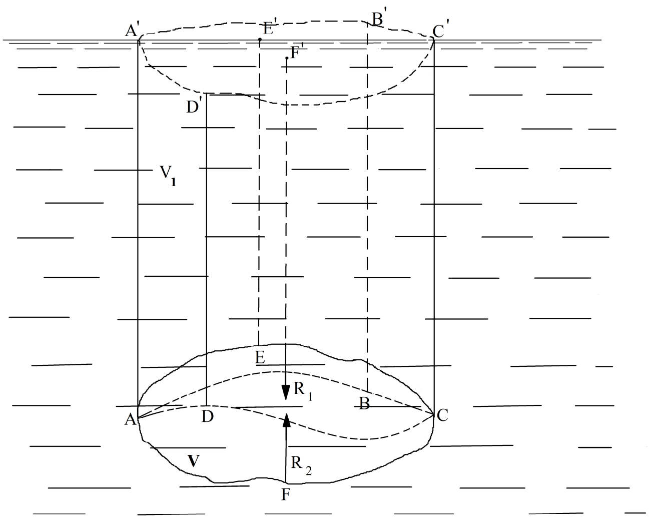

Рисунок 2.11- К рассмотрению закона Архимеда

По основному закону гидростатики давление зависит только от глубины расположения точек поверхности .*ABCDF*. Следовательно, интересующая нас сила R_2, действующая на *ABCDF* снаружи, по модулю равна силе R_2', но направлена в противоположную сторону, т.е. вверх. Итак,

$$R_2 = \rho g\ (V + V_1), \qquad (3.2)$$

Очевидно, что всегда $(V + V_1) > V_1$ и согласно равенствам (3.1) и (3.2) $R_2 > R_1$. Таким образом, полная сила R, обусловленная давлением на поверхность погружённого тела, всегда направлена вверх, и равна её модулю $R = R_2 - R_1$, т.е.

$$R = \rho g V. \qquad (3.3)$$

Произведение $\rho g V$ равно весу жидкости, вытесненной телом. Равенство (3.3) остаётся также справедливым и для тела, лишь частично погружённого в жидкость.

Формула (3.3) выражает закон Архимеда:

На тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила, которая направлена вертикально вверх, и модуль которой равен весу вытесненной телом жидкости.

Выталкивающая сила R является равнодействующей элементарных выталкивающих сил и поэтому приложена в центре тяжести вытесненного объёма жидкости, который называют центром водоизмещения.

Плавучесть тела. Плавучестью называют способность тела плавать в жидкости в погружённом или частично погружённом состоянии.

Закон Архимеда является фундаментом теории плавания. Действительно, плавает тело массой m или тонет зависит от разности действующих на него сил: силы тяжести mg и архимедовой силы R. Так, при $mg > R$ - тело тонет; при $mg < R$ - тело всплывает и находится в частично погружённом состоянии; при $mg = R$ - тело плавает в погруженном состоянии на произвольной глубине (такое состоянии называют взвешенным).

Обозначив плотность тела через ρ_m, можно написать

$$mg = \rho_m V g$$

Используя это равенство и закон Архимеда (3.3), нетрудно показать, что условие плавания $mg < R$ эквивалентно условию

$$\rho_m < \rho\ , \tag{3.4}$$

где ρ – плотность рассматриваемой жидкости.

Таким образом, при выполнении условия (3.4) тело плавает и, наоборот, тело тонет при

$$\rho_m > \rho\ . \tag{3.5}$$

Если полностью погрузить тело, для которого выполнено условие плавания (3.4), то выталкивающая сила R будет больше mg и под действием разности этих сил тело всплывает. По мере всплывания объём вытесненной жидкости уменьшается. При этом уменьшается и архимедова сила. Это будет происходить до тех пор, пока архимедова сила R не станет равной силе тяжести mg. Таким образом, установится определённая глубина погружения, при которой частично погруженное плавающее тело будет находиться в равновесии. При этом соблюдается ранее упомянутое условие

$$mg = R. \qquad (3.5)$$

Как известно из механики, для равновесия тела помимо условия компенсации действующих на тело сил (3.5) нужно, чтобы и моменты этих сил также компенсировались. Для простейшего случая плавания полностью погружённого тела, это второе условие приводит к требованию, чтобы центр водоизмещения и центр тяжести тела лежали на одной вертикали. Равновесие погружённого тела будет устойчивым, если центр тяжести тела лежит ниже центра водоизмещения. Будучи выведенным, из положения равновесия, тело стремится вернуться в исходное положение. В том случае, когда центр тяжести тела лежит выше центра водоизмещения, положение погружённого тела неустойчиво и, будучи выведенным, из такого положения равновесия, оно стремиться перейти к другому (устойчивому) положению. При совпадении центров тяжести и водоизмещения тело находится в состоянии безразличного равновесия.

Глава 2
Гидродинамика
1 Основные понятия

В гидродинамике рассматривают законы движения жидкости в трубах, каналах и пористых телах, а также вопросы обтекания тел жидкостью. Отличительной и самой существенной чертой жидкости является способность перемещения её частиц относительно друг друга.

Движущаяся жидкость, как и покоящаяся, подвержена действию внешних массовых сил. Однако в движущейся жидкости необходимо учитывать ещё и силы трения (вязкость жидкости).

Величинами, характеризующими состояние движущейся жидкости, являются скорость её течения и давление. Основная задача гидродинамики – установить взаимосвязь между ними при заданной системе внешних сил, действующих на движущуюся массу жидкости.

Элементарная струйка. Основным элементом гидравлической модели потока является элементарная струйка. Для её определения введём несколько необходимых понятий.

Если выделенный объём жидкости настолько мал, что можно пренебречь изменением его формы, то его называют жидкой частицей. Кривая, которую описывает жидкая частица при своём движении, называется траекторией жидкой частицы.

Если в каждый момент времени известен вектор скорости жидких частиц в каждой точке движущегося объёма жидкости, то говорят, что задано поле скоростей жидкости. Если знать распределение (т.е.поле) скоростей потока и зависимость этого распределения от времени, то движение жидкости будет полностью определено. Направление скоростей в потоке характеризуется так называемыми линиями тока.

Линией тока называют воображаемую кривую, проведённую в жидкости таким образом, что каждая частица жидкости, находящаяся в ней в данный момент времени, имеет скорость, совпадающую по направлению с касательной к этой кривой.

Такая условно принятая линия тока в отличие от траектории объединяет множество частиц жидкости в данный момент времени.

Если при движении жидкости поле скоростей не изменяется с течением времени, то такое движение называют установившимся, или стационарным.

В установившемся движении каждая частица в какой – либо точке пространства имеет ту же скорость, какую имели в этой точке все предыдущие частицы и будут иметь все последующие.

Если поле скоростей жидкости меняется со временем, то движение называют неустановившимся или нестационарным. Линия тока при этом не совпадают с траекториями жидких частиц. Касательные к линии тока дают направление скорости различных частиц, находящихся в данный момент в различных точках, например в точках *1* и *2* (рисунок 1.1)

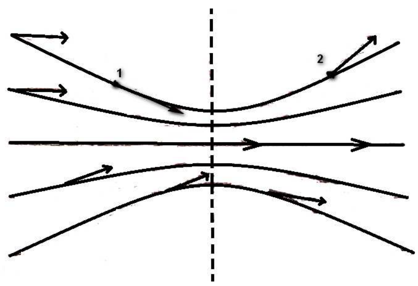

Рисунок 1.1- Линии тока

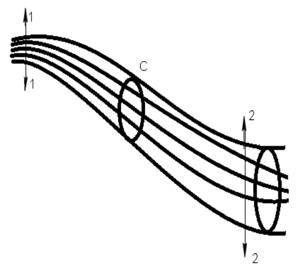

Рисунок 1.2- Трубка тока

Элементарным объёмным (или массовым) расходом называют объём (или массу) жидкости, протекающей через сечение струйки в единицу времени. Единица массового расхода – килограмм в секунду (кг/сек); единица объёмного расхода – кубический метр в секунду ($м^3$/сек).

Если обозначить элементарный объёмный расход через q, а массовый - через m, то зависимость между ними выразится равенством

$$m = q\rho \tag{1.1}$$

где ρ – плотность жидкости в сечении элементарной струйки.

Так как частицы жидкости не покидают струйку и жидкость несжимаема, то элементарные объёмные расходы в любых двух сечениях струйки должны быть равны между собой в каждый момент времени:

$$q_1 = q_2 \qquad (1.2)$$

С другой стороны, элементарный объёмный расход жидкости в сечении площадью A равен (рисунок 1.2)

$$q = Av \qquad (1.3)$$

За 1 сек. частицы жидкости проходят путь, численно равный v, следовательно, Av - объём цилиндра высотой v и основанием A, а именно этот объём проходит за 1сек через сечение струйки. Из формул (1.2) и (1.3) следует равенство

$$A_1v_1=A_2v_2 =Av= \text{const} \qquad (1.4)$$

Уравнения (1.3) и (1.4) называют уравнениями неразрывности струйки.

