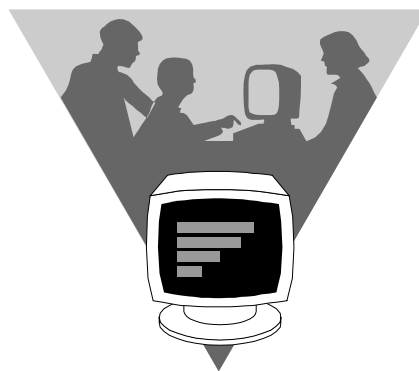
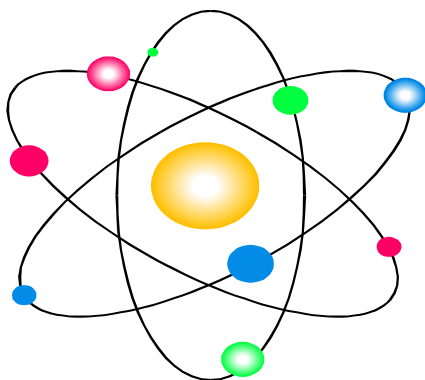


Министерство образования и науки Хабаровского края

Краевое государственное бюджетное образовательное учреждение
дополнительного образования
«Хабаровский краевой центр развития творчества детей и юношества»

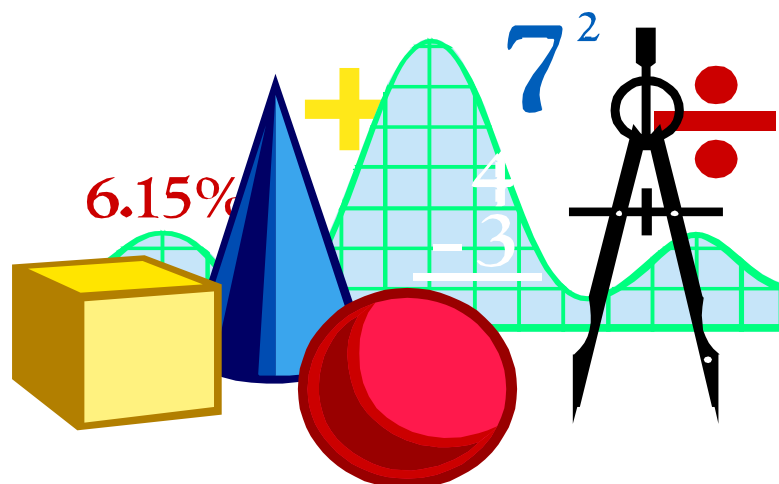
Хабаровская краевая заочная физико-математическая школа



А.В. Гаврилов, Л.В. Горбанева, А.Ф. Немцев

**ФИЗИКА:
МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ УЧАСТНИКОВ ЛЕТНЕЙ (ОЧНОЙ) СЕССИИ**

ВЫПУСК 10



Хабаровск, 2016

ФИЗИКА: методическое пособие для учащихся летней (очной) сессии / А.В. Гаврилов, Л.В. Горбанева, А.Ф. Немцев. – Хабаровск: КГБОУ ДО ХКЦРТДиЮ, 2016. – 46 с.

Публикуемые в настоящем сборнике методические материалы разработаны для реализации программы летней (очной) сессии Хабаровской краевой заочной физико-математической школы.

СОДЕРЖАНИЕ

Гаврилов А.В. Избранные задачи геометрической оптики	4
1. Понятие геометрической оптики, законы.....	4
2. Оптические системы	12
2.1. Зеркало-прозрачная пластина	13
2.2. Линза-зеркало	13
2.3. Система линз.....	14
Задачи для самостоятельного решения.....	15
 Горбанева Л.В. Элементы гидро- и аэродинамики	22
Основные положения гидро- и аэродинамики.....	23
Задачи для самостоятельного решения.....	32
 Немцев А.Ф. Решение задач на расчет тепловых процессов	35
1. Три группы задач об изменении внутренней энергии тел.....	38
2. Основные физические законы и формулы	40
Примеры решения задач.....	41

ИЗБРАННЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

1. Понятие геометрической оптики, законы

Геометрическая оптика – это раздел оптики, изучающий законы распространения света в прозрачных средах и отражения света от зеркальных или полупрозрачных поверхностей.

