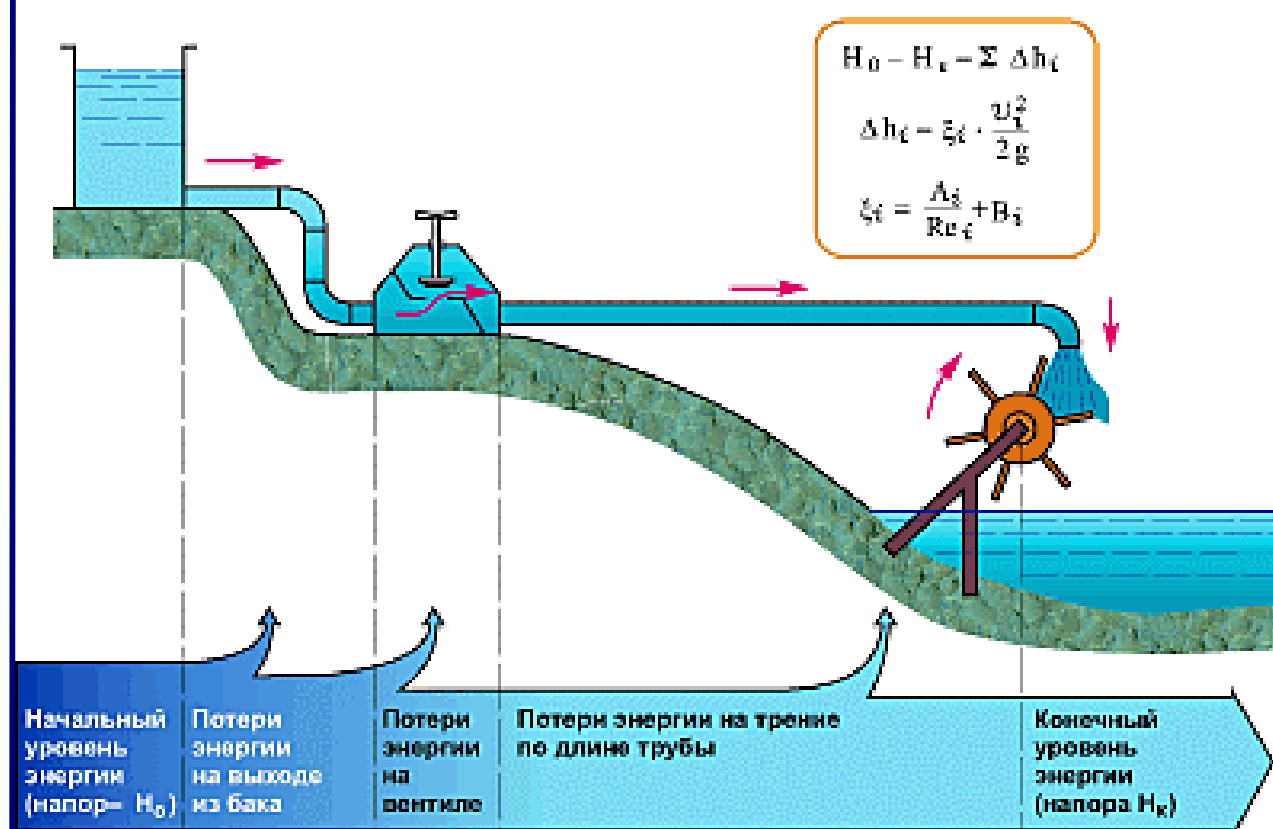


В.С. Парфенов
А.В. Яшин
С.И. Щербаков
В.Н. Стригин

ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ



Пенза 2012

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА»

В.С. Парфенов, А.В. Яшин, С.И. Щербаков, В.Н. Стригин

ПРАКТИКУМ ПО ГИДРАВЛИКЕ

Учебное пособие

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по агроинженерному образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Агроинженерия»

Пенза 2012

УДК 532 (075)
ББК 30.123 (я7)
П 69

Рецензенты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и энергетика» ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА» *В.И. Курдюмов*;
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» ФГБОУ ВПО «Пензенский ГУАС» *И.А. Каледа*

Парфенов, Виктор Степанович

П 69 Практикум по гидравлике: учебное пособие / В.С. Парфенов, А.В. Яшин, С.И. Щербаков, В.Н. Стригин. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – 223 с.

Учебное пособие охватывает все основные разделы курса «Гидравлика» и содержит теоретические сведения, примеры решения задач, набор задач, методические рекомендации по их решению.

В приложениях обобщен справочный материал, необходимый для выполнения расчетной части задач.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 110800 – Агроинженерия, и может быть полезно инженерно-техническим работникам, сталкивающимся в своей практической деятельности с гидравлическими расчетами.

© ФГБОУ ВПО
«Пензенская ГСХА», 2012
© В.С. Парфенов,
А.В. Яшин,
С.И. Щербаков,
В.Н. Стригин, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум предназначен для изучения дисциплины «Гидравлика», входящей в базовую часть профессионального цикла основной образовательной программы высшего профессионального образования по направлению подготовки 110800 – Агроинженерия, а его материал изложен с учетом Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования, а также примерной общеобразовательной программы по направлению подготовки 110800 – Агроинженерия.

Основное назначение практикума – помочь изучающим гидравлику стать компетентными в применении теоретических знаний при решении прикладных задач гидромеханизации сельскохозяйственных процессов.

Практикум содержит задачи по всем основным разделам (дидактическим единицам) курса «Гидравлика»: основы гидравлики, основы сельскохозяйственного водоснабжения и гидромелиорации, гидравлические машины, гидропередачи и гидропневмоприводы сельскохозяйственной техники, а также гидропневмотранспорт.

Каждый пункт практикума начинается с теоретических сведений, в которых приведены основные определения, формулы и некоторые справочные сведения по данной теме, примеры решения типовых задач с подробными пояснениями и методические рекомендации по решению некоторых задач.

Для удобства в приложениях практикума имеются справочные материалы, необходимые для выполнения расчетной части задач.