Поток. Поток можно рассматривать как пучок элементарных струек. Площадь A_n живого сечения потока равна сумме площадей живых сечений составляющих его элементарных струек:

$$A_n = \sum A$$

Расходом потока (объёмным Q или массовым M) называют объём или массу жидкости, протекающей через живое сечение потока в единицу времени. Аналогично формуле (1.1) имеем

$$M = Q\rho \qquad (1.5)$$

Скорость элементарных струек потока, протекающих между стенками и осью, изменяется в пределах от нуля до максимальной осевой скорости.

Для упрощения вводят среднюю скорость потока v, определяемую следующим образом:

$$v = Q/A. \qquad 1.6)$$

Откуда объёмный расход равен

$$Q = vA. \qquad (1.7)$$

В формуле (1.6) v- средняя скорость элементарной струйки.

В формуле (1.7) v- истинная (точная) скорость элементарной струйки.

Так же как и для струйки, для потока несжимаемой жидкости справедливо уравнение неразрывности. При любом течении любые два объёма жидкости, протекающие в один и тот же момент времени через произвольные сечения потока, равны между собой:

$$A_1v_1=A_2v_2=Q \qquad (1.8)$$

Если же течение жидкости стационарно, то для любого момента времени

$$Av = \text{const.} \qquad (1.9)$$

Из равенства (1.8) следует, что скорость обратно пропорционально живому сечению потока

$$v_1/v_2=A_2/A_1 \qquad (1.10)$$

Одной из величин, характеризующих геометрию потока, является так называемый смоченный периметр.

Смоченным периметром π называют длину той части границы живого сечения, по которой поток соприкасается с ограничивающими его стенками. Если геометрический периметр того же сечения обозначить через π', то всегда $\pi \le \pi'$.

Отношение площади A живого сечения к смоченному периметру π называют гидравлическим радиусом сечения.

$$R = A/\pi$$

Геометрический радиус не совпадает с гидравлическим. Геометрический равен $r = d/2$, а гидравлический

$$R = \pi d^2/4\pi d = d4 \neq r.$$

Для канала прямоугольного сечения гидравлический радиус равен

$$R = bh/[2(b+h)] \text{ и } R = bh/(b+2h)$$

2. Два режима течения жидкости.

Осборн Рейнольдс в конце XIX века методом окрашивания струй установил, что существуют два режима течения жидкости: ламинарный и турбулентный.

Движение жидкости с хаотично изменяющимися во времени траекториями частиц, при котором в потоке возникают нерегулярные пульсации скорости, давления и других параметров называют турбулентным движением.

Рейнольдс в своих опытах изменял не только скорость, но и диаметр трубопровода и вязкость жидкостей (путём её охлаждения или подогрева). При этом он установил, что ламинарный режим тем легче осуществить, чем:

1. Меньше скорость движения жидкости v;
2. Меньше диаметр трубы d по которой течёт жидкость;
3. Больше динамическая вязкость жидкости μ;
4. Меньше её плотность ρ.

Турбулентному режиму соответствует:

1. Большие скорости движения жидкости;
2. Большие диаметры труб;
3. Большая плотность;
4. Малая вязкость.

Из перечисленных изменяемых величин Рейнольдс составил безразмерный комплекс

$$Re = vd\ \mu/\rho, \qquad (2.1)$$

который является очень важной динамической характеристикой движения вязкой жидкости. Величину Re называют числом Рейнольдса.

Если ввести кинематическую вязкость $\upsilon = vd/\rho$, то формула (2.1) примет вид

$$Re = vd/\upsilon \qquad (2.2)$$

Выразив диаметр трубы d через гидравлический радиус ($d=4R$) получим

$$Re = 4vR/\upsilon \qquad (2.3)$$

По формуле (2.3) можно вычислить число Рейнольдса для потока любого сечения. Режим течения определяется числом Рейнольдса и не зависит от величин v, d, μ, и ρ в отдельности. Существуют некоторые значение числа Рейнольдса, которое называют критическим $Re_{кр}$. При $Re < Re_{кр}$ течение ламинарное, а при $Re > Re_{кр}$ – турбулентное. Точнее, в каждом конкретном случае существует некоторый узкий диапазон значений чисел Рейнольдса, которые можно рассматривать как критические. При критических значениях числа Рейнольдса и происходит смена режимов движения жидкости (эту смену можно считать скачкообразной, так как диапазон $Re_{кр}$ узок). Опытами установлено, что для напорного движения жидкости в цилиндрических трубах круглого сечения $Re_{кр} \approx 2300$.

Путём тщательного устранения источников возмущения при течении в круглых трубах удавалось значительно повысить $Re_{кр}$. При этом созданное ламинарное течение становится неустойчивым и при незначительных возмущениях переходило в турбулентное. Для условий, которые обычно наблюдаются на практике, поток в трубах турбулентный тогда, когда число Re превышает 2300.

3. Энергия элементарной струйки. Уравнение Бернулли

Рассмотрим участок элементарной струйки несжимаемой идеальной (невязкой жидкости) между плоскими, нормальными к оси струйки сечениями *1 -1* и *2 - 2* (Рисунок 3.1).

Площадь поперечного сечения струйки, скорость и давление обозначим: в сечении 1 -1 через A_1, v_1, p_1, а в сечении 2 – 2 через A_2, v_2, p_2.

Пусть z_1 и z_2 соответствующие высоты, т.е. расстояния от горизонтальной плоскости О – О до центров тяжести объёмов $1 - 1'$ и $2 - 2'$.

Рассмотрим стационарное течение в струйке за некоторый малый промежуток времени Δt, в течение которого объём элементарной струйки переместится из положения 1 – 2 в положение $1' - 2'$. Найдём изменение энергии объёма струйки при его перемещении.

Как известно из курса теоретической механики, приращение полной (потенциальной плюс кинетической) энергии тела равно сумме работ всех действующих на него сил:

$$\Delta E = \Sigma P \Delta s \qquad (3.1)$$

где $P\Delta s$ – работа производимая силой P, действующей на тело на элементарном пути Δs.

Элементарный путь Δs обычно рассматривают как проекцию элементарного перемещения точки приложения силы P на её направление.

В рассматриваемом случае за время Δt жидкость в струйке переместится из положения 1 – 2 в положение $1' - 2'$. При этом сечение 1 -1 переместится на малую длину

$$\Delta s_1 = v_1 \Delta t \qquad (3.2)$$

а сечение 2 – 2 соответственно на

$$\Delta s_2 = v_2 \Delta t \qquad (3.3)$$

При таком перемещении энергия струйки изменится. Однако при стационарном течении энергия той части жидкости, которая заполняет объём между сечениями $1' - 1'$ и 2 – 2, остаётся неизменной.

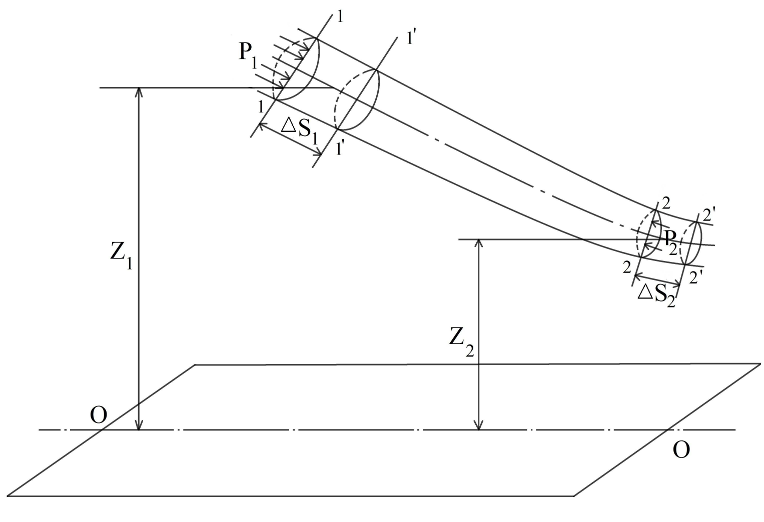

Рисунок 3.1 - Элементарная струйка. К выводу уравнения Бернулли

При этом всё изменение энергии элемента жидкости будет таким же, как если бы левый слой, заключённый между сечениями 1 - 1 и $1'$ - $1'$, занял бы место правого слоя, заключённого между сечениями 2 – 2 и $2'$ - $2'$.

