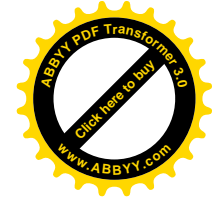
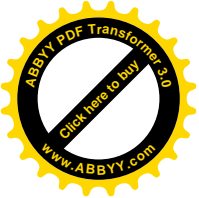


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ  
ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## Рабочая тетрадь по теме "Элементы механики жидкостей и газов"

пос. Персиановский  
2011г.



УДК 531/534 (075)

ББК 22.2:74.58

Б-20

**Авторы:** кандидат с/х наук, доцент Баленко Е. Г.,  
старший преподаватель Тарусова Т. Ю.

**Рабочая тетрадь по теме "Элементы механики жидкостей и газов":**

рабочая тетрадь / Е. Г. Баленко, Т.Ю. Тарусова.- пос. Персиановский: изд-во  
ДГАУ, 2011.-29 с.

Рабочая тетрадь предназначена для организации самостоятельной работы студентов ДонГАУ всех специальностей, изучающих курс физики. В пособии дается краткое изложение раздела «Элементы механики жидкостей и газов», в конце приводятся теоретические вопросы для самоподготовки и контроля.

Таблиц - 1

Рис.– 12

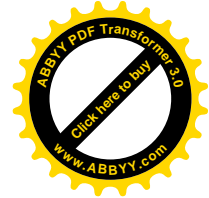
**Рецензенты:** Заведующий кафедрой «МО и ППП», доктор технических наук, профессор Коханенко В. Н; кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика и физика» Мокриевич А. Г.

Утверждено методической комиссией факультета биотехнологии, товароведения и экспертизы товаров (протокол № 6 от 10.05.2011)

Рекомендовано к изданию методическим советом университета (протокол № 6 от 7.06.2011)

© Е. Г. Баленко, Т. Ю. Тарусова

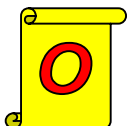
© Донской государственный аграрный университет, 2011



# Содержание

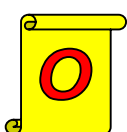
1. Основные физические свойства жидкостей	5
2. Элементы гидростатики	11
3. Элементы гидро- и аэродинамики	18
4. Вопросы	27
5. Литература	28

## Тема: Элементы механики жидкостей и газов



**Механика жидкости** (гидромеханика) – раздел механики, изучающий движение и равновесие жидкости, а также взаимодействие между жидкостью и твердыми телами, полностью или частично погруженными в жидкость.

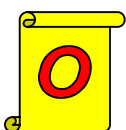
В гидромеханике законы механики жидкого тела изучаются строго математически на базе общих законов физики о сохранении материи и энергии, на применении основных принципов теоретической механики.



**Гидравликой** называется техническая наука, изучающая механические свойства, законы равновесия и движения жидкостей.

В отличие от гидромеханики гидравлика при изучении законов движения и равновесия жидкости особое внимание уделяет применению этих законов к решению практических задач. Кроме того, гидравлика рассматривает некоторые вопросы более упрощенно, чем гидромеханика, но доводит свои решения до форм, удобных при инженерных расчетах в гидротехнике, с/х мелиорации, водоснабжении и канализации, гидроэнергетике, машиностроении, судостроении и т.д.

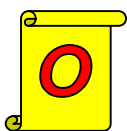
### 1. Основные физические свойства жидкостей



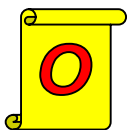
**Жидкость** – физическое тело, которое способно деформироваться (течь) под воздействием сколь угодно малой касательной силы.

Все жидкости делятся на два класса: капельные и газообразные. Капельная жидкость имеет объем, но принимает форму сосуда, в котором она находится. Если объем капельной жидкости меньше объема сосуда, то жидкость занимает часть объема сосуда и образует свободную поверхность. Лишь в небольших количествах капля жидкости может принимать сферическую форму. В отличие от капельных жидкостей газы не имеют своей определенной формы и объема. Они всегда занимают весь объем сосуда, в котором находятся.

В классической гидромеханике рассматривается жидкость как однородное, изотропное, несжимаемое тело, обладающее полной неподвижностью частиц при отсутствии между ними сцепления и трения.



**Однородным и изотропным** называется тело, обладающее одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям.



**Идеальной жидкостью** называется такая жидкость, для которой можно пренебречь потерей энергии на трение между слоями жидкости (то есть жидкость, которая не имеет вязкости).

Теоретическое изучение свойств реальной жидкости или газа с учетом сил молекулярного взаимодействия и объема молекул очень сложно. Поэтому изучают идеальные жидкости, а затем на основании опытов оцениваются отклонения реальных жидкостей (газов) от идеальных.

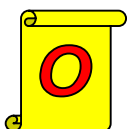
Жидкость в гидромеханике рассматривают как непрерывную среду, заполняющую пространство без пустот и промежутков, т. е. отвлекаются от молекулярного строения жидкости и ее частицы, даже бесконечно малые, считают состоящими из большого числа молекул.

Вследствие текучести (подвижности частиц) в жидкости действуют силы не сосредоточенные, а непрерывно распределенные по ее объему (массе) или поверхности. В связи с этим силы, действующие на объемы жидкости и являющиеся по отношению к ним внешними, разделяют на массовые (объемные) и поверхностные.

Массовые силы в соответствии со вторым законом Ньютона пропорциональны массе жидкости или, для однородной жидкости, - ее объему. К ним относятся сила тяжести и сила инерции переносного движения, действующая на жидкость при относительном ее покое в ускоренно движущихся сосудах или при относительном движении жидкости в руслах, перемещающихся с ускорением.

Поверхностные силы непрерывно распределены по поверхности жидкости и при равномерном их распределении пропорциональны площади этой поверхности. Эти силы обусловлены непосредственным воздействием других тел (твердых и газообразных), соприкасающихся с данной жидкостью. Как следует из третьего закона Ньютона, с такими же силами, но в противоположном направлении, жидкость действует на соседние с нею тела.

Как массовые, так и поверхностные силы в гидромеханике рассматривают обычно в виде единичных сил, т. е. сил, отнесенных к соответствующим единицам. Массовые силы относят к единице массы, а поверхностные – к единице площади.