Все это позволяет надеяться, что обширный и разнообразный по сложности разбираемых вопросов материал практикума окажется интересным и полезным как студентам высших учебных заведений, обучающимся по направлению 110800 – Агроинженерия, так и инженерно-техническим работникам, сталкивающимся в своей практической деятельности с гидравлическими расчетами.

ВВЕДЕНИЕ

В механизации всех производств агропромышленного комплекса значительное место занимают гидравлические процессы, особенностью работы различных технических средств которых является использование жидкостей и газов в качестве рабочих сред, что требует обладания соответствующими компетенциями в области гидравлики и ее применения в технике. Гидравлическая и пневматическая техника обладает высокими производительными показателями, отличается достаточно сложным устройством и основана на законах равновесия и движения жидкости.

Гидравлика (греч. *hýdōr* – вода и *aulós* – трубка) – это наука, изучающая законы равновесия и движения жидкости, а также методы применения этих законов к решению различных технических задач.

Использование закономерностей гидравлики необходимо при решении многих практических задач, связанных с разработкой новых, совершенствованием известных технологических процессов и соответствующих им технических средств.

Гидравлика зародилась, по крайней мере, за 3 тыс. лет до н. э. из практики строительства водопроводов, каналов, плотин и др. При этом широко использовалась народами древнего Рима, Греции, Египта, Китая и др. Все это способствовало накоплению практических представлений о равновесии и движении жидкости.

Одним из первых известных трудов (около 287-212 лет до н. э.), относящихся к гидравлике, является трактат древнегреческого ученого Архимеда «О плавающих телах». Им были установлены основные принципы гидростатики, в том числе – закон Архимеда.

Последующие работы по гидравлике появились лишь в эпоху Возрождения в XVII-XVIII веках.

Наибольший вклад в развитие гидравлики внесли: Архимед, Леонардо да Винчи, С. Стевин, Г. Галилей, Э. Торричелли, Б. Паскаль, И. Ньютон, М.В. Ломоносов, Д. Бернулли, Л. Эйлер, А. Шези, Д.Б. Вентури, О. Рейнольдс, Д.И. Менделеев, Н.Е. Жуковский, Л. Прандтль, Л.Г. Лойцянский, И.И. Куколевский и многие другие.

Ранее считали, что гидравлика занимается изучением движения или покоя только воды. Однако в настоящее время термин «Гидравлика» понимается в более широком смысле, так как за объект изучения в гидравлике принимается любая жидкость, а не только вода.

1 ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

1.1 Общие сведения

В гидропневмоприводах передача движения осуществляется посредством жидкости и газа (наиболее часто воздуха под давлением). Эти два вида физических тел в общем понимании называются *рабочими средами*.

Жидкости, применяемые в системах гидропривода, называют *рабочей жидкостью*, а воздух (так как другие виды газов в приводах сельскохозяйственных машин не применяются) в пневмоприводах – *рабочей газообразной средой*.

Жидкостью называется физическое тело, обладающее большой подвижностью молекул и легко изменяющее свою форму под действием внешних сил, а также оказывающее сильное сопротивление изменению своего объема (в противоположность газам) и слабое сопротивление изменению своей формы (в противоположность твердым телам).

Как уже было отмечено ранее, рабочие среды (жидкости) разделяются на *сжимаемые* (газообразные) и *несжимаемые* или весьма мало-сжимаемые (капельные). Несмотря на это, различные законы движения капельных жидкостей и газов при некоторых условиях (например, при скорости течения газа значительно меньшей скорости звука, сжимаемостью газа можно пренебречь) можно считать одинаковыми.

Для облегчения изучения законов движения жидкости целесообразно ввести понятие *идеальные* и *реальные* жидкости.

Идеальные – это невязкие жидкости, обладающие абсолютной подвижностью, то есть отсутствием сил трения и касательных напряжений, а также абсолютной неизменностью в объеме под воздействием внешних сил.

Реальные – это вязкие жидкости, обладающие сжимаемостью, сопротивлением, растягивающим и сдвигающим усилиями, то есть наличием сил трения и касательных напряжений, а также достаточной подвижностью.

Реальные жидкости могут быть *ньютоновские* и *неньютоновские* (бингемовские). Название соответствует фамилии ученого, установившего данную закономерность.

Ньютоновские – это жидкости, в которых при движении одного слоя жидкости относительно другого величина касательных напряжений (внутреннего трения) пропорциональна скорости сдвига (при относительном покое эти напряжения равны нулю). К ним относятся: вода, масло, бензин, керосин, молоко и др.

Неньютоновские – это жидкости, которые не обладают большой подвижностью и отличаются от ньютоновских жидкостей наличием касательных напряжений (внутреннего трения) в состоянии покоя, причем их величина зависит от вида жидкости. К ним относятся: битум, гидросмеси, глинистый раствор, коллоиды, нефтепродукты при температуре близкой к температуре застывания и др.

К основным физическим свойствам жидкостей и газов относятся: плотность, удельный вес, коэффициент объемного сжатия, модуль упругости, коэффициент температурного расширения, кинематическая и динамическая вязкость. В настоящее время в справочной литературе, каталогах, технических характеристиках, а также в приборах для измерения различных физических величин применяются единицы измерения как в системе СИ (Международная система единиц), так и в МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) (приложение 1). Значения величин основных физических свойств некоторых жидкостей и газов представлены в приложении 2.

Основной характеристикой любой жидкости является ее плотность.

Плотность ρ для однородной среды представляет собой массу m , заключенную в единице объема V :

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

где m – масса однородной среды, кг;

V – объем однородной среды, м³.

С увеличением температуры плотность жидкости уменьшается. Некоторым исключением является вода в диапазоне температур от 0 °С до 4 °С. Именно поэтому лед плавает на поверхности воды, а не тонет. Такое свойство воды объясняется особенностями ее молекулярного строения.

Применяют еще *относительную плотность жидкости*, равную отношению плотности жидкости к плотности воды при температуре $t = 4$ °С:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_B}, \quad (2)$$

где ρ_B – плотность воды при температуре $t = 4$ °С, кг/м³.