Так как участки Δs_1 и Δs_2 струйки предельно малы, то условно эти участки можно считать цилиндрическими, тогда соответствующие им объёмы Δq_1 и Δq_2 определятся равенствами:

$$\Delta q_1 = A_1 \Delta s_1 = A_1 v_1 \Delta t; \qquad \Delta q_2 = A_2 \Delta s_2 = A_2 v_2 \Delta t.$$

Определим потенциальную E_p и кинетическую $E_к$ энергии относительно плоскости О – О для массы жидкости $\Delta m_1 = \rho \Delta q_1$ и $\Delta m_2 = \rho \Delta q_2$. Потенциальная энергия массы Δm_1 определиться равенством

$$E_{p1} = \Delta m_1 g z_1 = \rho\, A_1 v_1 \Delta t\, g z_1 \qquad (3.4)$$

а кинетическая энергия

$$E_{к1} = \Delta m_1 v_1^2/2 = \rho\, A_1 \Delta t\, v_1^3/2. \qquad (3.5)$$

Потенциальная и кинетическая энергии массы жидкости Δm_2 в объёме Δq_2 определится равенствами:

$$E_{p2} = \rho\, A_2 v_2 \Delta t\, g z_2 \qquad (3.6)$$

$$E_{к1} = \rho\, A_2 \Delta t\, v_2^3/2. \qquad (3.7)$$

Полная энергия произвольного участка струйки объёмом $Av\Delta t$ определиться, как сумма энергии

$$E = E_к + E_p = \Delta t\, Av(\rho\, v^2/2 + \rho g z).$$

Изменение потенциальной и кинетической энергии для всей элементарной струйки можно записать в виде

$$\Delta E = (E_{к2} - E_{к1}) + (E_{p2} - E_{p1}) \qquad (3.8)$$

Подставив в уравнение (3.8) выражение для энергий из равенств (3.4 - 3.7), получим

$$\Delta E = (\rho/2)\,(A_2 v_2^3 - A_1 v_1^3)\,\Delta t + \rho g(A_2 v_2 z_2 - A_1 v_1 z_1)\,\Delta t. \qquad (3.9)$$

При перемещении сечения 1 – 1 в $1'$ – 1' и сечения 2– 2 в $2'$ – 2' работа ΔW сил

$F_1 = p_1 A_1$ и $F_2 = p_2 A_2$, приложенных к струйке

$$\Delta W = p_1 A_1 v_1 \Delta t - p_2 A_2 v_2 \Delta t. \qquad (3.10)$$

Согласно уравнению (3.14) изменение полной энергии элементарной струйки должно быть равно работе сил давления, приложенных к струйке:

$$\Delta E = \Delta W$$

Подставив в полученное равенство значения изменения энергии струйки из равенства (3.9) и значения совершённой работы ΔW из равенства (3.10) получим

$$(\rho/2)\,(A_2 v_2^3 - A_1 v_1^3)\,\Delta t + \rho g(A_2 v_2 z_2 - A_1 v_1 z_1)\,\Delta t = p_1 A_1 v_1 \Delta t - p_2 A_2 v_2 \Delta t \qquad (3.21)$$

Разделив обе части уравнения на Δt, на g и на m = $\rho A v$ и после некоторых преобразований получим

$$v^2/(2g) + z + p/(\rho g) = const \qquad (3.22)$$

Уравнение (3.25) называется уравнением Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Все три члена уравнения имеют линейную размерность. Величина z являясь геометрической высотой измеряется в метрах.

Геометрический смысл уравнения Бернулли заключается в том, что при установившемся движении идеальной жидкости сумма трёх высот: геометрический z, пьезометрический $p/(\rho g)$ и скоростной $v^2/(2g)$ – не меняется вдоль данной элементарной струйки.

Уравнение Бернулли (3.22) выражает закон баланса энергии. Первые его два члена $v^2/(2g)$ и z представляют собой кинетическую и потенциальную энергию потока, отнесённые к единице массы жидкости, а последний член $p/(\rho g)$ – работу внешних сил. Сумму всех трёх слагаемых в левой части формулы (3.22), т.е. трёхчлен

$v^2/(2g) + z + p/(\rho g)$, называют полным напором и обозначают Н

$$H = v^2/(2g) + z + p/(\rho g), \qquad (3.23)$$

где z – геометрический напор; $p/(\rho g)$- пьезометрический напор;

$v^2/(2g)$- скоростной напор.

С учётом этих поправок уравнение Бернулли для потока реальной жидкости принимает вид

$$\alpha_1(v^2_1)/2g + p_1/\rho g + z_1 = \alpha_2(v^2_2)/2g + p_2/\rho g + z_2 + h_n\,, \qquad (3.24)$$

где α – поправочный коэффициент, который определяют опытным путём. Для ламинарного режима течения жидкости в круглой трубе α =2, а для турбулентного режима α = 1,04 - 1,13; $h_п$ – полная потеря напора. Она складывается из линейных потерь $h_{дл}$ и потерь на местные сопротивления $h_м$:

$$h_п = h_{дл} + h_м\,.$$

$$h_{дл} = (64lv)/(2Re\, dg), \qquad (3.25)$$

Уравнение (3.35) может быть использовано при любых режимах течения жидкости и называют её формулой Дарси – Вейсбаха:

$$h_{дл} = (f\, l/v^2)/(d2g),$$

где f - коэффициент трения - функция числа Рейнольдса.

При стабилизированном ламинарном течении в круглой трубе значении f определяется формулой Пуазейля.

$$f = 64/Re$$

Трубопроводы и насосы. Насосы

1. Трубопроводы

В зависимости от гидравлической схемы работы трубопроводы подразделяют на простые и сложные. В простых трубопроводах нет точек ответвления на всём промежутке от точки забора до точки потребления. Сложные трубопроводы состоят из основной магистральной трубы и ряда отходящих от неё ответвлений. Трубопроводы бывают с транзитным расходом, когда по всей их длине (от исходной точки до конечной) расход остаётся постоянным, и трубопроводы с путевым расходом, когда расход переменный, т.е. происходит раздача транспортируемой жидкости по пути её следования.

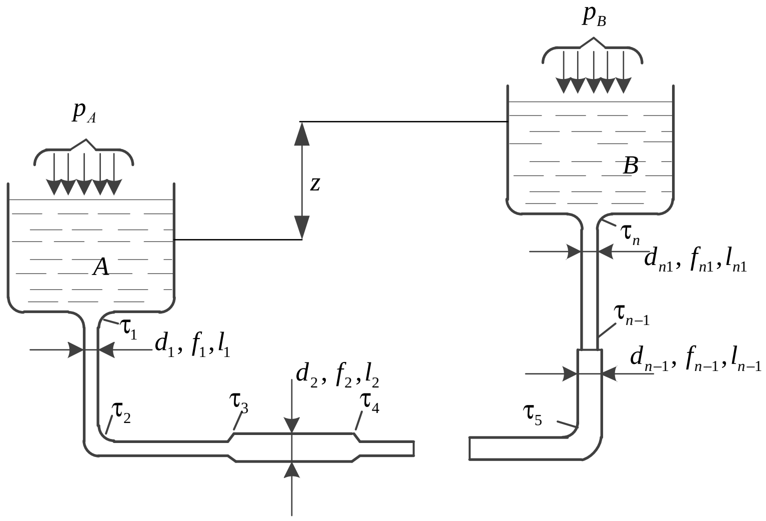

Рисунок 5.1 - Схема простого трубопровода

Рассмотрим трубопровод из *n* участков труб с коэффициентами трения f_1, $f_2, \ldots f_n$ и диаметрами d_1, $d_2, \ldots d_n$, длинами l_1, $l_2, \ldots l_n$. В трубопроводе имеется *n* местных сопротивлений с коэффициентами ζ_1, $\zeta_2, .. \zeta_n$.

Если по рассматриваемому трубопроводу поднимают воду на высоту *z*, то при стационарном течении полная потеря напора в соответствии с уравнением Бернулли

$$\Delta H = \frac{p_A - p_в}{\rho g} = z + \sum_{i=1}^{n} f_I \frac{l_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum_{k=1}^{m} \zeta_k \frac{v_k^2}{2g}. \qquad (5.1)$$

Формула (5.1) справедлива при условии, что резервуары достаточно большие (по сравнению с трубами) и поэтому можно считать жидкость в них покоящейся и пренебречь начальным и конечным динамическими напорами. Если в формуле (5.1) $z < 0$, то это означает, что точка потребления находится ниже точки забора.