Основные законы геометрической оптики:

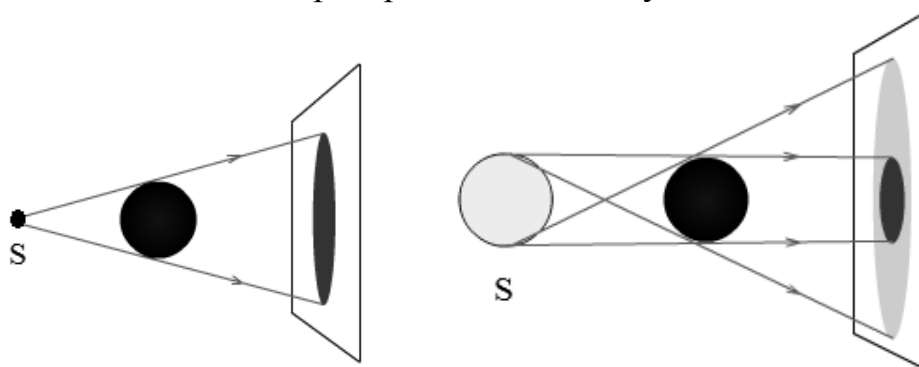
1. Закон прямолинейного распространения света.
2. Закон независимости световых пучков.
3. Закон отражения света.
4. Закон преломления света.

1. Закон прямолинейного распространения света

Согласно этому закону свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.

Прямолинейностью распространения света в однородной среде объясняется формирование тени. Тень – это область пространства за непрозрачным объектом, в которую свет не попадает. Форма резкой тени на экране подобна форме некоторого сечения предмета, параллельного плоскости экрана; размеры же тени обусловлены взаимным размещением и размерами источника, объекта и экрана.

В случае источников малых размеров (точечный источник света) на экране образуется резкая тень, в случае протяженных – тень, обрамленная частично освещенной областью пространства, т.е. полутенью.



Объяснение закону прямолинейного распространения света дает принцип Ферма. Согласно этому принципу, в пространстве между двумя точками свет идет по такому пути, вдоль которого время его прохождения минимально. В однородной среде скорость света есть величина постоянная. Следовательно, наименьшее время прохождения светом расстояния между двумя точками совпадает с движением по самому короткому расстоянию между ними, т.е. по прямой линии.

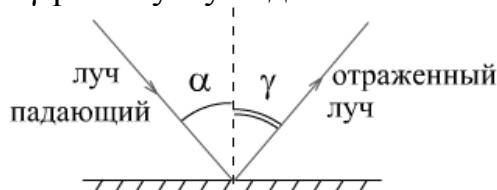
2. Закон независимости световых пучков

Эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены. Если световые лучи пересекаются, то они не оказывают никакого влияния друг на друга. Каждый луч освещает пространство так, как если бы других лучей вообще не было.

3. Закон отражения света

1. Падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (плоскости падения).

2. Угол отражения γ равен углу падения α .

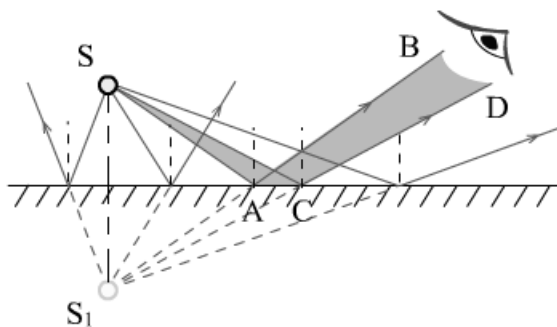


В зависимости от свойств, границы раздела двух сред выделяют зеркальное и диффузное отражение. Если поверхность, на которую падает свет, имеет размер неоднородностей меньше длины световой волны, то отражение будет **зеркальным**.

Лучи света, падающие на такую поверхность узким параллельным пучком, идут после отражения также параллельным пучком.

Если же размеры неровностей больше длины волны света, то узкий пучок рассеивается на поверхности. После отражения световые лучи идут по всевозможным направлениям. Такое отражение называют **рассеянным**, или **диффузным**. Именно благодаря диффузному отражению света мы можем видеть предметы, которые сами не излучают свет. В малой степени рассеяние света имеет место при его отражении даже от самой гладкой поверхности, например от обычного зеркала.

Законы прямолинейного распространения и отражения света находят применение при построении изображений в зеркалах.

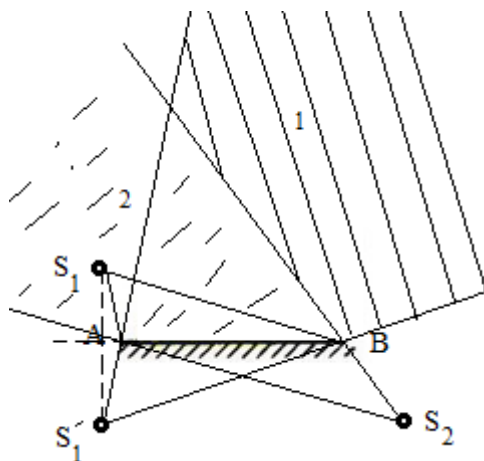
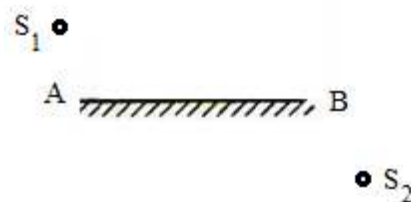


Пусть светящаяся точка находится перед плоским зеркалом. Для построения его изображения в зеркале рассмотрим несколько лучей, выходящих из точки S и попадающих после отражения в глаз наблюдателя.