На жидкость и любые другие тела, обладающие массой, действует сила тяжести G . Параметром, характеризующим распределение силы тяжести по объему, является *удельный вес* γ или *объемный вес* (удельная сила тяжести):

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad \text{Н/м}^3, \quad (3)$$

где G – вес (сила тяжести) среды, Н .

Связь между удельным весом и плотностью выражается зависимостью, вытекающей из второго закона И. Ньютона:

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad \text{Н/м}^3, \quad (4)$$

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

Свойство жидкости изменять свой объем под действием всестороннего давления называется *сжимаемостью*.

Сжимаемость жидкости характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* β_p , который представляет собой относительное уменьшение объема, приходящееся на единицу изменения давления p :

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp}, \quad \text{Па}^{-1}, \quad (5)$$

где V – первоначальный объем жидкости, м^3 ;

dV – изменение объема жидкости, м^3 ;

dp – изменение давления, Па .

Знак « $-$ » в выражении (5) указывает, что положительное приращение давления соответствует отрицательному приращению (уменьшению) объема жидкости.

Свойство жидкости восстанавливать свой объем после прекращения действия внешних сил называется *упругостью*.

Упругость жидкости характеризуется *модулем упругости* E , который представляет собой величину, обратную коэффициенту объемного сжатия:

$$E = \frac{1}{\beta_p}, \quad \text{Па}. \quad (6)$$

Сжимаемость и упругость жидкости обусловлены взаимодействием между атомами и молекулами, а также их тепловым движением.

Для встречающихся на практике изменений давления в большинстве инженерных расчетов можно принимать плотность капельных жидкостей постоянной, то есть считать их несжимаемыми. В некоторых случаях при изучении упругих колебаний, гидравлического удара,

где сжимаемость и упругость является предопределяющими, пренебрегать этими свойствами нельзя.

Коэффициент объемного сжатия газов значительно выше, чем у капельных жидкостей и определяется выражением (5), и уравнением состояния для заданного процесса сжатия.

Для идеальных газов, к которым можно отнести и воздух, уравнение состояния выражается зависимостью Клайперона-Менделеева:

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T, \quad \frac{Дж}{кг}, \quad (7)$$

где R – газовая постоянная, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$;

$T = 273 + t$ – абсолютная температура, K ;

t – температура, $^{\circ}C$.

Из выражений (5) и (7) для изотермического процесса при $T = const$, коэффициент объемного сжатия

$$\beta_p = \frac{1}{p}, \quad Па^{-1}. \quad (8)$$

Следовательно, газы подвержены высокой сжимаемости.

Объем жидкости меняется в зависимости и от температуры, как правило, увеличиваясь с ее повышением. Расширение жидкости при изменении температуры характеризуется *коэффициентом температурного расширения* β_t , который представляет собой относительное увеличение объема, приходящееся на единицу изменения температуры при постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt}, \quad ^{\circ}C^{-1}, \quad (9)$$

где dt – изменение температуры, $^{\circ}C$.

Для капельных жидкостей значение коэффициента температурного расширения мало, однако в некоторых случаях это требуется учитывать из-за больших температурных перепадов.

Из выражений (5) и (9) для адиабатического процесса, при $p = const$, коэффициент температурного расширения:

$$\beta_t = \frac{1}{t}, \quad ^{\circ}C^{-1}. \quad (10)$$

Важным свойством реальной жидкости, проявляющимся при движении, является *вязкость*, которая характеризует способность

жидкости сопротивляться деформации сдвига или скольжению ее слоев при воздействии внешних сил.

Согласно закону вязкостного трения, между слоями жидкости действуют силы сопротивления сдвига, называемые *касательными силами внутреннего трения*:

$$F_{\tau} = \pm \mu \cdot S \cdot \frac{dv}{dy}, \quad H, \quad (11)$$

где μ – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

S – площадь поверхности трущихся слоев, м^2 ;

$\frac{dv}{dy}$ – градиент скорости, с^{-1} ;

dv – скорость смещения слоев жидкости относительно друг друга, м/с ;

dy – расстояние между соседними слоями жидкости, м .

Знак «+» или «−» в выражении (11) выбирают в зависимости от знака градиента скорости.

Наряду с динамической применяют *кинематическую вязкость*, которая определяется выражением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad \text{м}^2/\text{с}. \quad (12)$$

1.2 Примеры решения задач

1.2.1 Определить плотность смеси, полученной смешиванием жидкости объемом $V_1 = 10 \text{ л}$ с плотностью $\rho_1 = 860 \text{ кг/м}^3$, и жидкости объемом $V_2 = 95 \text{ л}$ с плотностью $\rho_2 = 910 \text{ кг/м}^3$.

Решение.

Искомую плотность определим по следующему выражению:

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2}{V_1 + V_2} = \frac{860 \cdot 0,01 + 910 \cdot 0,095}{0,01 + 0,095} \approx 905,24 \text{ кг/м}^3.$$

1.2.2 При температуре $t_1 = +20^\circ\text{C}$ масло $M-10-B_2$ занимает объем $V_1 = 50 \text{ л}$. Определить объем, который займет масло при температуре $t_2 = -40^\circ\text{C}$ и $t_3 = +80^\circ\text{C}$, если температурный коэффициент объемного расширения $\beta_t = 8,74 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Решение.

Согласно выражению (9), для определения коэффициента температурного расширения имеем:

$$\beta_t = \frac{1}{V_1} \cdot \frac{V_1 - V_2}{t_1 - t_2}, \quad ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Откуда $V_2 = V_1 + (V_1 \cdot (t_2 - t_1)) \cdot \beta_t, \text{ м}^3$.

Тогда при $t_2 = -40^\circ\text{C}$:

$$V_{2_{t_2=-40^\circ\text{C}}} = 50 + (50 \cdot (-40 - 20)) \cdot 8,75 \cdot 10^{-4} = 50 - 0,2625 \approx 49,74 \text{ л.}$$

При $t_3 = +80^\circ\text{C}$:

$$V_{2_{t_3=+80^\circ\text{C}}} = 50 + (50 \cdot (80 - 20)) \cdot 8,75 \cdot 10^{-4} = 50 + 0,2625 \approx 50,26 \text{ л.}$$

1.2.3 Объем воды в отопительной системе (котел, радиаторы, трубопроводы и расширительный бачок) составляет $V_1 = 0,3 \text{ м}^3$. Какой объем воды ΔV дополнительно выйдет в расширительный бачок при нагревании ее с 20°C до 90°C ? Плотность воды при 20°C составляет $\rho_{20^\circ\text{C}} = 998 \text{ кг/м}^3$, при 90°C $\rho_{90^\circ\text{C}} = 965 \text{ кг/м}^3$.