Выразив с помощью уравнения неразрывности $v_1A_1 = v_2A_2 = \ldots = v_nA_n$ все скорости v_i

через одну, например v_1, получим

$$\Delta H = \frac{p_A - p_в}{\rho g} = z + \frac{v_1^2}{2g}\left[\sum_{i=1}^{n} \frac{f_i l_i}{d} \left(\frac{A_1}{A_i}\right)^2 + \sum_{k=1}^{m} \zeta_k \left(\frac{A_1}{A_k}\right)^2\right]. \qquad (5.2)$$

Если выражение в квадратных скобках обозначит через $\zeta_{сист.}$, то

$$\Delta H = (p_A - p_в)/(\rho g) = z + \zeta_{сист}\, v_1^2/(2g). \qquad (5.3)$$

Так как $Q = v_1 A_1$, то формулу (3.41) можно записать в виде

$$\Delta H = (p_A - p_в)/(\rho g) = z + \zeta_{сист} Q^2/(2g\, A_1^2). \qquad (5.4)$$

Решив уравнение (3.42) относительно Q определим

$$Q = (A_1 \sqrt{\zeta_{сист}})\sqrt{2g(\Delta H - z)} \qquad (5.5)$$

Подачу заданного объёма жидкости можно осуществить через трубопроводы различных диаметров. Чем меньше диаметр трубопровода, тем меньше потребуется металла на изготовление трубопровода и соответственно снизится его стоимость. Однако при заданном расходе жидкости с уменьшением диаметра трубопровода увеличивается и скорость течения, а следовательно, увеличиваются и потери напора, так как потери напора пропорциональны квадрату скорости течения жидкости.

Из сказанного следует, что для прокачивания жидкости по трубопроводу малого диаметра потребуются более дорогие насосы, развивающие более высокое давление и потребляющие больше энергии. Экономия стоимости трубопровода одновременно приводит к удорожанию стоимости насосной установки и повышению эксплуатационных расходов. Поэтому задачу по выбору диаметра трубопровода необходимо решать не только техническими, но и экономическими расчётами.

Используя формулу

$$Q = vA = v\pi d^2/4,$$

откуда

$$d = \sqrt{4Q/(v\pi)} \qquad (5.6)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода, м;

Q – расход жидкости м^3/с;

v - скорость жидкости, м/с.

2 Насосы

Работа насоса характеризуется его подачей Q, напором H, высотой всасывания $h_{вс}$, мощностью двигателя N и коэффициентом полезного действия η.

Подачей (расходом) насоса называют величину, равную отношению массы (или объёма) жидкости, подаваемой насосом, ко времени, за которое была подана жидкость.

Напором насоса называют приращение удельных энергий потока жидкости при входе и выходе из насоса, выраженной в метрах столба перекачиваемой жидкости.

Манометрический напор, т.е. напор действующего насоса, определяют по показаниям манометра M и вакуумметра B насосной установки по формуле

$$H = h_{ман} + h_{вак} + z_0 + (\mathrm{v}^2_{наг} - \mathrm{v}^2_{вс})/(2g), \qquad (5.7)$$

где $h_{ман}$ и $h_{вак}$ - показания соответственно манометра и вакуумметра, м;

z_0 – расстояние между точками присоединения манометра и вакуумметра, м;

$(\mathrm{v}^2_{наг} - \mathrm{v}^2_{вс})/(2g)$ – разность скоростных напоров во всасывающем и нагнетательном трубопроводах, м.

Разностью скоростных напоров ввиду её малости пренебрегают. Тогда формула (4.1) принимает вид

$$H = h_{ман} + h_{вак} + z_0 \qquad (5.8)$$

Из формулы (5.8) видно, что манометрический напор насоса равен сумме показаний манометра и вакуумметра в метрах водяного столба плюс вертикальное расстояние между точками присоединения манометра и вакуумметра. При подборе насоса его напор определяют по следующей формуле:

$$H = (p_1 - p_0)/(\rho g) + z_{вс} + z_{наг} + z_0 + h_{сопр}, \qquad (5.9)$$

где $z_{вс}$ – высота всасывания, м;

$z_{наг}$ – высота нагнетания, м;

$h_{сопр} = h_{вс} + h_{наг}$ – общая потеря напора на преодоление гидравлического сопротивления во всасывающем и нагнетающем трубопроводах, м;

p_0 и p_1 – давление соответственно на входе в насос и на выходе из него, м;

ρ – плотность прокачиваемой жидкости, кг/м^3;

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

Так как $z_{вс} + z_{наг} + z_0 = z$,:

$$H = (p_1 - p_0)/(\rho g) + z + h_{сопр} \tag{5.10}$$

Высота всасывания. На свободную поверхность жидкости (см рис.4.1) в нижнем резервуаре действует атмосферное давление p_0. Для того чтобы жидкость из приёмного резервуара поднялась по всасывающей трубе на высоту $z_{вс}$ и заполнила рабочую камеру насоса, необходимо создать в ней разряжение. При этом в рабочей камере действует остаточное абсолютное давление $p_{вс} < p_0$.

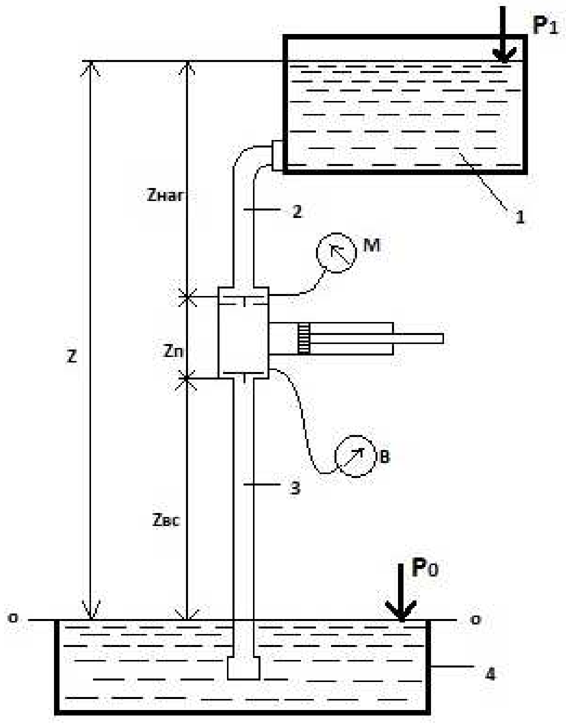

Рис. 5.2. Поршневой насос

Вследствие образовавшейся разности давлений $p_0 - p_{вс}$ создаётся напор $(p_0 - p_{вс})/(\rho g)$, выраженный в метрах столба данной жидкости. Часть этого напора затрачивается на подъём жидкости во всасывающем тракте на высоту $z_{вс}$. Остальная же часть напора расходуется на преодоление всех сопротивлений, встречающихся на пути всасываемой жидкости.

Напишем уравнение Бернулли для процесса всасывания и рассмотрим неизбежные потери напора при всасывании:

$$(p_0 - p_{вс})/(\rho g) = z_{вс} + v^2/(2g) + h_{сопр} + h_{кл} + h_{ин} \qquad (5.11)$$

где - $v^2/(2g)$ – напор, расходуемый на сообщение жидкости, движущейся за поршнем, скорости v, равной скорости движения поршня;

$h_{сопр}$ – напор, теряемый на преодоление всех сопротивлений во всасывающем трубопроводе (в сумму сопротивлений входят отдельные местные сопротивления и сопротивления трению);

$h_{кл}$ – напор, расходуемый на преодоление сопротивления открыванию всасывающего клапана;

$h_{ин}$ – напор, расходуемый на преодоление инерции движущегося столба жидкости.

Мощность и КПД насоса. При подаче объёма V жидкости на высоту H насос совершает полезную работу, измеряемую в джоулях:

$$W = V\rho gH \qquad (5.12)$$

Полезная мощность (в ваттах) определяется по формуле:

$$N = QH\rho g\ , \qquad (513)$$

где Q – объёмный расход жидкости, м^3/сек.

Однако полезная работа насоса сопровождается дополнительными потерями энергии, затрачиваемой:

1. на преодоление гидравлического сопротивления в самом насосе, что учитывается гидравлическим КПД η_t;
2. на утечку части жидкости из рабочей камеры, которая учитывается объёмным КПД $\eta_{об}$;
3. На преодоление трения в механизмах насоса, что учитывается механическим КПД $\eta_{мех.}$

Обычно полный КПД насоса η = 0,6 – 0,85. Меньшие значения η относятся к насосам малой мощности (примерно до 5 кВт), а большие к насосам больших мощностей.

Мощность, потребляемая насосом, измеряется в ваттах и равна:

$$N_{нас} = N_{пол}/\eta = Q\rho gH/\eta \qquad (5.14)$$

Задачи по гидростатике

Задача 1

В открытый сосуд налиты две жидкости, которые не смешиваются. Плотность и глубина нижней жидкости $\rho_н$ и $h_н$; удельный вес и глубина верхней $\gamma_в$, $h_в$. Определить манометрическое давление на дно и выразить его в Па, атм, м. вод.ст, мм. рт.ст., если:

1. $\rho_н$ = 1000 кг/м^3; $h_н$ = 1м; $\gamma_в$ = 8358 Н/м^3; $h_в$ = 0,5 м.
1. $\rho_н$ = 13600 кг/м^3; $h_н$ = 10 см; $\gamma_в$ = 9810 Н/м^3; $h_в$ = 0,6 м.
1. $\rho_н$ = 13600 кг/м^3; $h_н$ = 20 см; $\gamma_в$ = 7848 Н/м^3; $h_в$ = 0,8 м.