Наблюдателю кажется, что лучи выходят из точки S_1 , которую можно найти, продолжив лучи в противоположную сторону до пересечения. Точка S_1 поэтому будет являться изображением точки S в плоском зеркале. Это изображение называется мнимым, так как в точке S_1 пересекаются не сами отраженные лучи, а их продолжения. Используя теоремы геометрии, можно доказать, что расстояние от источника S до зеркала и расстояние от зеркала до изображения S_1 равны между собой, поэтому для нахождения изображения

точки достаточно опустить из нее на зеркало или на его продолжение перпендикуляр и продлить его на такое же расстояние за зеркало.

Задача 1. На рисунке показаны два точечных источника света S_1, S_2 и плоское зеркало AB . Определите путем построения область, из которой можно наблюдать максимальное число источников света в данной системе.



Решение. Максимальное число источников света, которые можно одновременно наблюдать в системе, – три: это два действительных источника S_1, S_2 и один мнимый S_1' , являющийся отражением в зеркале источника S_1 . Области, из которых можно видеть эти источники, определяются пучками лучей, образующих эти изображения. Область, из которой можно наблюдать мнимый источник, ограничена лучами, касающимися краев зеркала. В любой точке пространства,

лежащей над зеркалом, будет наблюдаться источник S_1 .

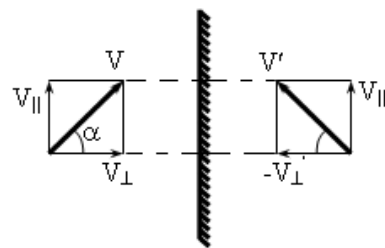
Источник S_2 лежит ниже плоскости зеркала, соответственно, он будет затеняться им и в области 2 наблюдаться не будет. Таким образом, одновременно все три источника можно будет наблюдать из области 1.

Задача 2. Человек идет со скоростью V по прямой, образующей угол α с плоскостью зеркала. С какой скоростью приближается он к своему изображению?

Решение. Разложим вектор скорости человека на две составляющие: одну – параллельную зеркалу $V_{\parallel}$, другую – перпендикулярную $V_{\perp}$ (рис.). Скорость, с которой человек приближается к своему изображению, очевидно, будет равна

$$V_{\text{отн } \perp} = V_{\perp} - (-V_{\perp}') = 2V_{\perp} = 2V \cos \alpha.$$

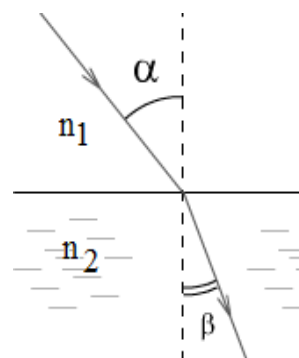
$$\text{Значит, } V_{\text{отн}} = 2V \cos \alpha.$$



4. Закон преломления света

1. Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

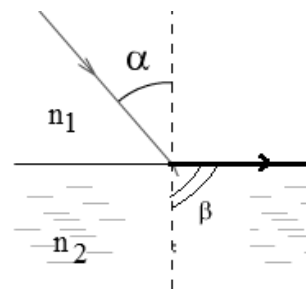
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред.



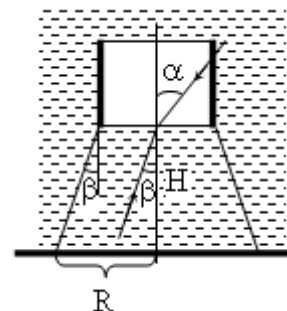
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

При малых углах падения можно использовать приближение $\sin \alpha \approx \alpha$ и $\sin \beta \approx \beta$ и $\frac{\alpha}{\beta} = n$

Особый случай составляет явление полного внутреннего отражения, наблюдаемое при переходе луча из среды оптически более плотной (с большим показателем преломления) в среду оптически менее плотную (с меньшим показателем преломления) $n_1 > n_2$ (рис.). Тот минимальный угол падения луча α_0 , при котором угол преломления β будет равен 90° , называют предельным углом полного внутреннего отражения. И тогда, так как $\sin \beta = 1$, $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$.



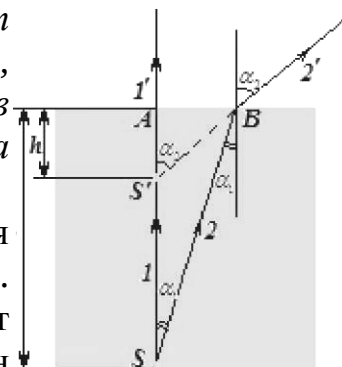
Задача 3. В днище судна сделан стеклянный иллюминатор для наблюдения за морскими животными. Диаметр иллюминатора $d=40$ см. Какова площадь обзора дна из такого иллюминатора, если показатель преломления морской воды 1,4, показатель преломления стекла иллюминатора 1,6, расстояние от днища судна до дна 5 м. Толщиной стекла иллюминатора можно пренебречь.