Решение.

Согласно выражению (1), определим массу воды в отопительной системе:

$$m = V_1 \cdot \rho_{20^\circ\text{C}}, \quad \text{кг.}$$

Так как масса воды m в отопительной системе с повышением температуры не изменяется, а изменяется лишь ее плотность, то по выражению (1) можно определить объем воды V_2 при температуре 90°C :

$$V_2 = \frac{m}{\rho_{90^\circ\text{C}}} = \frac{V_1 \cdot \rho_{20^\circ\text{C}}}{\rho_{90^\circ\text{C}}}, \quad \text{м}^3.$$

Тогда дополнительный объем в расширительном бачке составит:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{V_1 \cdot \rho_{20^\circ\text{C}}}{\rho_{90^\circ\text{C}}} - V_1 = V_1 \cdot \left(\frac{\rho_{20^\circ\text{C}}}{\rho_{90^\circ\text{C}}} - 1 \right) = 0,3 \cdot \left(\frac{998}{965} - 1 \right) \approx 0,01 \text{ м}^3.$$

1.3 Задачи

1.3.1 Определить, какой объем воды необходимо дополнительно подать в водопровод диаметром $d = 0,5 \text{ м}$ и длиной $l = 1000 \text{ м}$ для повы-

шения давления до $\Delta p = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ при условии, что водопровод не деформирован и заполнен водой при атмосферном давлении, а ее коэффициент объемного сжатия $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$.

1.3.2 Определить массу нефти в цистерне, если к $V_1 = 7 \text{ м}^3$ нефти с плотностью $\rho_1 = 820 \text{ кг/м}^3$ добавлено $V_2 = 2,6 \text{ м}^3$ нефти с плотностью $\rho_2 = 795 \text{ кг/м}^3$. Вычислить, как и насколько изменится плотность и объем нефти после повышения ее температуры с $t_1 = 15^\circ \text{C}$ до $t_2 = 35^\circ \text{C}$. Коэффициент температурного расширения нефти $\beta_t = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$.

1.3.3 В резервуар залито $V_1 = 15 \text{ м}^3$ нефти плотностью $\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3$. Сколько необходимо долить нефти плотностью $\rho_2 = 824 \text{ кг/м}^3$, чтобы плотность смеси стала равной $\rho_3 = 814 \text{ кг/м}^3$?

1.3.4 Определить, во сколько раз изменится плотность воздуха, если его нагреть с $t_1 = 0^\circ \text{C}$ до $t_2 = 80^\circ \text{C}$ при постоянном давлении.

1.3.5 Бочка, заполненная бензином с температурой $t_1 = 20^\circ \text{C}$ и не содержащая воздуха, нагрелась на солнце до $t_2 = 50^\circ \text{C}$. Насколько бы повысилось давление Δp бензина внутри бочки, если бы она была абсолютно жесткой? Модуль упругости бензина $E = 13 \cdot 10^8 \text{ Па}$, коэффициент температурного расширения $\beta_t = 8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$.

1.3.6 Для периодического накопления дополнительного объема воды, получаемого от изменения температуры, система водяного отопления в верхней точке имеет расширительный бачок, сообщающийся с атмосферой. Определить наименьший объем расширительного бачка при заполнении его водой, если известно, что колебание температуры воды во время периодической работы топки составляет $\Delta t = 90 - 20 = 70^\circ \text{C}$, а объем воды в системе водяного отопления $V = 0,5 \text{ м}^3$. Коэффициент температурного расширения воды $\beta_t = 700 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$.

1.3.7 Определить толщину отложений $\delta_{отл}$ на стенках герметичного водопровода (рисунок 1) с внутренним диаметром $d = 0,3 \text{ м}$ и длиной $l = 2000 \text{ м}$, если при выпуске воды в количестве $\Delta V = 0,05 \text{ м}^3$ давление в водопроводе падает на величину $\Delta p = 1 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Отложения по диаметру и длине водопровода считать распределенными равномерно. Коэффициент объемного сжатия воды $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$.

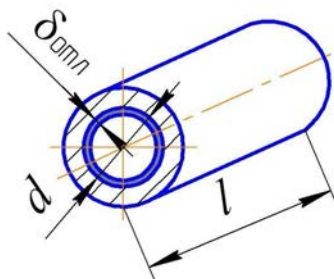


Рисунок 1 – Расчетная схема к задаче 1.3.7

1.3.8 Как изменится плотность бензина, если температура окружающей среды изменится с $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$? Коэффициент температурного расширения бензина $\beta_t = 6 \cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, а плотность при $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 800\text{ кг/м}^3$.

1.3.9 Как изменится удельный вес воды на экваторе и северном полюсе? Известно, что средняя годовая температура на экваторе $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, на северном полюсе $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, и соответственно плотность воды составляет $\rho_{40\text{ }^{\circ}\text{C}} = 992,2\text{ кг/м}^3$, $\rho_{0\text{ }^{\circ}\text{C}} = 999,87\text{ кг/м}^3$. Ускорение свободного падения на экваторе $9,781\text{ м/с}^2$, а на северном полюсе $9,831\text{ м/с}^2$.

1.3.10 Определить кинематическую вязкость воды, если сила трения $F_\tau = 12 \cdot 10^{-4}\text{ Н}$ на поверхности $S = 0,06\text{ м}^2$ создает градиент скорости $\frac{dv}{dy} = 1\text{ м/с}$.

1.4 Методические рекомендации по решению задач

При решении задач необходимо знать, чем отличаются друг от друга жидкость и газообразная среда.

Для определения плотности смеси необходимо использовать выражение, используемое в примере решения задачи 1.2.1.