**Давление** – физическая величина, определяемая нормальной силой  $\vec{F}$  действующей со стороны жидкости на единицу площади  $S$ :

$$p = \frac{\vec{F}}{S}$$



Единица измерения давления в системе СИ - Паскаль (Па):

$$[p] = \left[ \frac{H}{m^2} \right] = [Pa]$$

Часто используются внесистемные единицы: нормальная атмосфера (атм) и миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.):

$$1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм Hg}$$



Измерение давления в миллиметрах ртутного столба связано с тем, что в физике и в технике широко использовались жидкостные барометры Эванджелиста Торричелли, ученика Галилея. Принцип такого барометра состоит в том, что измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости. Например, атмосферное давление уравнивает столб жидкости в перевернутом стакане. Естественно, это возможно только в том случае, если между дном стакана и жидкостью находится вакуум. Реально в этом пространстве всегда присутствуют пары измерительной жидкости. Ртуть удобна в качестве измерительной жидкости по двум причинам: она имеет самую большую плотность, что позволяет использовать стаканы не очень большой высоты (нетрудно подсчитать, что 760 мм ртутного столба соответствуют давлению 10 метров водяного столба), и, кроме того, у ртути малая плотность паров. Ртутные манометры до сих пор используются в физических экспериментальных установках, поскольку ртутные и, особенно, водяные манометры обладают большой чувствительностью и очень удобны для измерения малых перепадов давления. Величина нормального атмосферного давления используется в технике за единицу измерения давления (техническая атмосфера - атм.). Техническая атмосфера примерно равна 100 килопаскалям, или 760 миллиметрам ртутного столба, или 10 метрам водяного столба. Поскольку мы привыкли жить при нормальном атмосферном давлении, то такое давление является для нашего организма комфортным. При изменении атмосферного давления или при подъемах на высокие горы, организм чувствует дискомфорт, особенно, у не очень здоровых людей. Еще хуже обстоит дело при погружении в воду на большие глубины. При погружении водолаз испытывает на себе давление водяного столба: на глубине 10 метров это давление вдвое больше атмосферного, а на глубине 100 метров в 11 раз больше атмосферного. Такое давление губительно для человека, поэтому глубоководные скафандры и глубоководные аппараты имеют толстую стальную оболочку.

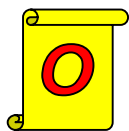


Барометр - прибор для измерения атмосферного давления. Ртутные барометры Торричелли - наиболее точные приборы, ими оборудованы метеорологические станции. В технике (в частности, в авиации) используют барометры другого вида - анемометры. Их чувствительным элементом является герметичная откачанная металлическая коробка, которая сжимается под действием атмосферного давления, а ее деформация с помощью специальной передачи приводит к повороту указателя-стрелки. Анемометры проверяются по ртутным барометрам. Манометр - прибор для измерения давления жидкости или газа. Чувствительным элементом манометров является деформируемое тело

(жидкость, металлическая мембрана и др.). Эта деформация преобразуется в поворот стрелки, указывающей по шкале величину давления. Промышленность выпускает абсолютные манометры (шкала которых начинается с нулевого давления), избыточные манометры (шкала которых начинается с нормального атмосферного давления), дифманометры (измеряющие разность двух давлений), барометры (измеряющие атмосферное давление), вакуумметры (измеряющие давление меньше атмосферного).

Гидромеханика опирается прежде всего на физические свойства жидкости. Рассмотрим основные свойства капельных жидкостей.

Одной из основных механических характеристик жидкости является ее плотность.



**Плотность тела** – масса тела, содержащегося в единице объема.



Единица измерения плотности в системе СИ:

$$[\rho] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

Гидромеханическое определение жидкости как сплошной материальной среды, позволяет в свою очередь, дать определение плотности жидкости  $\rho$  в данной точке, как предельное отношение элементарной массы жидкости  $\Delta m$  к ее элементарному объему  $\Delta V$ , когда последний стремится к нулю, т. е.  $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$ .

Для однородного жидкого тела плотность, как и масса, не зависит ни от величины общего объема, ни от ускорения и определяется по формуле:

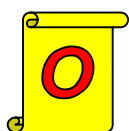
$$\rho = \frac{m}{V},$$

где  $m$  - масса тела,  $V$  - объем занятый массой.

Плотность жидкости зависит от ее температуры. С повышением температуры плотность жидкости уменьшается. Для температуры  $t^\circ$  плотность можно определить по формуле:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha_t \cdot t},$$

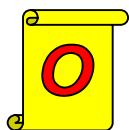
где  $\rho_0$  - плотность жидкости при температуре  $0^\circ \text{C}$ ,  $\alpha_t$  - коэффициент объемного расширения, определяемый из опыта и имеющий для каждой жидкости свое значение.



**Удельным весом**  $\gamma$  - называют вес единицы объема жидкости, т.е.  $\gamma = \frac{G}{V}$ , где  $G$  - вес жидкости в объеме  $V$ .

Связь между удельным весом  $\gamma$  и плотностью  $\rho$  легко найти, если учесть, что  $G = mg$ , тогда  $\rho = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g}$ .

Весьма важным свойством жидкостей является упругость, характеризующая степень их сжимаемости.



**Сжимаемость** – свойство жидкости изменять свой объем под действием внешних давлений.

Одним из свойств идеальной жидкости является полная сжимаемость. Это условное свойство широко используется при установлении различных закономерностей гидравлики.

Реальные жидкости в отличие от идеальных практически сжимаемы. При этом газы обладают большей степенью сжимаемости.



Под действием внешнего давления объем газов уменьшается. В связи с тем, что сжимаемость капельных жидкостей весьма мала, практически ею в большинстве случаев пренебрегают.

Сжимаемость характеризуется коэффициентов объемного сжатия, который представляет собой относительное изменение объема, приходящееся на единицу давления, т.е.

$$\beta_p = -\frac{dV}{dp} \cdot \frac{1}{V}.$$



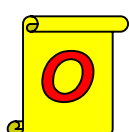
Единица измерения коэффициента объемного сжатия в системе СИ:

$$[\beta_p] = \left[ \frac{m^2}{H} \right].$$



Знак минус в формуле обусловлен тем, что положительному приращению давления  $p$  соответствует отрицательное приращение объема  $V$ .

С увеличением температуры и давления сжимаемость капельных жидкостей уменьшается.



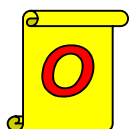
**Модуль объемной упругости** капельной жидкости - величина, обратная коэффициенту объемного сжатия:

$$E = \frac{1}{\beta_p}.$$





С увеличением температуры жидкости расширяются.



**Тепловой коэффициент объемного расширения** – число выражающее относительное изменение объема  $V$  при изменении температуры  $t$  на  $1^\circ \text{C}$ :

$$\alpha_t = \frac{\Delta V}{\Delta t \cdot V}.$$

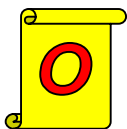
Тепловой коэффициент объемного расширения воды увеличивается с возрастанием давления и температуры; для большинства других капельных жидкостей этот коэффициент с увеличением давления уменьшается. Газы еще в большей степени, чем капельные жидкости, расширяются от нагревания, поэтому коэффициент объемного расширения  $\alpha_t$  в свою очередь также выше.

В таблице 1 приведены для сравнения значения коэффициентов объемного расширения для некоторых жидкостей и воздуха.

Таблица 1: Значение  $\alpha_t$  для некоторых жидкостей и воздуха при  $t = 20^\circ \text{C}$  и  $p = 10^5 \text{ Па}$ .

Наименование жидкости (газа)	$\alpha_t$
Вода	0,00015
Глицерин	0,00050
Ртуть	0,00018
Оливковое масло	0,00072
Воздух	0,00367

## 2. Элементы гидростатики



**Гидростатикой** называется раздел физики, изучающий условия равновесия жидкостей и газов, а также условие равновесия твердых тел, помещенных в жидкость или газ.