Решение. Наблюдатель внутри корабля увидит только те лучи, которые не испытывают полного внутреннего отражения. Для таких лучей выполняется соотношение $\sin \alpha < 1/n$; (если $\sin \alpha > 1/n$, такой луч испытывает полное внутреннее отражение и к наблюдателю не попадет). За пределами корабля в воде тогда должно выполняться соотношение: $n_v \sin \beta = n \sin \alpha$ или $\sin \beta = \frac{n}{n_v} \sin \alpha$. Так как $\sin \alpha < 1/n$, то $\sin \beta < 1/n_v$. То есть наблюдатель сможет увидеть только те лучи, свет от которых попадает на иллюминатор под углом падения β . Тогда радиус круга на дне, доступного наблюдению, будет равен приблизительно $R = \frac{d}{2} + H \tan \beta \approx H \tan \beta$, так как $H \gg d$, и $S = \pi R^2 \approx 75 \text{ м}^2$.

Задача 4. На дне водоема глубиной H лежит монетка. Наблюдатель разглядывает монетку, расположившись на одной вертикали с монеткой в непосредственной близости от поверхности воды. На каком расстоянии h он видит монетку?

Решение. Лежащая на дне монетка является объектом, диффузно отражающим падающий на него свет. Рассмотрим ход двух лучей (рис.) 1 и 2. Луч 1 падает перпендикулярно границе раздела вода-воздух, поэтому он не преломляется. Луч 2, переходя в оптически менее плотную среду, отклоняется от перпендикуляра к границе раздела вода-воздух.



Мнимые продолжения преломленных лучей 1' и 2' пересекаются в точке S' – это кажущееся положение монетки. Найдем положение этой точки. Рассмотрим треугольники ABS и ABS':

$$AB = AS \operatorname{tg} \alpha_1 = H \operatorname{tg} \alpha_1 \text{ и } AB = AS' \operatorname{tg} \alpha_2 = h \operatorname{tg} \alpha_2, \text{ или } H \operatorname{tg} \alpha_1 = h \operatorname{tg} \alpha_2$$

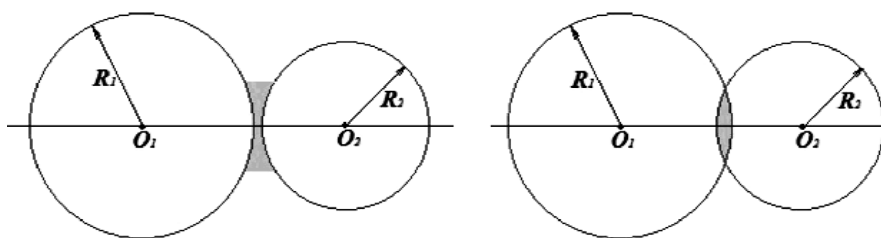
Поскольку размер зрачка мал, попадающие в глаз человека лучи расходятся под маленькими углами. Для малых углов $\operatorname{tg} a \approx \sin a \approx a$ рад.

$$\text{В итоге получаем, что } h = \frac{H}{n}$$

Особое применение закон преломления света находит при построении изображений в линзах.

Линза – прозрачное тело, ограниченное пересекающимися криволинейными поверхностями.

Если поверхности имеют форму сферы – линзы сферические, если цилиндрические поверхности – цилиндрические, и т.д. Мы в дальнейшем будем рассматривать только сферические линзы.



Прямая, на которой расположены центры кривизны сферических поверхностей, называется **главной оптической осью линзы**.

Линза называется **тонкой**, если расстоянием от точек входа и выхода луча из линзы можно пренебречь. Данное условие выполняется, если расстояние между преломляющими поверхностями линзы мало. В этом случае можно считать, что линза пересекает главную оптическую ось лишь в одной точке O, называемой **оптическим центром линзы**. Любая прямая, не совпадающая с главной оптической осью линзы и проходящая через ее оптический центр, называется **побочной оптической осью**.

Для сферической поверхности, выпуклой относительно главной плоскости линзы, радиус кривизны считается положительным. Для сферической поверхности, вогнутой относительно главной плоскости линзы, радиус кривизны считается отрицательным.

Точка, в которой собираются световые лучи (или их продолжения) после прохождения через линзу, называется **фокусом линзы**. Плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью**. Каждая линза имеет два фокуса: передний и задний, – соответственно, имеется две фокальные плоскости: передняя и задняя. Расстояние от линзы до фокуса – **фокусное расстояние**.