В задачах, связанных с изменением объема под действием давления и (или) температуры, необходимо учитывать, согласно выражению (1), что масса при этом не изменяется.

В задаче 1.3.4 при определении коэффициента температурного расширения β_t использовать выражение (10) для адиабатического процесса при $p = \text{const}$.

2 ГИДРОСТАТИКА

2.1 Общие сведения

Гидростатика – это раздел гидравлики, в котором изучается равновесие жидкости, находящейся в относительном или абсолютном покое, и ее взаимодействие с твердыми телами.

При *абсолютном покое* жидкость вместе с сосудом неподвижна относительно земли. При *относительном покое* жидкость неподвижна относительно стенок и дна сосуда, в котором она находится, но вместе с ним движется относительно земли.

Основной задачей гидростатики является изучение распределения давления в жидкости и определение на этой основе сил, действующих со стороны жидкости на соприкасающиеся с ней тела, то есть гидростатического давления для любой точки в функции ее координат $p = f(x, y, z)$, а также уравнения поверхности равных давлений $a = i(x, y, z)$.

2.2 Гидростатическое давление, его измерение и использование в механизмах

2.2.1 Общие сведения

Вследствие подвижности частиц жидкости (текучести), в ней действуют силы не сосредоточенные, а распределенные. Все силы разделяют на массовые (распределенные по массе – силы тяжести, инерции) и поверхностные (распределенные по поверхности – силы трения, давления). Последнее рассмотрим подробнее (рисунок 2).

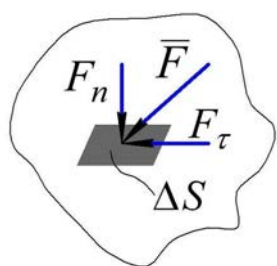


Рисунок 2 – Схема к пояснению действия поверхностных сил, гидростатического давления и касательного напряжения трения: ΔS – элементарная площадка, m^2 ; \vec{F} – вектор поверхностной силы, H ; F_n – сила гидростатического давления, представляющая собой проекцию вектора поверхностной силы \vec{F} на нормаль, H ; F_τ – сила внутреннего трения, представляющая собой проекцию вектора поверхностной силы \vec{F} на касательную, H

Пусть вектор поверхностной силы \vec{F} направлен под некоторым углом к элементарной площадке ΔS , произвольно выбранной в некото-

ром объеме жидкости. Тогда ее проекции дадут – нормальную F_n и тангенциальную (касательную) F_τ составляющие. Нормальная сила F_n вызывает в жидкости напряжение сжатия. Отношение нормальной F_n составляющей поверхностной силы, которую принято называть *силой давления*, к площади элементарной поверхности ΔS называется *нормальным напряжением σ* или *гидромеханическим*, а в случае покоя – *гидростатическим давлением p* . При равномерном распределении силы F_n по площади S оно определится по выражению

$$\sigma = p = \frac{F_n}{S}, \text{ Па.} \quad (13)$$

Отношение касательной F_τ составляющей поверхностной силы, которую принято называть *силой трения*, к площади поверхности S называется *касательным напряжением τ* или *напряжением трения*:

$$\tau = \frac{F_\tau}{S}, \text{ Па.} \quad (14)$$

Очевидно, что в покоящихся ньютоновских жидкостях касательная составляющая равна нулю $F_\tau = 0$, так как в противном случае она вызвала бы сдвиг частиц вдоль плоскости раздела.

Следовательно, *первое свойство: гидростатическое давление всегда направлено перпендикулярно поверхности, на которую оно действует, и создает в жидкости только сжимающие (нормальные) напряжения. Второе свойство: гидростатическое давление в любой точке жидкости не зависит от ориентации в пространстве площадки и действует одинаково по всем направлениям.*

Однако гидростатическое давление может быть различно в точках, имеющих неодинаковые координаты положения по высоте от плоскости раздела жидкости (координата z) как при абсолютном покое, так и при относительном, когда свободная поверхность не является горизонтальной плоскостью (координаты x и y). Таким образом, гидростатическое давление является функцией координат: $p = f(x, y, z)$. Отсюда вытекает *третье свойство: гидростатическое давление в любой точке зависит от ее координат в пространстве.*

Крайне важным, при решении практических задач, является выбор системы отсчета давления. При отсутствии сжимающих напряжений можно принять *абсолютный ноль*. Тогда давление от действия всех внешних сжимающих сил, отсчитываемое от абсолютного ноля (рису-

нок 3) называется *абсолютным* $p_{абс}$. Однако технические задачи удобнее решать в избыточных давлениях $p_{ман}$ или $p_{вак}$, когда за *относительный ноль* принимается атмосферное давление $p_{атм} = 98100 \text{ Па}$.

Манометрическое давление $p_{ман}$ представляет собой избыток давления в данной точке над атмосферным, т.е. значение манометрического давления может меняться от относительного нуля до ∞ и определяется выражением

$$p_{ман} = p_{абс} - p_{атм}, \text{ Па.} \quad (15)$$

Вакуумметрическое давление $p_{вак}$ представляет собой недостаток давления в данной точке до атмосферного, то есть значение вакуума может меняться от $p_{атм} = 98100 \text{ Па}$ (относительного нуля) до абсолютного нуля и определяется выражением