В отличие от твердых тел жидкости и газы обладают свойством текучести, они не сохраняют свою форму, а принимают форму твердого сосуда, в котором находятся. Текучесть жидкостей и газов объясняется малыми силами трения междудвигающимися соприкасающимися слоями. Сила жидкого трения стремится к нулю при малых относительных скоростях слоев. Иными словами, жидкости и газы не имеют сил трения покоя. В гидростатике мы будем говорить о жидкости, подразумевая при этом как жидкость, так и газ. Газы, к тому же, занимают весь объем сосуда, в отличие от жидкостей, которые могут иметь свободную границу. Основным понятием гидростатики является скалярная физическая величина, называемая давлением, а основным законом гидростатики является закон Паскаля, эмпирически установленный в середине 17 в.

Историческая  
справка



**Паскаль (Pascal) Блез** (19.VI.1623–19.VIII.1662).

Французский религиозный философ, писатель, математик и физик. Блез Паскаль родился в Клермон-Ферране в семье юриста, интересовавшегося естествознанием и математикой и давшего своим детям широкое и глубокое образование. В конце 1640 гг. Паскаль увлекается проблемами аэро- и гидростатики. Исследования Паскаля по гидростатике начались после того, как он узнал об опытах Торричелли. Паскаль повторил опыты Торричелли, используя вместо ртути воду и вино и меняя форму трубок. Свои эксперименты Паскаль описал в небольшом сочинении в 1647 г. Там, в частности, появилось описание гидравлического пресса. В 1654 г. был закончен трактат, который увидел свет лишь после смерти Паскаля в 1663 г. Именно в этом трактате Паскаль отчетливо высказал мысль о давлении внутри жидкостей и сформулировал названный его именем закон. Вместе с Г. Галилеем и С. Стевином Паскаль считается основоположником классической гидростатики: он установил ее основной закон (закон Паскаля), принцип действия гидравлического пресса, указал на общность основных законов равновесия жидкостей и газов. Опыт, проведенный под руководством Паскаля (1648), подтвердил предположение Э. Торричелли о существовании атмосферного давления. Паскаль умер после тяжелой болезни, сопровождавшейся страшными болями, в возрасте 39 лет.



**Закон Паскаля:**

Давление в жидкости или газе передается во всех направлениях одинаково и не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует.

Для иллюстрации закона Паскаля на рис. 1 изображена небольшая прямоугольная призма, погруженная в жидкость. Если предположить, что плотность материала призмы равна плотности жидкости, то призма должна находиться в жидкости в состоянии безразличного равновесия. Это означает, что силы давления, действующие на грани призмы, должны быть уравновешены. Это произойдет только в том случае, если давления, то есть силы, действующие на единицу поверхности каждой грани, одинаковы:  $p_1 = p_2 = p_3 = p$ .

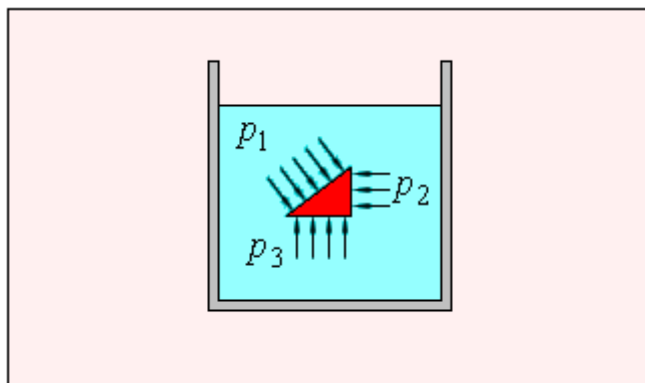


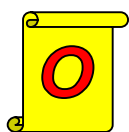
Рис. 1

Закон Паскаля  $p_1 = p_2 = p_3 = p$

Давление жидкости на дно или боковые стенки сосуда зависит от высоты столба жидкости. Сила давления на дно цилиндрического сосуда высоты  $h$  и площади основания  $S$  равна весу столба жидкости  $mg$ , где  $m = \rho h S$  – масса жидкости в сосуде,  $\rho$  – плотность жидкости. Следовательно

$$p = \frac{\rho h S g}{S} = \rho g h$$

Такое же давление на глубине  $h$  в соответствии с законом Паскаля жидкость оказывает и на боковые стенки сосуда.



Давление, описываемое формулой  $p = \rho g h$  называется **гидростатическим давлением**.



**Замечание** В формуле для гидростатического давления мы считаем, что жидкость несжимаема. Это позволило нам использовать постоянную плотность жидкости. В результате мы получили линейную зависимость давления от глубины. Для газов эта формула справедлива только для малых перепадов высот. Поскольку газы легко сжимаемы, то давление верхних слоев столба газа приведет к его сжатию в нижних слоях и, как следствие, к увеличению плотности газа. Вспомните, как трудно дышать высоко в горах из-за разреженности воздуха. А летчикам на больших высотах даже приходится надевать кислородную маску. Связано это с тем, что плотность воздуха, которым мы привыкли дышать, падает по мере подъема над уровнем моря.

Для столба воздуха формула гидростатического давления и выглядит иначе, и называется формулой барометрического давления. В институте Вы сможете доказать, что барометрическое давление при постоянной температуре падает по мере подъема от уровня моря по экспоненте:  $p = p_0 \cdot e^{-kz}$ , где  $z$  - высота над уровнем моря.

Если жидкость находится в цилиндре под поршнем (рис. 2), то, действуя на поршень некоторой внешней силой  $F$ , можно создавать в жидкости дополнительное давление  $p_0 = \frac{F}{S}$ , где  $S$  – площадь поршня.

Таким образом, полное давление в жидкости на глубине  $h$  можно записать в виде:

$$p = p_0 + \rho gh$$

Если на рис. 2 поршень убрать, то давление на поверхность жидкости будет равно атмосферному давлению:  $p_0 = p_{атм}$ .

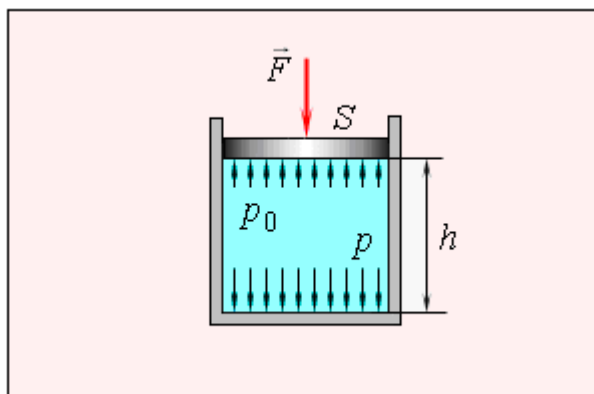
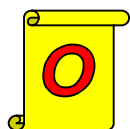


Рис.2

Зависимость давления от высоты столба жидкости.

Из-за разности давлений в жидкости на разных уровнях возникает **выталкивающая** или **архимедова** сила  $\vec{F}_A$ .