Величина, обратная фокусному расстоянию, – оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}, \text{ дптр.}$$

Если известны радиусы кривизны и относительный показатель преломления вещества линзы, фокусное расстояние можно определить по формуле

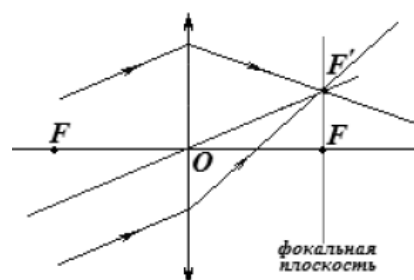
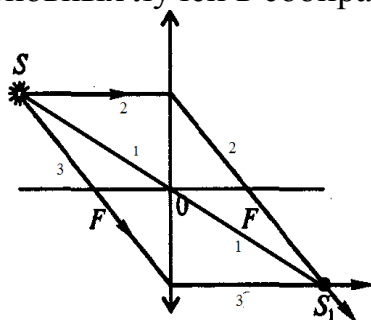
$$D = \frac{1}{F} = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

В зависимости от значения относительного показателя преломления и знаков радиусов кривизны, световые лучи, параллельные главной оптической оси, могут после прохождения через линзу отклоняться к оси или от нее. В первом случае линза называется **собирающей** (положительной, $D > 0$), во втором – **рассеивающей** (отрицательной, $D < 0$).

Для построения изображений в тонких линзах полезно запомнить ход следующих лучей:

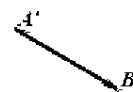
- Луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется, т.е. не меняет направления своего распространения.
- Лучи, идущие параллельно главной оптической оси, после преломления в линзе проходят через фокус (или рассеиваются так, как будто вышли из фокуса).
- Луч, прошедший через фокус линзы, после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси.
- Лучи, идущие параллельно побочной оптической оси, после преломления в линзе пересекают побочную ось в фокальной плоскости.

Ход основных лучей в собирающей линзе



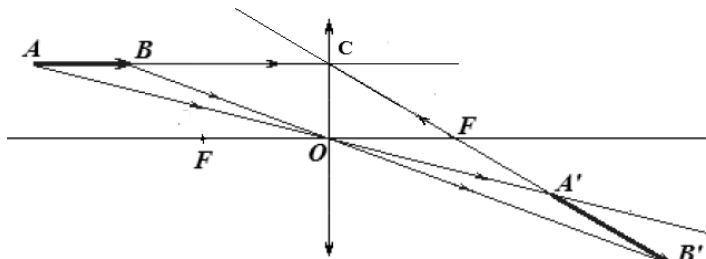
Зная ход лучей в линзах, положение предмета и его изображения, можно восстановить положение линзы.

Задача 5. По предмету AB и его изображению определите положение линзы и ее фокусов.



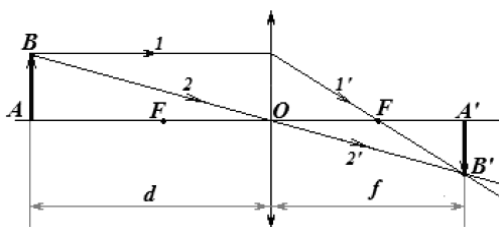
Решение. Соединим прямыми точки A и A' , точки B и B' . Точка пересечения этих прямых – оптический центр линзы O . Проведем прямые AB и $A'B'$ до пересечения в точке C . Плоскость линзы проходит через прямую CO .

Проведем через точку O прямую, перпендикулярную CO , – это главная оптическая ось линзы. Точка пересечения главной оптической оси с прямой $A'B'$ – задний фокус линзы. На расстоянии OF отметим слева от плоскости линзы точку – это передний фокус линзы.



Если обозначить расстояние от источника света (или предмета) до линзы d , расстояние от линзы до изображения f , фокусное расстояние линзы F (рис.), то связь между этими расстояниями устанавливает формула тонкой линзы:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}.$$



При расстановке знаков в формуле тонкой линзы руководствуются правилом: если расстояние отсчитывается по ходу распространения световых лучей – соответствующая величина входит в формулу со знаком плюс, если расстояние отсчитывается против хода световых лучей – со знаком минус. Можно запомнить, что:

а) F и D положительны для собирающей линзы (действительный фокус) и отрицательны для рассеивающей линзы (мнимый фокус);

б) $f > 0$ для действительного изображения, $f < 0$ для мнимого изображения;

в) $d > 0$ для действительного источника, $d < 0$ для мнимого источника.

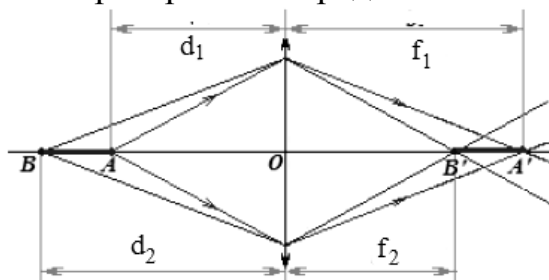
Размер изображения, получаемого в тонкой линзе предмета, в общем случае не совпадает с размером самого предмета. Отношение размеров изображения к изображению предмета называется увеличением тонкой линзы. Выделяют поперечное (линейное) и продольное увеличение.