Задача 2

В резервуар, содержащий 125 м^3 нефти плотностью 760 кг/м^3, закачано 224 м^3 нефти плотностью 848 кг/м^3. Определить плотность смеси.

Задача 3

После сжатия воды в цилиндре под поршнем давление в ней увеличилось на 3 кПа. Необходимо определить конечный объем воды в цилиндре, если ее первоначальный объем составлял V_1 = 2,55 л, коэффициент объемного сжатия воды $\beta_w = 4{,}75 \times 10^{-10}$ 1/Па.

Задача 4

Определить объем воды, который необходимо дополнительно подать в водовод диаметром d = 500 мм и длиной l = 1 км для повышения давления до $\Delta p = 5 \times 10^6$ Па. Водовод подготовлен к гидравлическим испытаниям и заполнен водой при атмосферном давлении. Деформацией трубопровода можно пренебречь.

Задача 5

Вычислить массу нефти в цистерне, если к $V_1 = 7$ м^3 нефти с плотностью $\rho_1 = 820$ кг/м^3 добавлено $V_2 = 2{,}6$ м^3 нефти с плотностью $\rho_2 = 795$ кг/м^3. Определить, как и на сколько изменится плотность и объем нефти после повышения ее температуры с $t_н = 15$°С до $t_к = 35$°С (коэффициент температурного расширения нефти принять равным $\beta_t = 0{,}00072$ 1/К).

Задача 6

Резервуар *A* частично заполнен водой (рисунок к задаче 1.6). Манометрическое давление воздуха над водой $P_A = 25$ кПа. Определить давление в резервуаре *B* при $\Delta h_1 = 210$ мм; $\Delta h_2 = 256$ мм. который содержит только воздух, если $\Delta h = 0.5$ м.

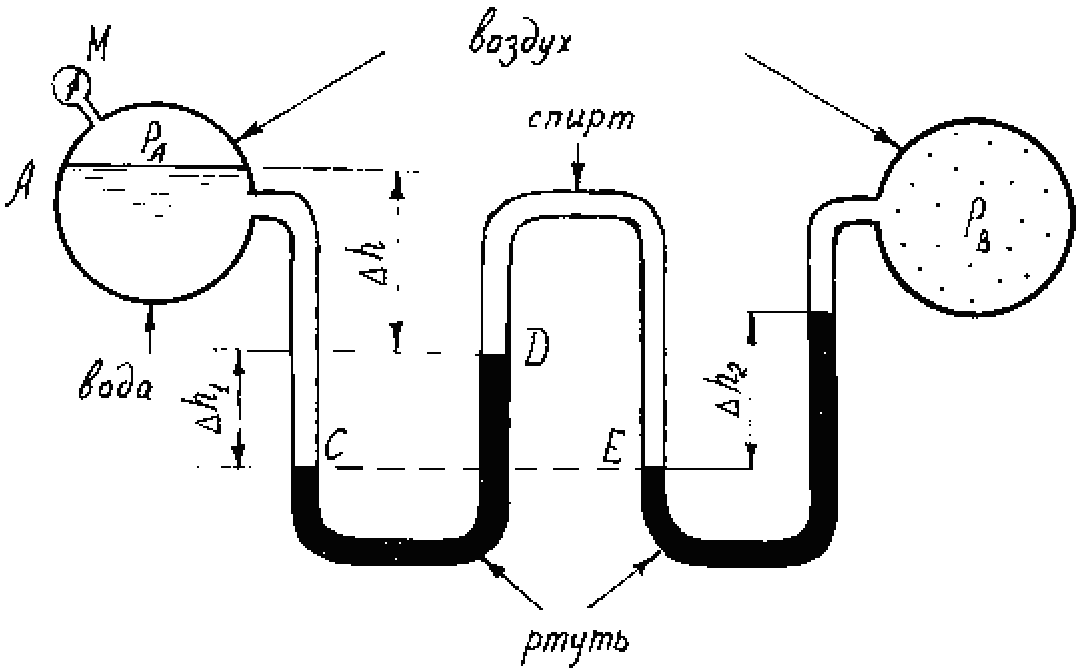

Рисунок к задаче 1.6

Задача 7

Пружинный манометр подключен к сосуду с водой на высоте h_1 от дна. Центр манометра находится выше точки его подключения к сосуду на $h_2 = l$ *м* (рисунок к задаче 1.7)

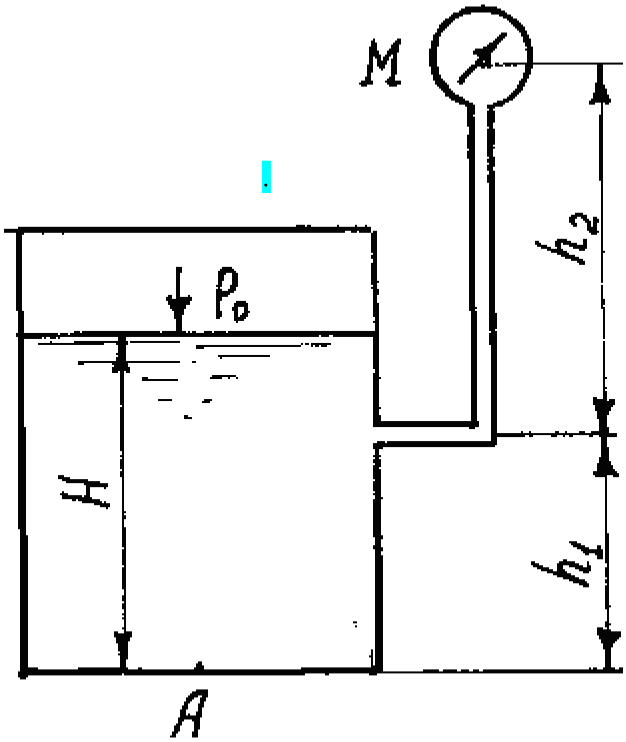

Рисунок к задаче 1.7

Определить:

а) избыточное и абсолютное давление на дно, если показания манометра $p_м$ = 150 кПа, h_1 = 1 м;

б) показания манометра $p_м$ если на поверхности воды абсолютное давление p_o = 160 кПа, h_1 = 1м, глубина воды в сосуде H = 1,5 м;

в) высоту подключения h_1, если p_o = 120 кПа, $P_м$ = 140 кПа, H = 1,7 м.

Задача 8

Закрытый сосуд содержит нижний слой воды глубиной $h_в$ и верхний слой масла $h_м$ (рисунок к задаче 1.8). Уровень воды в открытом пьезометре, который подсоединен к сосуду в пределах слоя воды, выше свободной поверхности на Δh. Абсолютное давление газа в сосуде p_o.

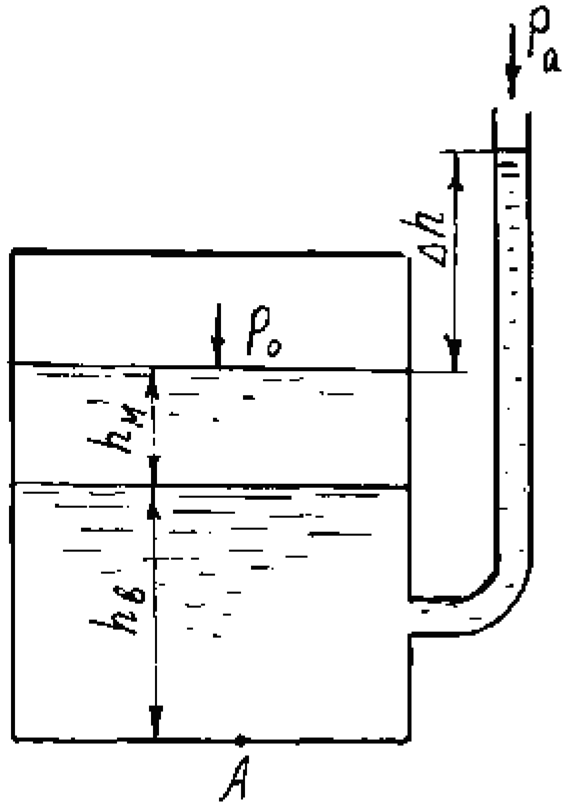

Рисунок к задаче 1.8

Определить:

а) давление p_o, если Δh =1 м, $h_м$ = 0,5 м;

б) разницу уровней Δh, если p_o = 110кПа, $h_м$ = 0.6 м;

в) высоту $h_м$, если p_o,= 105 кПа, Δh = 50 см.