**Сила Архимеда** для покоящейся жидкости равна произведению плотности жидкости на ускорение свободного падения и на объем погруженной в жидкость части тела:  $F_A = \rho g V$

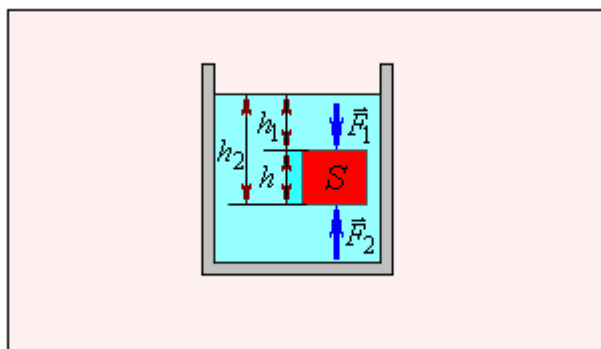


Рис.3

Архимедова сила

Рис. 3 поясняет появление архимедовой силы. В жидкость погружено тело в виде прямоугольного параллелепипеда высотой  $h$  и площадью основания  $S$ . Разность давлений на нижнюю и верхнюю грани есть:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g h$$

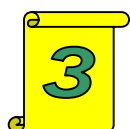
Поэтому выталкивающая сила  $\vec{F}_A$  будет направлена вверх, и ее модуль равен

$$F_A = F_2 - F_1 = S \Delta p = \rho g S h = \rho g V$$

где  $V$  – объем вытесненной телом жидкости, а  $\rho V$  – ее масса.



1. Сила Архимеда приложена в центре масс вытесненной телом жидкости. Точка приложения силы Архимеда называется центром гидростатического давления.
2. По своей природе сила Архимеда является силой упругости, возникающей в результате упругого сжатия жидкости под действием силы тяжести тела.
3. Сила Архимеда существует не всегда. Если тело плотно прижать к дну банки так, чтобы между телом и дном не было воды, то сила давления жидкости на нижнюю грань тела исчезнет. Вместо выталкивающей силы на тело будут действовать сила давления на верхнюю грань, которая будет еще больше прижимать тело ко дну сосуда, и сила. Реакции опоры со стороны дна сосуда.



### Закон Архимеда:

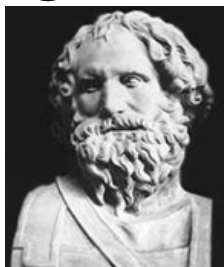
На тело, погруженное в жидкость, со стороны жидкости действует выталкивающая сила Архимеда, которая по величине равна весу вытесненной телом жидкости, а по направлению противоположна этому весу.

Это утверждение справедливо для тел любой формы.

Из закона Архимеда вытекает, что если средняя плотность тела  $\rho_m$  больше плотности жидкости (или газа)  $\rho$ , тело будет опускаться на дно. Если же  $\rho_m < \rho$ , тело будет плавать на поверхности жидкости. Объем

погруженной части тела будет таков, что вес вытесненной жидкости равен весу тела. Для подъема воздушного шара в воздухе его вес должен быть меньше веса вытесненного воздуха. Поэтому воздушные шары заполняют легкими газами (водородом, гелием) или нагретым воздухом.

Историческая справка



**Архимед** (около 287–212 гг. до н.э.).

Древнегреческий ученый, математик и изобретатель. Сын астронома, Архимед родился в Сиракузах. Побывал в Александрии, которая располагала известной математической школой. По возвращении в Сиракузы Архимед посвятил себя математике и механике. Сконструированные им аппараты и машины воспринимались современниками как чудеса техники. Он открыл закон об удельном весе (находясь в публичной бане) и изучал теорию подъемных механизмов.

Среди его изобретений – Архимедов винт, устройство для поднятия воды или сыпучих материалов, таких как песок. Архимед говорил о рычаге, теорией которого он занимался: «Дайте мне точку опоры, и я переверну весь мир». Когда в 212 римляне ворвались в Сиракузы, Архимед был убит одним из их солдат.

Следствием выражения для полного давления в жидкости  $p = p_0 + \rho gh$  является закон сообщающихся сосудов (рис. 4).



### Закон сообщающихся сосудов:

1. Однородная жидкость устанавливается на одном и том же уровне  $h_1 = h_2 = h$ .

2. Высоты взаимно уравновешенных столбов разнородной жидкости обратно пропорциональны плотностям жидкости:  $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ .

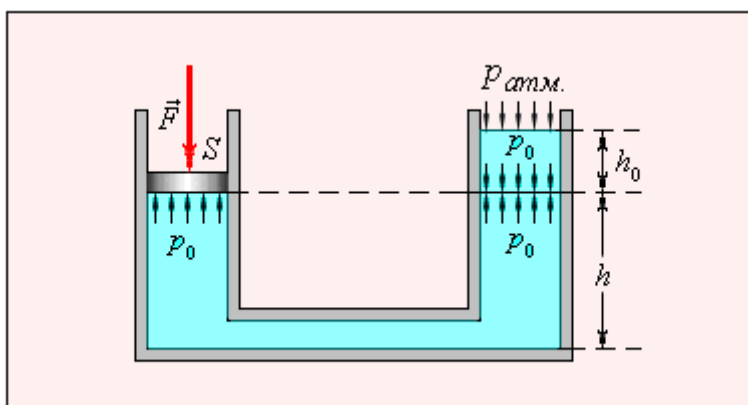


Рис.4

Пример сообщающихся сосудов.

## Техника

Этот закон используется в строительстве для определения горизонталей. Для этого две стеклянные трубки соединяются гибким резиновым шлангом, в которой заливается вода. Отмечая уровень воды в одной и другой стеклянной трубке, мы можем провести точно горизонтальную линию (уровень). Другое использование этого закона – определение уровня жидкости в закрытых сосудах. Например, для определения уровня воды в паровых котлах теплоэлектростанций и котельных используются водомеры виде толстостенной металлической трубки, соединенной с котлом. Эта трубка имеет окно из толстостенного стекла, что позволяет наблюдать свободную поверхность воды, и, тем самым, определять уровень воды в котле.

Если оба вертикально расположенных цилиндра сообщающихся сосудов закрыть поршнями, то с помощью внешних сил, приложенных к поршням, в жидкости можно создать большое давление  $p$ , во много раз превышающее гидростатическое давление  $\rho gh$  в любой точке системы. Тогда можно считать, что во всей системе устанавливается одинаковое давление  $p$ . Если поршни имеют разные площади  $S_1$  и  $S_2$ , то на них со стороны жидкости действуют разные силы  $F_1 = pS_1$  и  $F_2 = pS_2$ . Такие же по модулю, но противоположно направленные внешние силы должны быть приложены к поршням для удержания системы в равновесии. Таким образом,

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \text{ или } F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$$

Если  $S_2 \gg S_1$ , то  $F_2 \gg F_1$ . Устройства такого рода называют *гидравлическими машинами* или *гидравлическим прессом* (рис. 5).