$$p_{вак} = -p_{ман} = p_{атм} - p_{абс}, \text{ Па.} \quad (16)$$

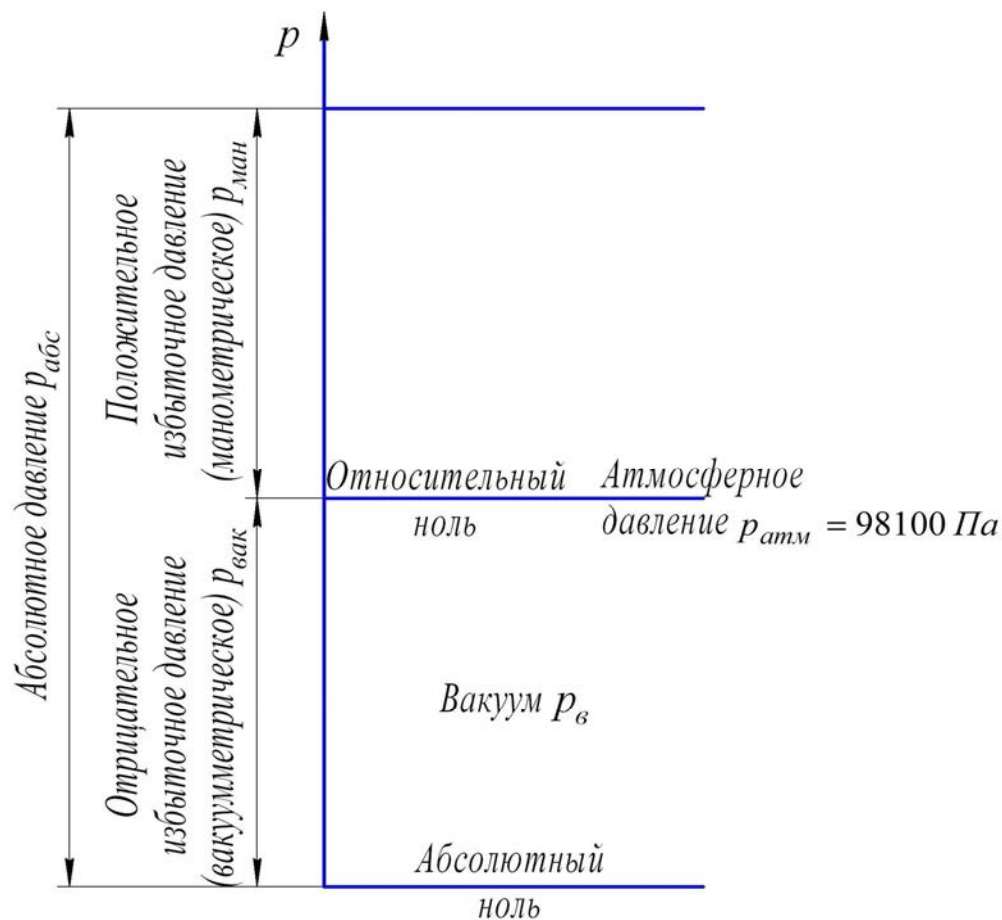


Рисунок 3 – Графическая иллюстрация (шкала) давлений

Закон распределения давления (*основной закон гидростатики*) для однородных несжимаемых жидкостей при абсолютном покое (рисунок 4 а) определяется выражением

$$p = p_o + \rho \cdot g \cdot H, \text{ Па}, \quad (17)$$

где p_o – давление в произвольной точке на свободной поверхности жидкости, Па;

H – глубина погружения рассматриваемой точки, м.

Свободная поверхность – это граница жидкой и газообразной среды, где давление равно давлению газа. В данном случае свободная поверхность является *плоскостью сравнения* и обозначается $0 - 0$.

Из выражения (17) следует, что $p_{ман} = \rho \cdot g \cdot H$, что показывает избыточное положительное (манометрическое) давление в любой точке относительно плоскости сравнения – свободной поверхности $0 - 0$, а $p_{атм} = p_o$. Согласно выражению (17) и представленной схеме (рисунок 4, а), можно построить эпюру гидростатического давления (рисунок 4, б). Из анализа эпюры можно заключить, что абсолютное давление $p_{абс} = p_{атм} + p_{ман}$ (или выражение (15)), то есть это сумма внешнего давления $p_{атм}$, действующего на свободной поверхности и весового давления $\rho \cdot g \cdot H$, создаваемого весом (силой тяжести) столба жидкости высотой H ;

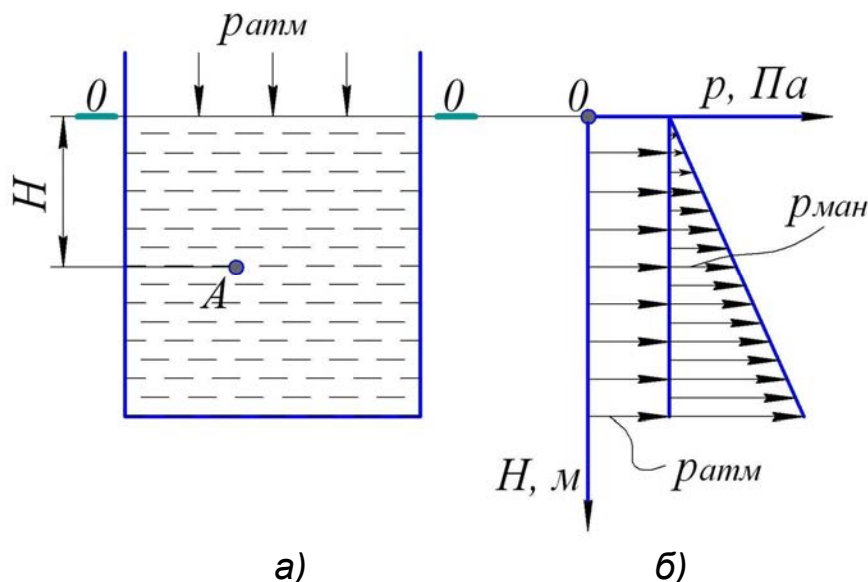


Рисунок 4 – Схема к определению манометрического давления в открытом сосуде: а) – схема открытого сосуда с точкой А, заглубленной на величину H от плоскости сравнения $0 - 0$ (свободной поверхности); б) – эпюра гидростатического давления

Если $p_o > p_{атм}$ (рисунок 5), то плоскость атмосферного давления располагается выше свободной поверхности жидкости на величину H_o :

$$H_o = \frac{p_o - p_{атм}}{\rho \cdot g} = \frac{p_{ман}}{\rho \cdot g}, \text{ м}, \quad (18)$$

где $p_{ман}$ – избыточное (манометрическое) давление на свободной поверхности, Па.