Задача 9

На поршень одного из сообщающихся сосудов (сосуд А), наполненных водой, действует сила F_1 (рисунок к задаче 1.9).

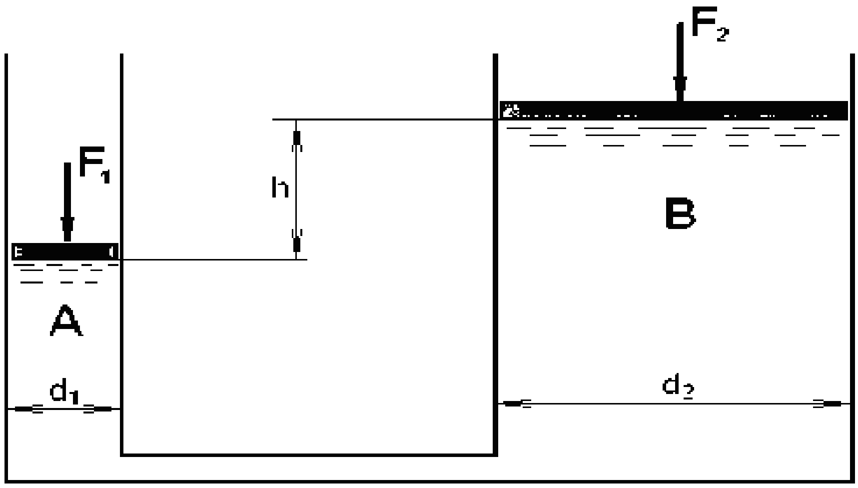

Рисунок к задаче 1.9

Какую силу F_2 следует приложить ко второму поршню, чтобы уровень воды h под ним был выше уровня воды под первым поршнем, если диаметры первого поршня d_1, а второго d_2 при следующих значениях параметров:

а) F_1 = 1,6 кН, h = 40 см; d_1 = 20 см; d_2 = 25 см;

б) F_1 = 1,4 кН, h = 60 см; d_1 = 18 см; d_2 = 23 см;

в) F_1 = 1,2 кН, h = 80 см; d_1 = 15 см; d_2 = 20 см;

г) F_1 = 1,9 кН, h = 50 см; d_1 = 25 см; d_2 = 28 см;

б) F_1 = 1,6 кН, h = 70 см; d_1 = 30 см; d_2 = 35 см

Задача 10

Прямоугольный щит длинной l = 5*м* и шириной b = 5*м*, закреплен с помощью шарнира в точке *O* (рисунок к задаче 1.10). Глубина воды слева от щита H_1 = 4 *м*, справа H_2 = 2 *м*.

Определить:

а) усилие *T*, которое необходимо для поднятия щита;

б) реакции опор *A* , *O*.

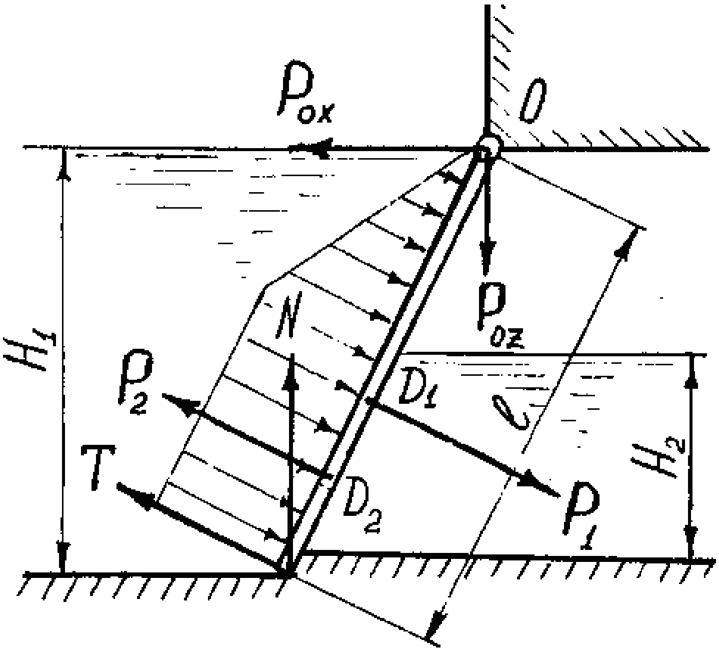

Рисунок к задаче 1.10

Задача 11

Плотина системы Шаунана представляет собой наклонный щит, который может поворачиваться вокруг шарнирной оси О (рисунок к задаче 1.11). Найти положение шарнира x_0, при котором подъём верхнего уровня воды выше H = 2 м. вызвал бы автоматическое опрокидывание щита. Уровень воды по правую сторону от щита h = 0,4 м, а угол α = 60 град.С

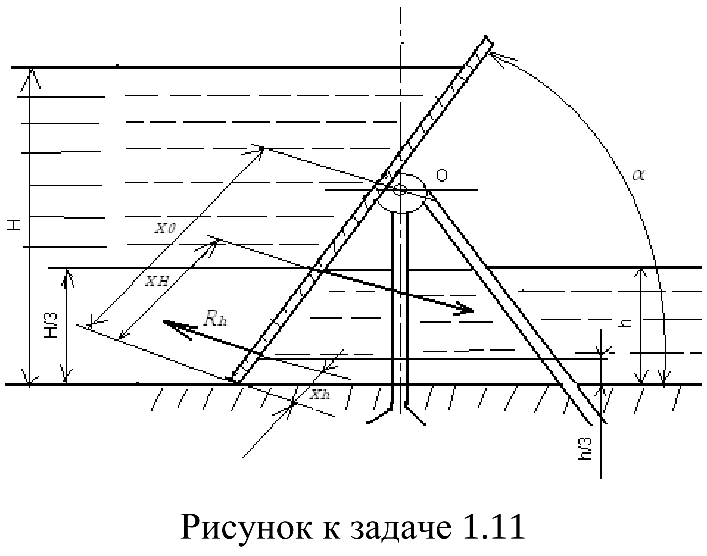

Рисунок к задаче 1.11

Задача 12

Прямоугольный понтон массой m = 800 кг имеет длину l = 4 м, и высоту H= 0,7 м. Определить :

1 осадку h_1, без нагрузки ;

2 максимальную грузоподъёмность понтона при высоте бортов над ватерлинией 0,2 м.

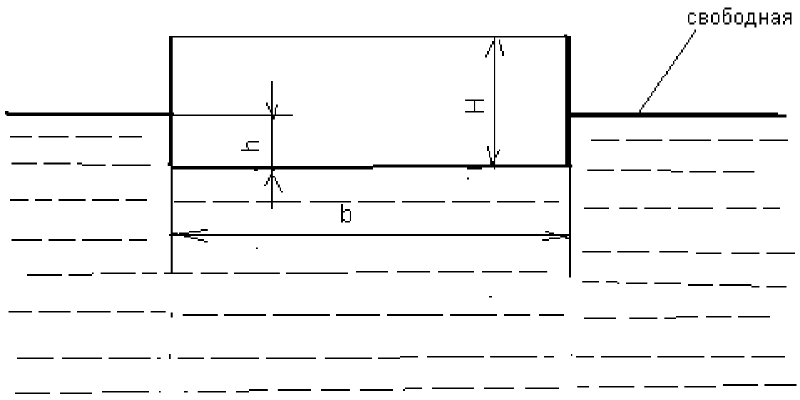

Рисунок к задаче 1.12.

Задача 13

В сосуд налиты две несмешивающиеся между собой жидкости с плотностями $\rho_2 > \rho_1$.. Определить плотность ρ шара, плавающего в сосуде при полном погружении, причём его центр лежит в плоскости раздела жидкостей.