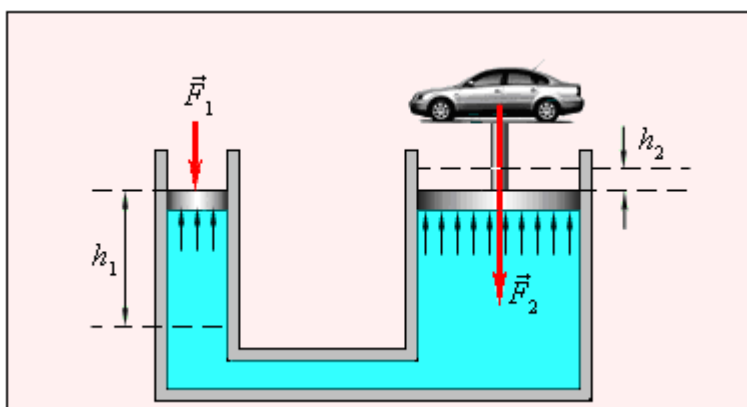


Рис.5

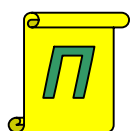
Гидравлическая машина

Гидравлический пресс относится к простым механизмам, таким как рычаги, винтовые соединения и блоки. Гидравлический пресс состоит из двух сообщающихся цилиндрических сосудов, залитых, как правило, машинным маслом. В каждом из этих сосудов ходит плотно пригнанный поршень. Нажимая на малый поршень, мы создаем давление в малой камере, и масло начинает перетекать из малой камеры в большую. Это приводит к тому, что большой поршень начинает двигаться вверх, совершая нужную нам работу по деформации заготовки. Поскольку масло практически несжимаемо, то

уменьшение объема масла в малой камере будет почти точно равно увеличению объема масла в большой камере. Кроме того, давление, создаваемое поршнями в камерах гидравлического пресса, существенно больше давления столба масла и достаточно точно можно считать, что давление в обеих камерах одно и то же на всех высотах.

Гидравлические прессы позволяют получить значительный выигрыш в силе. Если поршень в узком цилиндре переместить вниз под действием внешней силы  $F_1$  на расстояние  $h_1$  то поршень широком цилиндре переместится на расстояние  $h_2 = \frac{S_1}{S_2} h_1$  поднимая тяжелый груз.

Таким образом, выигрыш в силе в  $n = \frac{S_2}{S_1}$  раз обязательно сопровождается таким же проигрышем в расстоянии.



### **Золотое правило механики:**

Произведение силы на расстояние остается неизменным:

$$F_1 h_1 = F_2 h_2$$

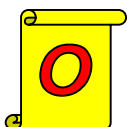
Это правило выполняется для любых идеальных машин, в которых не действуют силы трения.



Отсюда следует, что, выигрывая, например, в 10 раз в силе, мы проигрываем в 10 раз в ходе поршня. "Золотое правило" простых механизмов является частным случаем закона сохранения энергии: произведение силы давления малого поршня на его перемещение равно той работе, которую мы совершаем над прессом, а произведение силы давления большого поршня на его перемещение равно той работе, которую совершает пресс, сжимая деталь. Естественно, если не учитывать сжимаемость жидкости и потерь энергии на трение, эти работы равны между собой. Гидравлические машины, используемые для подъема грузов, называются домкратами. Они широко применяются также в качестве гидравлических прессов. В качестве жидкости обычно используются минеральные масла.

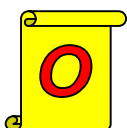


### 3. Элементы гидро- и аэродинамики

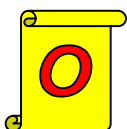


**Гидродинамикой** называется раздел физики, изучающий движение жидкостей и газов, а также движение твердых тел в жидкостях и газах.

Движение жидкостей или газов представляет собой сложное явление. Для его описания используются различные упрощающие предположения (модели). В простейшей модели жидкость (или газ) предполагаются **несжимаемыми и идеальными**.

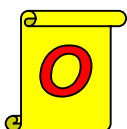


**Несжимаемая жидкость** — жидкость или газ, зависимость плотностей которых от давления в данной задаче можно пренебречь.

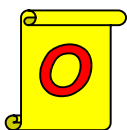


**Стационарным** принято называть такой поток жидкости, в котором скорости и давления во времени не изменяются.

Опыт показывает, что стационарные потоки возникают только при достаточно малых скоростях движения жидкости. В стационарном потоке частицы жидкости перемещаются по неизменным во времени траекториям, которые называются линиями тока.



**Линия тока** — это линия, в каждой точке которой касательная к ней совпадает по направлению с вектором скорости в данный момент времени (используется для графического изображения течения жидкости).



**Трубка тока** - поверхность, образуемая линиями тока, проведенными через все точки выделенного внутри жидкости малого замкнутого контура.

Если рассматривается стационарное движение несжимаемой жидкости (или газа), то масса и объем жидкости, протекающий за какой-то промежуток времени через любое поперечное сечение трубки тока, должны оставаться неизменными (имея это ввиду, часто говорят о постоянстве массового и объемного расхода жидкости или газа). Несжимаемая жидкость движется сплошным неразрывным потоком и не может накапливаться в некоторых частях трубки тока или разрываться, образуя пустоты в других. Этот факт находит свое отражение в так называемом уравнении неразрывности для трубки тока несжимаемой жидкости (или газа).

Рассмотрим трубку тока (рис. 6), выбрав два сечения  $S_1$  и  $S_2$ , перпендикулярные направлению скорости.

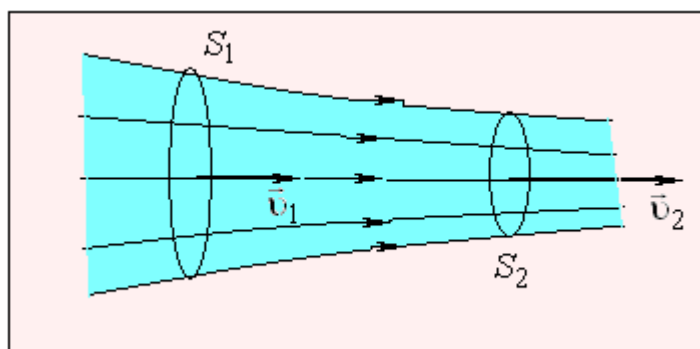


Рис. 6

К уравнению неразрывности

За время  $\Delta t$  через сечение  $S$  проходит объем жидкости  $Sv\Delta t$ . Если жидкость несжимаема, то через  $S_2$  за 1 с пройдет такой же объем жидкости, что и через  $S_1$ , тогда

$$S_1v_1 = S_2v_2 \text{ или } Sv = \text{const}.$$

Это уравнение называется **уравнением неразрывности**.

При движении идеальной жидкости не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, поэтому выполняется закон сохранения механической энергии. Следствием этого закона для стационарного потока идеальной и несжимаемой жидкости является уравнение Бернулли (1738 г.).

Рассмотрим стационарное движение идеальной несжимаемой жидкости по трубе переменного сечения (рис. 7). Различные части трубы могут находиться на разных высотах.