Поперечное (линейное) увеличение – отношение длины сформированного оптической системой изображения отрезка, перпендикулярного оси оптической системы, к длине самого отрезка. Если изображение прямое, говорят о положительном линейном увеличении, если перевернутое – об отрицательном линейном увеличении.

По определению, поперечное увеличение $\Gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{H}{h}$. Используя подобия треугольников и формулу тонкой линзы, можно показать, что

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{f - F}{F} = \frac{F}{d - F}$$

Продольное увеличение – отношение длины достаточно малого отрезка, лежащего на оси оптической системы в пространстве изображений, к длине сопряженного с ним отрезка в пространстве предметов.



$$\Gamma_{12} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{f_1 - f_2}{d_2 - d_1} = \frac{f_1}{d_1} \frac{f_2}{d_2} = \Gamma_1 \Gamma_2$$

Если длины отрезков малы, то $\Gamma_1 \approx \Gamma_2 = \Gamma$ и $\Gamma_{12} = \Gamma^2$

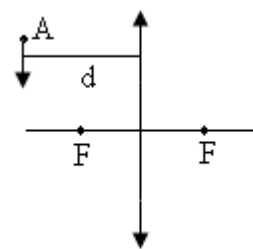
Задача 6. На линзу падает сходящийся пучок лучей. После прохождения через линзу лучи пересекаются в точке, лежащей на расстоянии 15 см от линзы. Если линзу убрать, точка пересечения лучей переместится на 5 см ближе к линзе. Определите фокусное расстояние линзы.

Решение. Так как на линзу падает сходящийся пучок лучей, то источник мнимый, и формула тонкой линзы в данном случае имеет вид

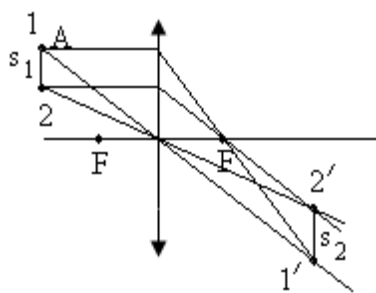
$$\frac{1}{F} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

где $d = 10$ см (мнимый источник), $f = 15$ см (действительное изображение). Получаем $F = -30$ см. Поскольку тип линзы не был задан, правую часть формулы мы написали с плюсом, а по знаку ответа установили, что линза рассеивающая.

Задача 7. Точка A движется в направлении, перпендикулярном главной оптической оси собирающей линзы, с постоянной скоростью 4 см/с. С какой скоростью движется ее изображение, если $d = 0,18$ м, а фокусное расстояние линзы 0,1 м?



Решение. Рассмотрим два последовательных положения точки через промежуток времени $\Delta t = 1$ с. Путь, проходимый точкой



в единицу времени, численно равен ее скорости. Отношение путей, проходимых изображением точки в линзе и самой точкой, равно увеличению изображения отрезка S_1 .

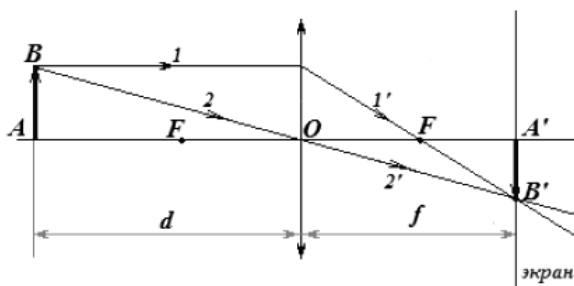
$\frac{v_2}{v_1} = \frac{S_2}{S_1} = Y$, где Y – увеличение линзы. Увеличения

тонкой линзы $Y = \frac{F}{d - F}$ и скорость движения

изображения точки $v_2 = v_1 \frac{F}{d - F} = 5$ см/с

Задача 8. Расстояние между точечным источником света и экраном равно L . Линза, помещенная между ними, дает четкое изображение при двух положениях, расстояние между которыми равно l . Определите фокусное расстояние линзы.

Решение. На экране можно получить только действительное изображение. В свою очередь, действительное изображение предмета может быть получено только при помощи собирающей линзы, при этом предмет и изображения находятся по разные стороны линзы.



Записываем уравнение тонкой линзы и находим f .

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad f = \frac{Fd}{d - F}$$

По условию $L = d + f = d + \frac{Fd}{d - F}$

Преобразуя выражение, получаем квадратное уравнение $d^2 - dL + FL = 0$.