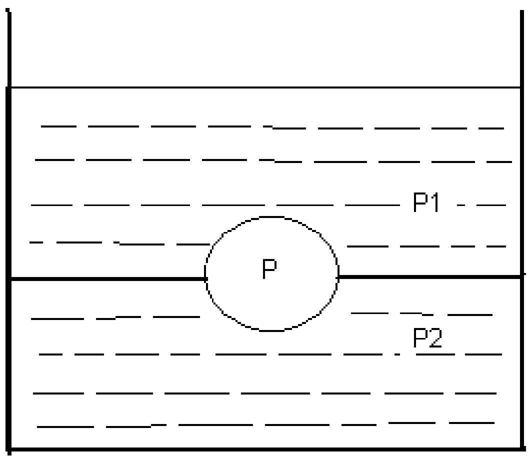

Рисунок к задаче 1.13

Задача 14

Определить разность h уровней жидкости в вертикальных трубках A и B (рисунок к задаче 1.14), если усилие обоих поршней направлены навстречу друг другу и равны между собой, т. е. $P_1 = P_2$. Дано, что D/d = 3,а высота уровня в трубке B равна H

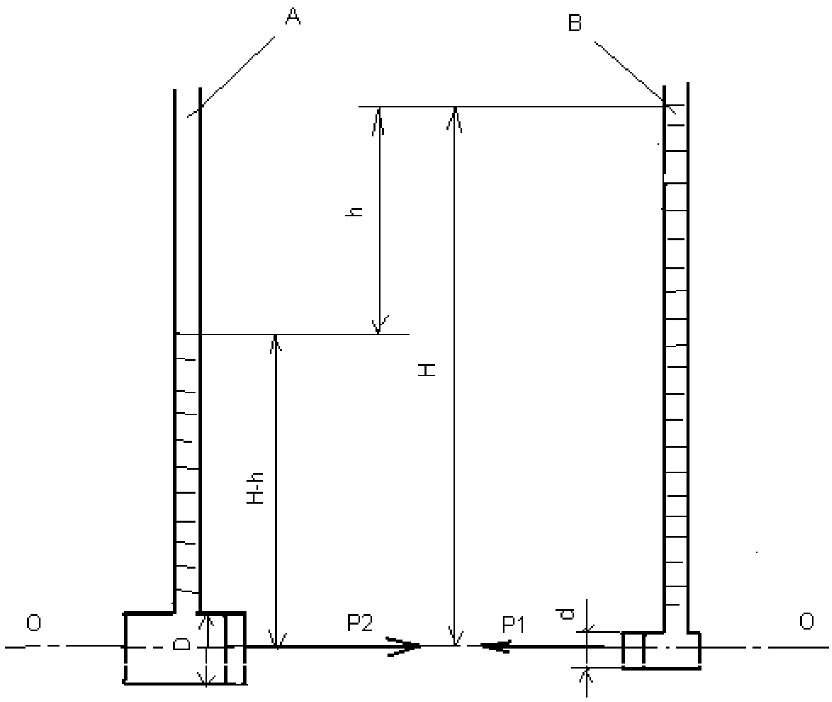

Рисунок к задаче 1.14

Задача 15

Вода вытекает из крана в бак в количестве $Q_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ м^3/сек. В дне бака имеется круглое отверстие с острой кромкой диаметром

d = 0,01 м. Какой стационарный уровень h установится в баке.

Задача 16

Определить силу R, необходимую для подъёма клапана, изготовленного из стали в виде конуса высотой h = 0,1 м. и диаметром основания $D = 2h$. Конус закрывает отверстие диаметром $d = h$ в дне бака, заполненного водой. Уровень воды в баке $H = 5h$ (рисунок к задаче 1,16). Плотность стали $\rho = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3

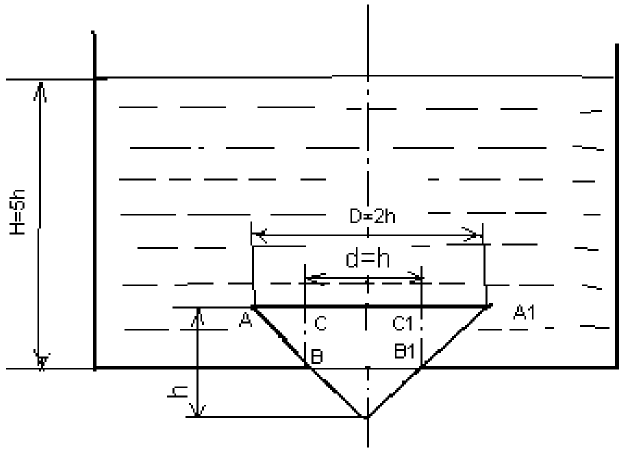

Рисунок к задаче 1.16

Задача 17

Цилиндр радиусом R = 0.5 м и длиной l = 2 м, перекрывает прямоугольное отверстие в дне закрытого резервуара со сторонами a = 60 см, l = 2 м (Рисунок к задаче 1.17). Абсолютное давление на поверхности p_0. Определить:

а) силу давления на цилиндр, если H = 4м;

б) давление p_0, при котором цилиндр всплывет, если его вес G = 500 H, H = 3 м.

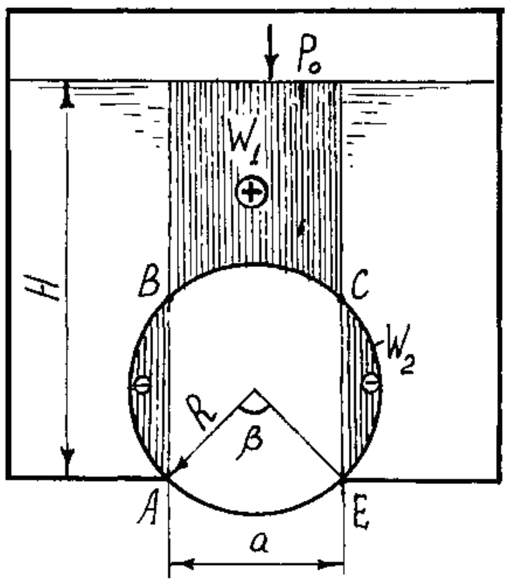

Рисунок к задаче 1.17

Задачи по гидродинамике

Задача 1

В цилиндре A (рисунок к задаче 2.1) поршень двигается вверх со скоростью v_n. При этом он поднимает воду из закрытого резервуара B, в котором манометрическое давление p_0. Разница уровней под поршнем и в резервуаре B равно H.

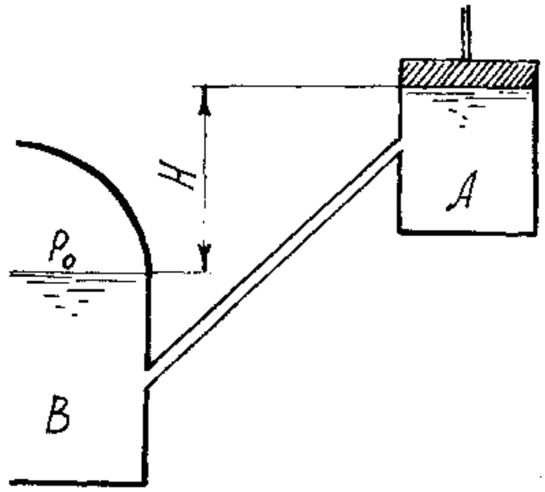

Рисунок к задаче 2.1

Пренебрегая сопротивлениями в соединительной трубке, определить:

а) абсолютное давление под поршнем, если $H = 3$ *м*, $v_n = 1{,}2$ м/с $p_0 = 20$ кПа;

б) скорость v_n, если $H = 2$ м, $p_0 = 15$ кПа, $p_n = 90$ кПа;

в) разницу уровней H, если $v_n = 1.5$ м/с, $p_0 = 10$ кПа, $p_n = 85$ кПа.

Задача 2

По трубопроводам A, B диаметрами $D = 400$ мм, d подается вода под давлением (рисунок к задаче 2.2). К трубопроводам присоединен ртутный пьезометр для измерения разницы давлений в них. Полный напор в трубопроводе B превышает аналогичный напор в трубопроводе A на $\Delta h = 10$ см.

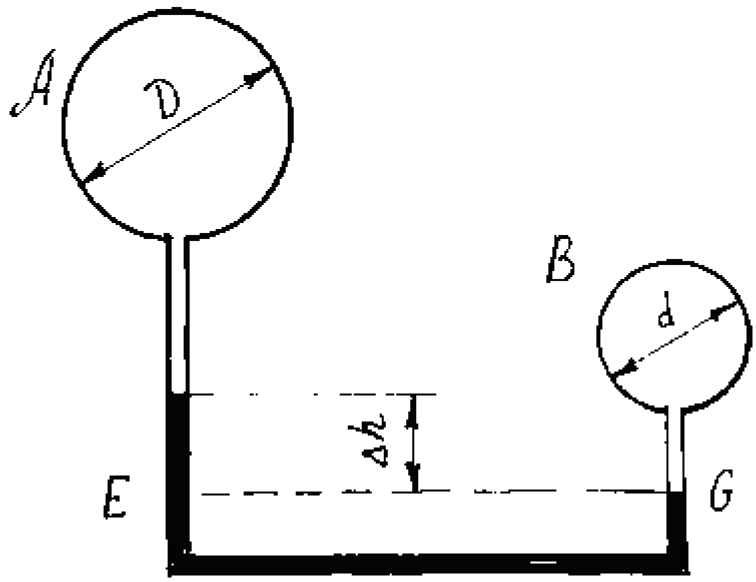

Рисунок к задаче 2.2

Определить:

а) расход воды в трубопроводе A Q_A, если показание пьезометра

Δh = 10мм, средняя скорость в трубопроводе B v_B = 1.5 м/с;

б) показание Δh, если Q_A = 250 л/с, v_B = 1.2 м/с;

в) диаметр d, если Q_A = 300 л/с, Q_B = 150 л/с, Δh = 15мм.