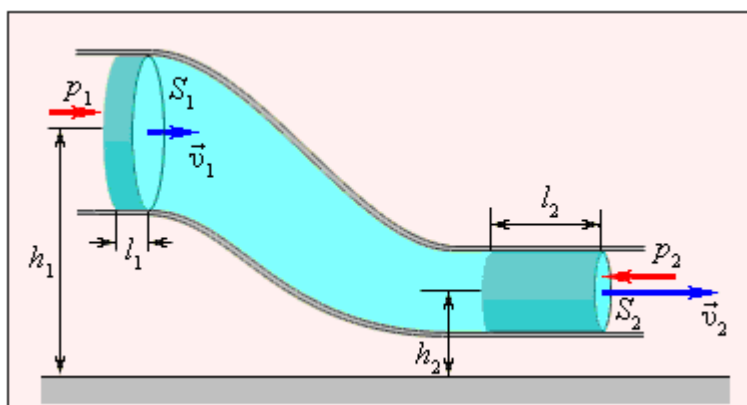
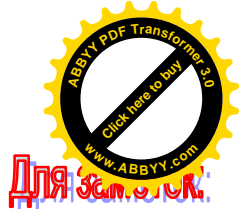


Рис.7

Течение идеальной жидкости по трубе переменного сечения

При переходе жидкости с участка трубы с большим сечением на участок с меньшим сечением скорость течения возрастает, то есть жидкость движется с ускорением. Следовательно, на жидкость действует сила. В горизонтальной трубе эта сила может возникнуть только из-за разности давлений в широком и узком участках трубы. Давление в широком участке трубы должно быть больше чем в узком участке. Если участки трубы



расположены на разной высоте, то ускорение жидкости вызывается совместным действием силы тяжести и силы давления. Сила давления – это упругая сила сжатия жидкости. Несжимаемость жидкости означает лишь то, что появление упругих сил происходит при пренебрежимо малом изменении объема любой части жидкости. Так как жидкость предполагается идеальной, она течет по трубе без трения. Выберем трубку тока, ограниченную сечениями  $S_1$  и  $S_2$ .

По закону сохранения энергии изменение полной энергии жидкости массой  $m$  в местах сечений  $S_1$  и  $S_2$  равно работе внешних сил по перемещению этой массы жидкости:

$$E_2 - E_1 = A,$$

$$\text{где } E_1 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1, \quad E_2 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

По определению, работа равна произведению силы на перемещение:

$$A = F_1 l_1 + F_2 l_2.$$

Так как движение жидкости считаем равномерным, то

$$l_1 = v_1 \Delta t, \quad l_2 = v_2 \Delta t.$$

Из определения давления выражаем силу, которая равна произведению давления на площадь действия:

$$F_1 = p_1 S_1, \quad F_2 = -p_2 S_2.$$

Сила  $F_2$  отрицательная, так как направлена в сторону, противоположную течению жидкости (рис. 7).

Согласно уравнению неразрывности для несжимаемой жидкости, объем занимаемый жидкостью равен

$$\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t$$

Подставив все эти формулы в закон сохранения энергии и произведя преобразования (разделив на  $\Delta V$ ), получим

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2,$$

где  $\rho$  - плотность жидкости. Сечения выбраны произвольно, поэтому

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const},$$

где  $p$  – статическое давление,  $\rho gh$  – гидростатическое давление,  $\frac{\rho v^2}{2}$  – динамическое давление.

**Уравнение Бернулли** выражает, что сумма статического, гидростатического и динамического давлений остается неизменной вдоль всей трубы.



1. Выражение  $\frac{\rho v^2}{2}$  имеет физический смысл кинетической энергии единичного объема жидкости и его называют **объемной плотностью кинетической энергии**.

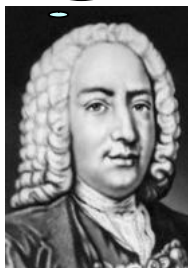
2. Выражение  $\rho gh$  имеет физический смысл потенциальной энергии единичного объема жидкости в поле силы тяжести и его называют **объемной плотностью потенциальной энергии**.

В частности, для горизонтально расположенной трубы ( $h_1 = h_2$ ) уравнение Бернулли принимает вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$



Закон Бернулли объясняет действие пульверизатора: прогоняя воздух из груши над поверхностью жидкости, мы уменьшаем давление в этом потоке. А это приводит к подъему капель жидкости и попаданию их в горизонтальную струю воздуха. На этом же принципе работают инъекционные насосы: пропуская воду с большой скоростью из водопроводного крана через такой насос, мы можем откачивать воздух из нужного объема. На этом принципе работает карбюратор двигателей внутреннего сгорания. Подъемная сила крыла самолета также обусловлена разностью скоростей потока воздуха над и под крылом самолета.



### Бернулли (Bernoulli) Даниил (29.I.1700–17.III.1782)

Швейцарский математик и механик. В 1725–33 работал в Петербургской АН сначала на кафедре физиологии, а затем механики. Впоследствии состоял почетным членом Петербургской АН, опубликовал (с 1728–78) в ее изданиях 47 работ. Профессор в Базеле по физиологии (1733) и по механике (1750). В математике Бернулли принадлежат: метод численного решения алгебраических уравнений с помощью возвратных рядов, работы по обыкновенным дифференциальным уравнениям, по теории вероятностей с приложением к статистике народонаселения и, отчасти, к астрономии, по теории рядов. В работах, завершенных написанным в Петербурге трудом «Гидродинамика» (1738), вывел основное уравнение стационарного движения идеальной жидкости, носящее его имя. Также разрабатывал кинетические представления о газах.

Для измерения давления можно использовать жидкостный манометр Торричелли или более современные манометры. Но при измерении давления в потоке важно расположение входного отверстия манометра.

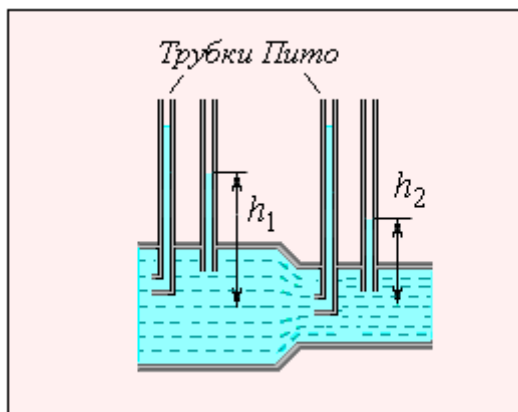


Рис. 8

Трубки Пито

Если плоскость входного сечения манометра расположена параллельно скорости потока (рис. 8), то манометр Торричелли будет показывать гидростатическое давление:  $p = p_0 + \rho gh$ . Если же плоскость входного сечения расположена перпендикулярно скорости набегающего потока (рис. 8), то в трубке манометра поток будет тормозиться, и измеряемое давление будет равно полному давлению:  $p = p_0 + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2}$ .

Такой манометр называется трубкой Пито. В его показаниях присутствует дополнительный член, называемый гидродинамическим напором, и равный плотности кинетической энергии потока. Из рисунка 8 видно, что манометры, имеющие сечение, параллельное скорости потока, показывают разное статическое давление: чем больше сечение трубы, тем меньше скорость потока и, согласно уравнению Бернулли, тем больше статическое давление. А вот динамическое давление, которое показывают трубки Пито, - одинаково. С помощью трубки Пито можно определить скорость течения или же скорость катера. При небольших скоростях воздух тоже можно считать несжимаемой жидкостью. В этом случае трубка Пито позволяет определить скорость ветра или скорость самолета.

Статическое давление в жидкости может быть измерено с помощью манометра, перемещающегося вместе с жидкостью. Практически давление в разных сечениях трубы измеряется с помощью манометрических трубок, вставленных через боковые стенки в поток жидкости, так чтобы нижние концы трубок были перпендикулярны скоростям частиц жидкости (рис. 9).