Решая его относительно d , получаем корни

$$d_1 = \frac{L^2 + \sqrt{L^2 - 4FL}}{2} \quad d_2 = \frac{L^2 - \sqrt{L^2 - 4FL}}{2}$$

$$l = d_1 - d_2 = \sqrt{L^2 - 4FL} \quad F = \frac{L^2 - l^2}{4L}$$

Задача 9. Перед тонкой собирающей линзой поместили предмет, в результате такого размещения увеличение получилось равным 2. Когда предмет передвинули относительно линзы, увеличение стало равно 10. Определить, на сколько передвинули предмет и в каком направлении, если первоначальное расстояние от линзы до предмета составляло 6 сантиметров.

Решение. Запишем формулу для увеличения $\Gamma = \frac{H}{h}$ и формулу тонкой линзы $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ $\Gamma = \frac{f_1}{d_1}$. Откуда $f_1 = \Gamma_1 d_1$ $\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{\Gamma_1 d_1}$. Для второго расположения предмета

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{\Gamma_2 d_2} \quad \Delta d = d_1 - d_2 = 1,6 \text{ см}$$

2. Оптические системы

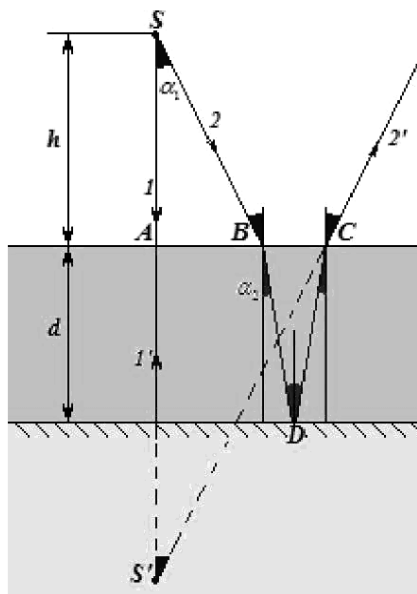
Под **оптической системой** будем понимать совокупность оптических элементов (преломляющих, отражающих и т. п.), предназначенную для преобразования световых пучков. Физически *оптическая система* – это набор оптических деталей (линз, призм, зеркал и других элементов), определенным образом расположенных в пространстве относительно друг друга.

2.1. Зеркало-прозрачная пластина

Особенность данной системы рассмотрим на примере решения конкретной задачи.

Задача 10. Горизонтальное дно сосуда является плоским зеркалом. В сосуд налита вода, толщина слоя которой $d = 12$ см. Человек разглядывает свое изображение в зеркале, расположив лицо на расстоянии $h = 15$ см от поверхности воды. Определите расстояние между лицом человека и его изображением в зеркале. Показатель преломления воды $4/3$.

Решение. Построим ход лучей в системе. Луч 1, падающий перпендикулярно поверхности воды, не преломляется и после отражения от зеркала меняет направление на противоположное.



Луч 2 падает на поверхность воды под малым углом α_1 , преломляется, отражается от зеркала, преломляется еще раз и выходит в воздух.

В глаз человека попадают лучи 1' и 2'. Они расходятся так, как будто вышли из точки S' – изображения S в зеркале. Задача сводится к нахождению расстояния SS' между глазом человека и его изображением. В треугольнике $S'AC$ сторона AC равна $AC = AStg\alpha_1 \approx AS\alpha_1$.

Рассмотрев треугольники SAB и BCD , для стороны AC получаем:

$$AC = AB + BC = h \operatorname{tg}\alpha_1 + 2d \operatorname{tg}\alpha_2 \approx h\alpha_1 + 2d\alpha_2.$$

$$AS' = h + 2d\alpha_2/\alpha_1 = h + 2d/n.$$

С учетом того, что $\alpha_2/\alpha_1 = n$, получаем расстояние $SS' = SA + AS' = h + h + 2d/n = 2(h + d/n)$.

Подстановка численных значений дает ответ 48 см.