Задача 3

Насос производительностью Q забирает воду из колодца (Рисунок к задаче 2.1) по трубе диаметром D длиной l и находится выше поверхности воды на h.

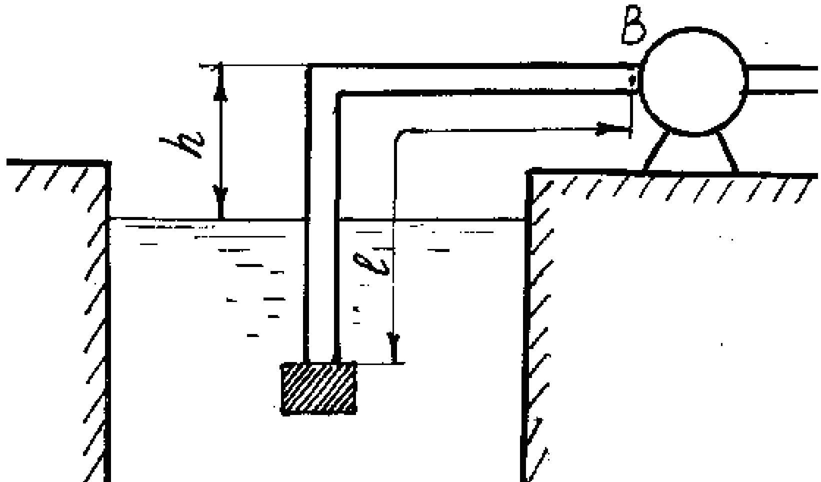

Рисунок к задаче 2.3

Определить:

а) наибольший вакуум в трубе $p_{еак}$, если h = 4 м, Q = 6 *л/с*,

D = 100мм;

б) высоту h, если $p_{вак}$ = 60 кПа, Q = 8 л/с,, D = 50 мм;

в) производительность Q, если $p_{вак}$ = 70 кПа, h = 5 м, D = 75мм.

Задача 4

По трубопроводу диаметром D=100 мм движется нефть с кинематическим коэффициентом вязкости γ= 0,3 см²/с.

Определить:

а) режим движения нефти при скорости v = 0,5 м/с;

б) скорость, при которой произойдет смена турбулентного режима движения нефти на ламинарный.

Задача 5

Вода движется в прямоугольном лотке шириной b = 25 см при температуре t = 10°С.

Определить:

а) при каком максимальном значении расхода сохраниться ламинарный режим, если глубина потока h = 9 см.

б) при каком значении глубины потока произойдет смена режимов движения, если расход Q = 0,5 л/с

Задача 6

Нефть с кинематическим коэффициентом вязкости γ = 0,3 см^2/с движется по трубопроводу.

Найти:

а) минимальный диаметр D трубопровода, при котором нефть будет двигаться при ламинарном режиме с расходом Q = 8,14 л/с;

б) с каким расходом Q нефть будет двигаться по трубопроводу диаметром D = 150 мм при числе Рейнольдса Re = 5000.

Задача 7

Один конец трубопровода длиной l = 2 км присоединён к большому резервуару, а на другом конце имеется задвижка, которая резко закрывается. Оценить величину Δp и продолжительность t возникающего импульса давления, если расход воды Q перед закрытием задвижки был 1л/с, а внутренний диаметр трубы $d = 2{,}54 \cdot 10^{-2}$ м.

Задача 8

Определить манометрический напор H водяного насоса, если манометр на нагнетательном патрубке присоединён ниже вакуумметра на z_0 = 0,7 м и показывает давление $p_{ман} = 1{,}2 \cdot 10^6$ Па. Вакуумметр на всасывающем патрубке показывает давление $p_{вак} = 0{,}4 \cdot 10^5$ Па. Патрубки напорного и всасывающего трубопроводов имеют одинаковые диаметры.

Задача 9

В лаборатории проведено испытание модели центробежного насоса, у которого рабочее колесо имеет радиус R_1 = 0,1 м. При испытании модель развивала напор H_1 = 0,68 м при подаче Q_1 = 8,9 л/с и частоте вращения колеса n_1 = 590 мин$^{-1}$. Определить частоту вращения n_2 и радиус R_2 колеса натурного насоса, геометрически подобного*модели, который при подрбном режиме** должен развивть напор H_2 = 25,9 м при подаче Q_2 = 1372 л/с.

*Два насоса называются подобными, если они геометрически подобны, т. е. все размеры элементов одного насоса находятся в одном и том же отношении к размерам соответствующих элементов другого насоса.

* Режимы насосов называют подобными, если отношение скоростей жидкости в сравниваемых насосах равно отношению линейных скоростей колёс этихнасосов.

Задача 10

На поршень одного из сообщающихся сосудов (сосуд А), наполненного водой, действует сила F_1 (рисунок 11). Какую силу F_2 следует приложить ко второму поршню, чтобы уровень воды h под ним был выше уровня воды под первым поршнем, если диаметр первого поршня d_1, а второго d_2 при следующих значениях параметров:

1. F_1 = 1,6 *кН*, h =40 *см*; d_1 = 20 *см*; d_2 = 25 *см*
2. F_1 = 1,4 *кН*, h =60 *см*; d_1 = 18 *см*; d_2 = 23 *см*
3. F_1 = 1,2 *кН*, h =80 *см*; d_1 = 15 *см*; d_2 = 20 *см*
4. F_1 = 1,9 *кН*, h =50 *см*; d_1 = 25 *см*; d_2 = 28 *см*
5. F_1 = 1,6 *кН*, h =70 *см*; d_1 = 30 *см*; d_2 = 35 *см*

Контрольные вопросы

1. Физические свойства жидкости.
2. Идеальная и реальная жидкость.
3. Гидростатическое давление.
4. Единицы измерения давления.
5. Основное уравнение гидростатики.
6. Закон Паскаля.
7. Схема работы гидравлического пресса.
8. Давление жидкости на плоскую стенку.
9. Давление жидкости на криволинейную стенку. Фактические растягивающие напряжения возникающие на стенке сосуда. Условие прочности сосуда по кольцевому поперечному сечению
10. Закон Архимеда.
11. Величины, характеризующие состояние движущейся жидкости. Элементарная струйка. Виды движения жидкости. Линия тока. Трубка тока.
12. Уравнение неразрывности струйки. Поток. Расход потока. Смоченный периметр. Гидравлический радиус.
13. Режимы течения жидкости. Опыт О. Рейнольдса. Условия для создания режима течения жидкости.
14. Энергия элементарной струйки. Уравнение Бернулли.
15. Принцип действия трубки Пито. Измерение скорости движения жидкости.
16. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
17. Местные потери напора.
18. Трубопроводы и их виды
19. Гидравлический удар.
20. Истечение жидкости через отверстия и насадки. Определение напора. Уравнение Торичелли.
21. Основные понятия о насосах. Подача (расход) насоса.
22. Напор насоса. Манометрический напор.
23. Высота всасывания.
24. Мощность и коэффициент полезного действия насоса.
25. Классификация насосов. Лопастные насосы.
26. Кавитация
27. Осевые насосы.
28. Регулирование подачи и напора лопастных насосов.
29. Объёмные насосы.
30. Регулирование подачи объёмных насосов.
31. Крыльчатые насосы.
32. Струйные насосы.
33. Основные понятия о вентиляторах. Типы вентиляторов. Напор вентилятора. Подача вентилятора. Потребляемая мощность вентилятора.

Литература

1. **Основная литера**тура

1.1 Козырев А. В. Механика: Курс лекций по общей физике : Учебное пособие для вузов / Андрей Владимирович Козырев ; Министерство образования Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2003. - 130[2] с. (Экз. 50).

2 Дополнительная литература

2.1. Прикладная механика. Курс лекций по гидромеханике : Учебное пособие / А. С. Ткаченко ; Министерство образования Российской Федерации, Томский государственный педагогический университет. - Томск : Томский государственный педагогический университет, 2002. - 69[1] с. : ил. - Библиогр.: с. 67. (Экз 1).

2.2. Савельев И. В.Курс общей физики : учебное пособие для втузов: В 3 т. / И. В. Савельев. - 7-е изд., стереотип. - СПб. : Лань, 2007. **Т. 1** : Механика. Молекулярная физика. - СПб. : Лань, 2007. - 432 с. (Экз. 155).

2 Перечень методических указаний

3.1 Апкарьян А.С. Гидрогазодинамика. Методические указания по лабораторным занятиям, 2011. - 31с. Электронный ресурс: http://edu.tusur.ru/training/publications/1938.

3.2 Апкарьян А.С. Гидрогазодинамика. Курсовая расчетно-графическая работа по гидрогазодинамике. Методические указания по занятиям, 2013.- 17с. Электронный ресурс: http://edu.tusur.ru/training/publications/3412