Из уравнения Бернулли следует: давление в жидкости, текущей по горизонтальной трубе переменного сечения, больше в тех сечениях потока, в которых скорость ее движения меньше, и наоборот, давление меньше в тех сечениях, в которых скорость больше.

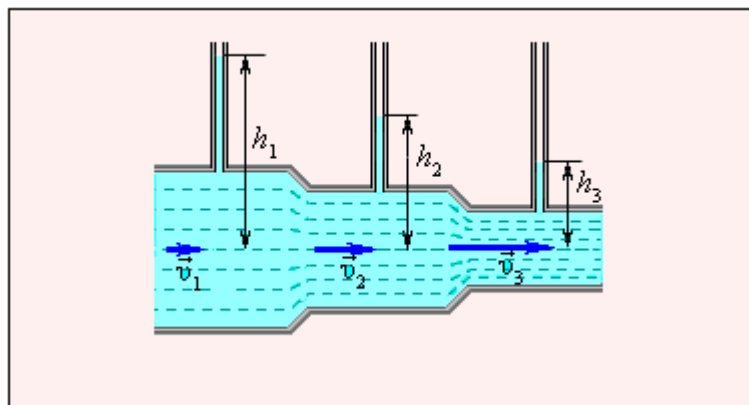


Рис.9

Измерение давления в потоке жидкости с помощью манометров.

Если сечение потока жидкости достаточно велико, то уравнение Бернулли следует применять к линиям тока, то есть линиям, вдоль которых перемещаются частицы жидкости при стационарном течении. Например, при истечении идеальной несжимаемой жидкости из отверстия в боковой стенке или дне широкого сосуда линии тока начинаются вблизи свободной поверхности жидкости и проходят через отверстие (рис. 10).

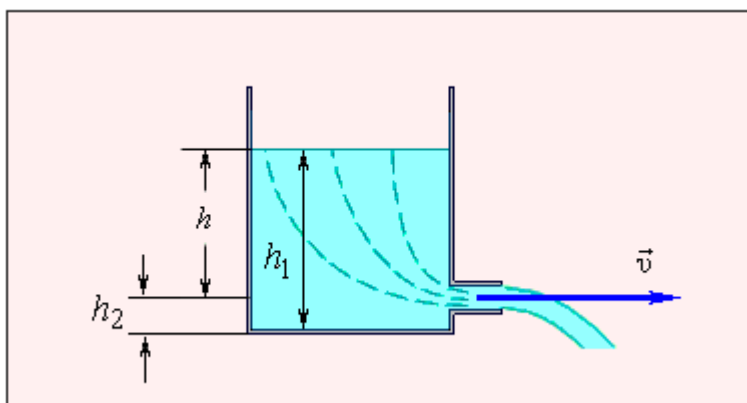


Рис. 10

Истечение жидкости из широкого сосуда.

Уравнение Бернулли для двух сечений (на уровне  $h_1$  свободной поверхности жидкости в сосуде и на уровне  $h_2$  выхода ее из отверстия):

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2,$$

где  $p_1 = p_2$  (атмосферное давление). Тогда

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2.$$

Из уравнения неразрывности  $S_1 v_1 = S_2 v_2$ , если  $S_1 \gg S_2$ , то членом  $v_1^2$  можно пренебречь, тогда

$$v_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh,$$

откуда

$$v = \sqrt{2gh}$$

Это выражение для скорости истечения называют **формулой Торричелли**. Скорость истечения идеальной жидкости из отверстия в сосуде такая же, как и при свободном падении тела с высоты  $h$  без начальной скорости.

Историческая справка



**Торричелли** (Torricelli) Эванджелиста (15.X.1608–25.X.1647)

Итальянский математик и физик. Получил математическое образование в Риме под руководством ученика Г. Галилея – Б. Кастелли. В 1641 переехал в Арчетри, где помогал Галилею в обработке его трудов. С 1642, после смерти Галилея, придворный математик великого герцога Тосканского и одновременно профессор математики Флорентийского университета. Наиболее известны труды Торричелли в области пневматики и механики. В 1644 развил теорию атмосферного давления, доказал возможность получения так называемой торричеллиевой пустоты и изобрел ртутный барометр. В основном труде по механике «О движении свободно падающих и брошенных тяжелых тел» (1641) развивал идеи Галилея о движении, сформулировал принцип движения центров тяжести, заложил основы гидравлики, вывел формулу для скорости истечения идеальной жидкости из сосуда. Торричелли принадлежат также работы по баллистике, усовершенствованию оптических приборов, шлифовке линз.

В отличие от жидкостей, газы могут сильно изменять свой объем. Расчеты показывают, что сжимаемостью газов можно пренебречь, если наибольшие скорости в потоке малы по сравнению со скоростью звука в этом газе. Таким образом, уравнение Бернулли можно применять к достаточно широкому классу задач аэродинамики.

Одной из таких задач является изучение сил, действующих на крыло самолета. Строгое теоретическое решение этой задачи чрезвычайно сложно, и обычно для исследования сил применяются экспериментальные методы. Уравнение Бернулли позволяет дать лишь качественное объяснение возникновению подъемной силы крыла. На рис. 11 изображены линии тока воздуха при обтекании крыла самолета. Из-за специального профиля крыла и наличия угла атаки, то есть угла наклона крыла по отношению к набегающему потоку воздуха, скорость воздушного потока над крылом оказывается больше, чем под крылом. Поэтому на рис. 11 линии тока над крылом располагаются ближе друг к другу, чем под крылом. Из уравнения Бернулли следует, что давление в нижней части крыла будет больше, чем в верхней; в результате появляется сила  $\vec{F}$  действующая на крыло. Вертикальная составляющая  $\vec{F}_y$  этой силы называется **подъемной силой**. Подъемная сила позволяет скомпенсировать силу тяжести, действующую на самолет, и тем самым она обеспечивает возможность полета тяжелых



летательных аппаратов в воздухе. Горизонтальная составляющая  $\vec{F}_x$  представляет собой силу **сопротивления** среды.

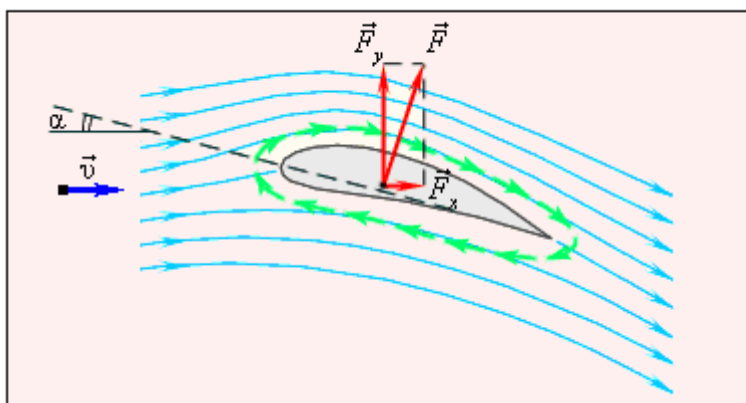
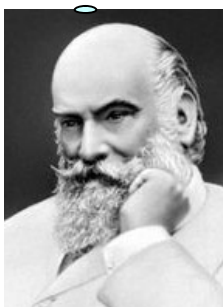


Рис. 11

Линии тока при обтекании крыла самолета и возникновение подъемной силы.  $\alpha$  – угол атаки.