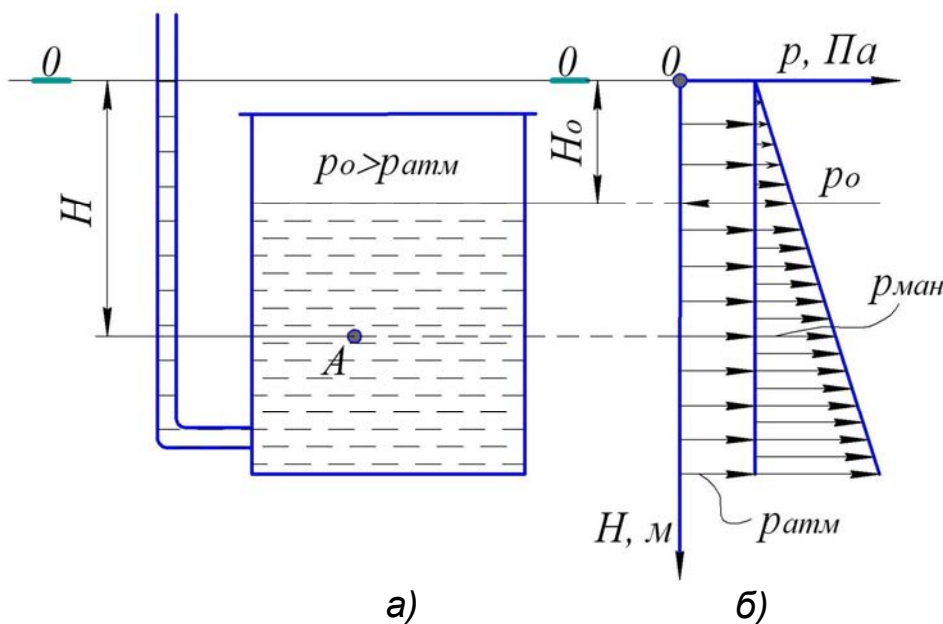


Рисунок 5 – Схема к определению манометрического давления в закрытом сосуде при $p_o > p_{атм}$: а) – схема закрытого сосуда с точкой А, заглубленной на величину H от плоскости сравнения $0 - 0$, которая отстоит от свободной поверхности жидкости на расстоянии H_o ; б) – эпюра гидростатического давления

Если $p_o < p_{атм}$ (рисунок 6), то плоскость $0 - 0$ атмосферного давления располагается ниже свободной поверхности жидкости на величину H_o :

$$H_o = \frac{p_{атм} - p_o}{\rho \cdot g} = \frac{p_{вак}}{\rho \cdot g}, \text{ м}, \quad (19)$$

где $p_{вак}$ – вакуумметрическое давление (вакуум) на свободной поверхности, Па.

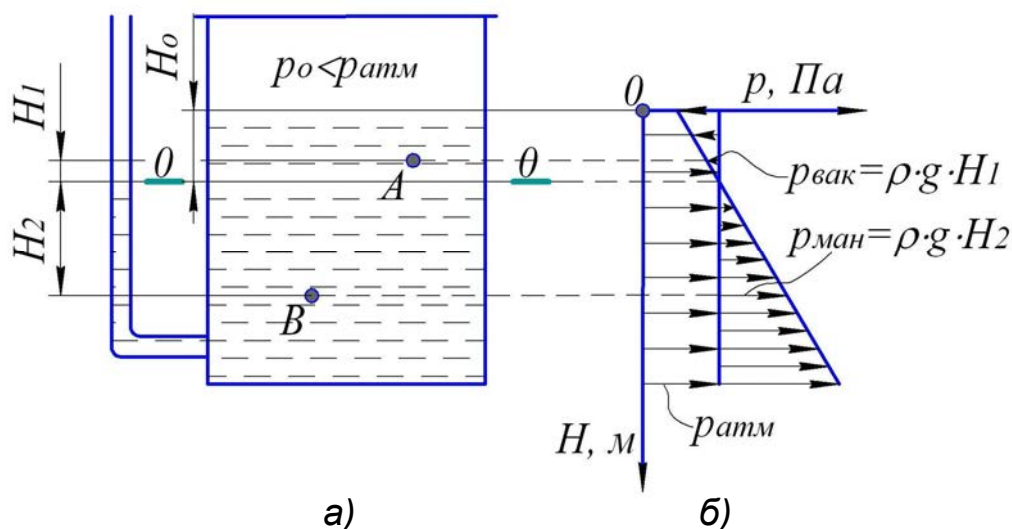


Рисунок 6 – Схема к определению вакуумметрического давления в закрытом сосуде при $p_o < p_{атм}$: а) – схема закрытого сосуда с точками А и В, отстающими соответственно на расстояниях H_1 и H_2 от плоскости сравнения 0 – 0, которая расположена от свободной поверхности на величину H_o ; б) – эпюра гидростатического давления

Из анализа *основного уравнения гидростатики* (17) можно сделать **выводы**:

1. Гидростатическое давление – это сумма внешнего давления p_o , действующего на свободной поверхности, и весового давления $\rho \cdot g \cdot H$, создаваемого весом (силой тяжести) столба жидкости высотой H ;
2. Внешнее давление p_o не зависит от координат, то есть *любое изменение давления в покоейся жидкости передается одинаково во все точки занятого ею пространства*. Это положение называется *законом Паскаля*.

Практически закон Паскаля используется в ряде гидравлических машинах и механизмах: прессах, подъемниках, домкратах, гидроцилиндрах, объемных насосах, гидродвигателях и др. На рисунке 7 приведена принципиальная схема гидравлического пресса, то есть механизма, который используется для получения больших усилий при прессовании, штамповке, испытании материалов и др. Он состоит из двух сообщающихся цилиндров с поршнями площадью S_1 и S_2 .