Теория подъемной силы крыла самолета была создана Н. Е. Жуковским. Он показал, что существенную роль при обтекании крыла играют силы вязкого трения в поверхностном слое. В результате их действия возникает круговое движение (**циркуляция**) воздуха вокруг крыла (зеленые стрелки на рис. 11). В верхней части крыла скорость циркулирующего воздуха складывается со скоростью набегающего потока, в нижней части эти скорости направлены в противоположные стороны. Это и приводит к возникновению разности давлений и появлению подъемной силы.

#### Историческая справка



**Жуковский Николай Егорович** (5.I.1847–17.III.1921).

Русский ученый в области механики, основоположник современной гидроаэродинамики. Жуковский является автором многочисленных оригинальных исследований в области механики твердого тела, астрономии, математики, гидродинамики и гидравлики, прикладной механики, теории регулирования машин и др. Для его работ характерно сочетание глубоких теоретических изысканий с инженерным подходом к решению технических задач. Он был также автором классических учебников по теоретической механике для университетов и технических вузов.

Циркуляция воздуха, обусловленная силами вязкого трения, возникает и вокруг вращающегося тела (например, цилиндра). При вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха, вызывая его циркуляцию. Если такой цилиндр установить в набегающем потоке воздуха, то возникнет сила бокового давления, аналогичная подъемной силе крыла самолета. Это



явление называется **эффектом Магнуса**. Рис. 12 иллюстрирует обтекание вращающегося цилиндра набегающим потоком. Эффект Магнуса проявляется, например, при полете закрученного мяча при игре в теннис или футбол.

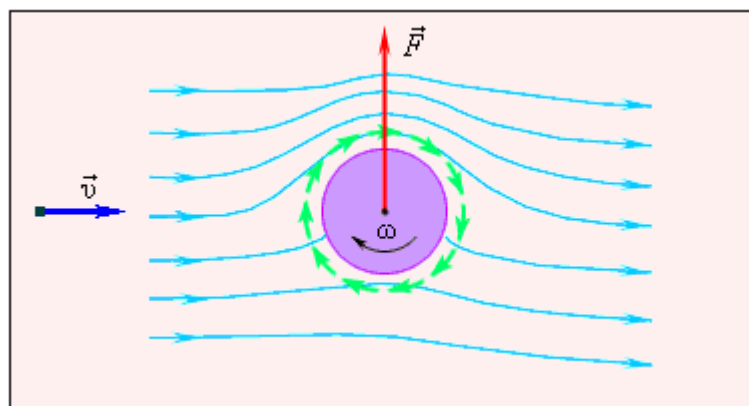


Рис. 12

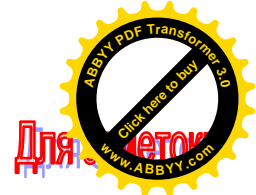
Обтекание вращающегося цилиндра набегающим потоком воздуха.

Итак, во многих явлениях аэродинамики существенную роль играют силы вязкого трения. Они приводят к возникновению циркулирующих потоков воздуха вокруг крыла самолета или вокруг вращающегося тела, к появлению силы сопротивления среды и т. д. Уравнение Бернулли не учитывает сил трения. Его вывод основан на законе сохранения механической энергии при течении жидкости или газа. Поэтому с помощью уравнения Бернулли нельзя дать исчерпывающего объяснения явлений, в которых проявляются силы трения. В этих случаях можно руководствоваться только качественными соображениями – чем больше скорость, тем меньше давление в потоке газа.

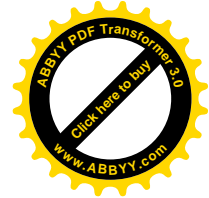
Особенно заметно проявляются силы вязкого трения при течении жидкостей. У некоторых жидкостей вязкость настолько велика, что применение уравнение Бернулли может привести к качественно неверным результатам. Например, при истечении вязкой жидкости через отверстие в стенке сосуда ее скорость может быть в десятки раз меньше рассчитанной по формуле Торричелли. При движении сферического тела в идеальной жидкости оно не должно испытывать лобового сопротивления. Если же такое тело движется в вязкой жидкости, то возникает сила сопротивления, модуль которой пропорционален скорости  $v$  и радиусу сферы  $r$  (**закон Стокса**)

$$\vec{F}_{\text{comp}} \sim v \cdot r$$

Поэтому, если тяжелый шарик бросить в высокий сосуд, наполненный вязкой жидкостью (например, глицерином), то через некоторое время скорость шарика достигнет установившегося значения, которое не будет изменяться при дальнейшем движении шарика. При движении с установившейся скоростью силы, действующие на шарик (сила тяжести  $m\vec{g}$  выталкивающая сила  $\vec{F}_A$  и сила сопротивления среды  $\vec{F}_{\text{comp}}$ ), оказываются скомпенсированными, и их равнодействующая равна нулю.



## 4. Вопросы



1. Объясните, в чем отличие гидромеханики и гидравлики.
2. Дайте определение давления.
3. В чем состоит принцип работы барометра Торричелли, его применение.
4. Перечислите основные свойства жидкостей и охарактеризуйте каждое из них.
5. Сформулируйте и поясните закон Паскаля и Архимеда.
6. Сформулируйте закон сообщающихся сосудов и его применение в технике.
7. Запишите уравнение Бернулли и поясните физический смысл входящих в него величин.
8. Какую физическую величину можно определить с помощью трубки Пито.
9. Запишите формулу Торричелли и поясните ее физический смысл.
10. Поясните явление «эффект Магнуса»

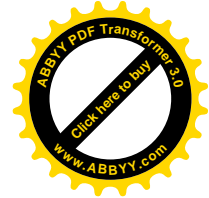
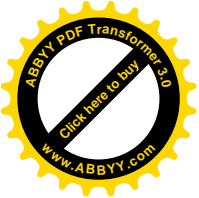
*Литература*



1. Грабовский, Р.И. Курс физики: учеб. пособие для студентов сельскохозяйственных институтов/ Р.И. Грабовский. – СПб.: Лань, 2005. – 608с.
2. Ремизов, А.Н. Медицинская и биологическая физика: учебник для мед. вузов/ А.Н. Ремизов. - М.: Высшая школа, 1999. – 616с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебник для высш. учеб. заведений/ Т.И. Трофимова. - М.: Высшая школа, 2002. – 430с.
4. Куприн, М.Я. Физика в сельском хозяйстве: книга для учащихся/ М.Я. Куприн. - М.: Просвещение, 1985. – 144с.

Елена Георгиевна Баленко

Татьяна Юрьевна Тарусова



Рабочая тетрадь по теме «Элементы механики жидкостей и газов». Рабочая тетрадь предназначена для организации самостоятельной работы студентов ДонГАУ всех специальностей, изучающих курс физики. – пос. Персиановский, ДонГАУ, 2011 –29 с.

Учебно-методическое издание

Под редакцией авторов

Компьютерная верстка:

Донской государственный аграрный университет  
346493, пос. Персиановский, Октябрьский район, Ростовская обл.