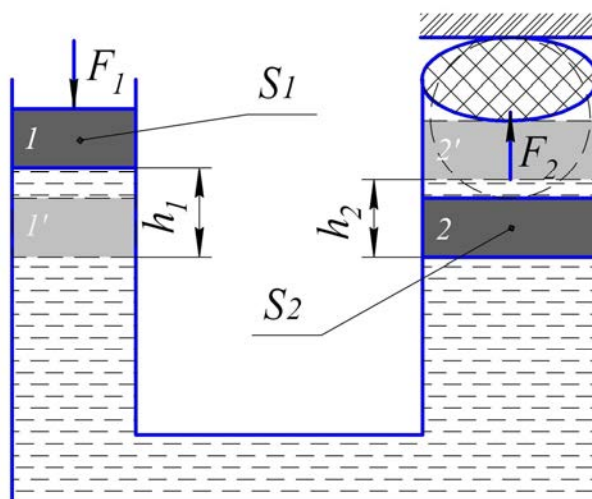


Рисунок 7 – Принципиальная схема действия гидравлического пресса

Прикладывая к меньшему поршню площадью S_1 силу F_1 , в жидкости создается давление

$$p = \frac{F_1}{S_1}, \text{ Па.} \quad (20)$$

Так как давление распространяется равномерно во всех направлениях, то форма сосуда не имеет никакого значения, и давление p действует на каждую точку системы, в том числе и на поршень площадью S_2 , развивая силу

$$F_2 = p \cdot S_2, \text{ Н.} \quad (21)$$

Таким образом, выражение (21) с учетом (20), примет вид:

$$F_2 = \frac{F_1}{S_1} S_2 = F_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2, \text{ Н,} \quad (22)$$

где D_1 , D_2 – соответственно диаметры поршней площадью S_1 и S_2 , м.

Из выражения (22) следует, что отношение сил равно отношению площадей или квадратов диаметров. Тем самым достигается перемещение поршней соответственно на величину h_1 и h_2 из положения 1 в 1' и из 2 в 2' с силами F_1 и F_2 (рисунок 7), где справедливо выражение

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (23)$$

Выражение (23) показывает, что перемещения обоих поршней обратно пропорциональны их площадям. Отношение S_2/S_1 называют *передаточным числом*. В современных гидравлических прессах

развиваются усилия до $5 \times 10^8 \text{ Н}$, а коэффициент полезного действия составляет $\eta = 0,8 - 0,85$.

3. Весовое давление $\rho \cdot g \cdot H$ является функцией координаты точки заглубления под свободную поверхность;

4. Внешнее давление p_o может быть больше, меньше или равно атмосферному $p_{атм} \leq p_o \leq p_{атм}$. Если численное значение p_o определено с учетом атмосферного $p_{атм}$, то давление будет абсолютным $p_{абс}$, а если p_o определено без учета атмосферного, то будет избыточным: манометрическим $p_{ман}$ или вакуумметрическим $p_{вак}$.

2.2.2 Примеры решения задач

2.2.2.1 На какой высоте H установится вода в трубке (рисунок 8), первоначально заполненной водой, а потом опрокинутой и погруженной открытым концом под уровень воды, если атмосферное давление составляет $p_{атм} = 98100 \text{ Па}$ и температура воды $t_1 = 4^\circ \text{C}$? Как изменится высота H , если температура воды повысится до $t_2 = 80^\circ \text{C}$? Давление насыщенных паров и плотность жидкости: при $t_1 = 4^\circ \text{C}$ – $p_{н.п} = 0,618 \text{ кПа}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; при $t_2 = 80^\circ \text{C}$ – $p_{н.п} = 47,4 \text{ кПа}$, $\rho = 971,8 \text{ кг/м}^3$.

Решение.

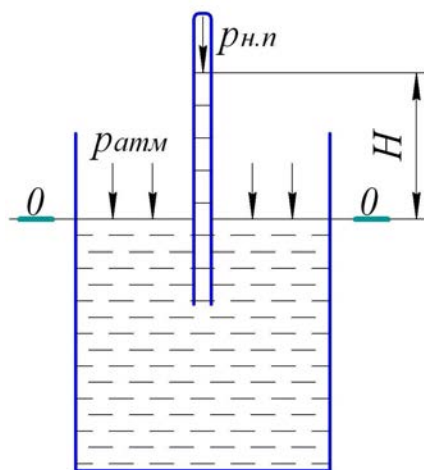


Рисунок 8 – Расчетная схема к задаче 2.2.2.1

Составим уравнение равновесия относительно плоскости сравнения $0 - 0$, совпадающей со свободной поверхностью воды, согласно выражению (17)

$$p_{атм} = p_{н.п} + \rho \cdot g \cdot H, \text{ Па.}$$

$$\text{Откуда } H = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{н.п}}}{\rho \cdot g}, \text{ м.}$$

Тогда при $t_1 = 4^\circ\text{C}$:

$$H_{t_1=4^\circ\text{C}} = \frac{98100 - 618}{1000 \cdot 9,81} \approx 9,94 \text{ м.}$$

При $t_2 = 80^\circ\text{C}$:

$$H_{t_2=80^\circ\text{C}} = \frac{98100 - 47400}{971,8 \cdot 9,81} \approx 5,32 \text{ м.}$$

2.2.2.2 Покоящийся на неподвижном поршне и открытый сверху и снизу сосуд (рисунок 9) массой $m = 16 \text{ кг}$ состоит из двух цилиндрических частей, внутренние диаметры которых $D = 0,5 \text{ м}$ и $d = 0,3 \text{ м}$. Определить, какой минимальный объем V воды должен содержаться в верхней части сосуда, чтобы сосуд всплыл над поршнем. Трением сосуда о поршень пренебречь. Плотность воды принять $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

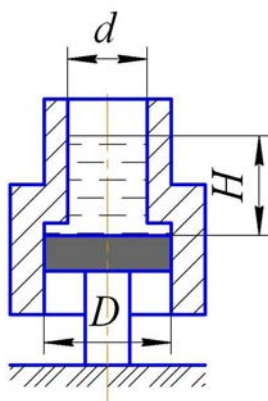


Рисунок 9 – Расчетная схема к задаче 2.2.2.2

Решение.

1. Рассмотрим силы, действующие на данную систему:

– сила тяжести сосуда $G = m \cdot g$, которая направлена вертикально вниз;

– сила давления жидкости на площадку сосуда $S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$,

которая определится, согласно выражению (13), как $F_n = \frac{p \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$

и направлена вертикально вверх, согласно свойствам гидростатическо-