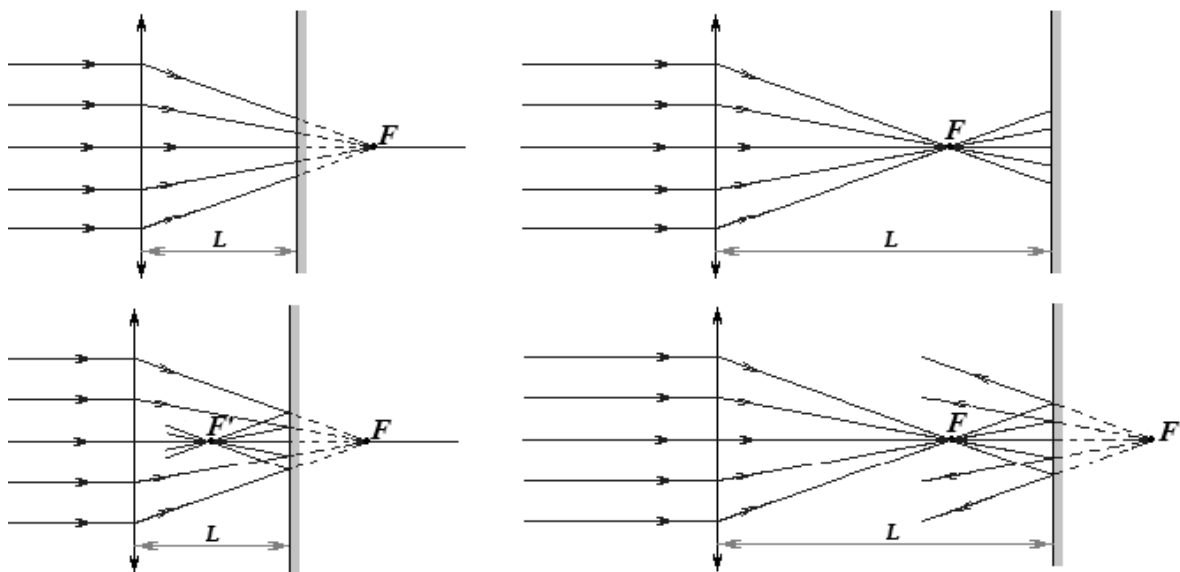
Проанализируем полученный результат. Расстояние от глаза человека до зеркала равно $(d + h)$. При отсутствии слоя воды (плоскопараллельной пластины) изображение симметрично предмету относительно зеркала, расстояние между предметом и изображением равно $2(d + h)$. Присутствие плоскопараллельной пластины приводит к «сокращению» расстояния между предметом и зеркалом и, следовательно, между предметом и изображением. Пластина «сократила» занятое ею расстояние в n (показатель преломления) раз.

2.2. Линза-зеркало

Задача 11. Плоское зеркало расположено за линзой с фокусным расстоянием F на расстоянии L от нее. Чему равно фокусное расстояние этой системы?

Решение. Построим ход лучей в системе линза-зеркало. Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в линзе должны

пройти через одну точку – фокус линзы F . Фокус линзы F является источником света для зеркала. Возможны два варианта: точка F располагается за зеркалом (в этом случае источник света для зеркала мнимый) и точка F располагается перед зеркалом (источник света для зеркала действительный).



После отражения в зеркале лучи идут так, как будто вышли из точки F' – изображения F в зеркале. Точка F' является источником света для линзы, а ее изображение в линзе F'' – фокус системы «линза-зеркало». В первом случае расстояние от F' до линзы равно $d = L - (F - L) = 2L - F$.

Во втором случае получаем тот же результат $d = L + (L - F) = 2L - F$.

Положение фокуса системы F'' находим, применяя формулу тонкой линзы:

$$f = \frac{dF}{d - F} = \frac{(2L - F)F}{2(L - F)}$$

Нетрудно видеть, что фокус системы может оказаться мнимым ($f < 0$), и система будет работать как рассеивающая линза. Это будет в случае, когда расстояние между линзой и зеркалом $F/2 < L < F$. При других положениях плоского зеркала фокус системы оказывается действительным ($f > 0$), система будет работать как собирающая линза.

2.3. Система линз

Возможны два основных варианта расположения линз: линзы вплотную прижаты друг к другу или между линзами системы есть некоторое расстояние.

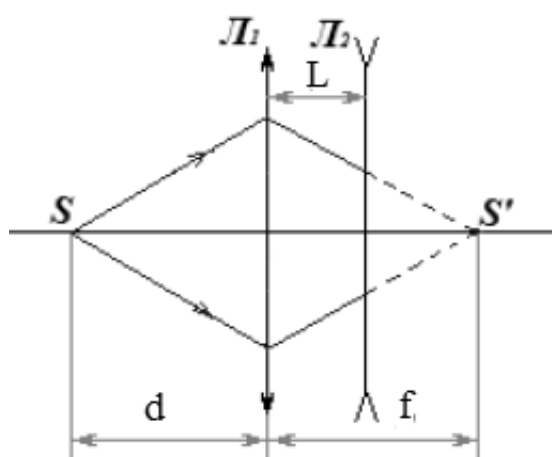
В первом случае систему линз можно заменить одной эквивалентной линзой, оптическая сила которой равна сумме оптических сил линз, образующих систему.

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n$$

Во втором случае строится изображение в первой линзе, полученное изображение является предметом для второй линзы и так далее для всех линз, образующих систему.

Задача 12. Оптическая система состоит из двух линз: собирающей с фокусным расстоянием $F_1 = 15$ см и рассеивающей с фокусным расстоянием $F_2 = -15$ см. Линзы расположены на расстоянии $L = 10$ см друг от друга. Точечный источник находится на расстоянии $d = 30$ см от первой линзы. Где находится изображение, даваемое системой линз?

Решение. Построим ход лучей в первой линзе и получим изображение S' .

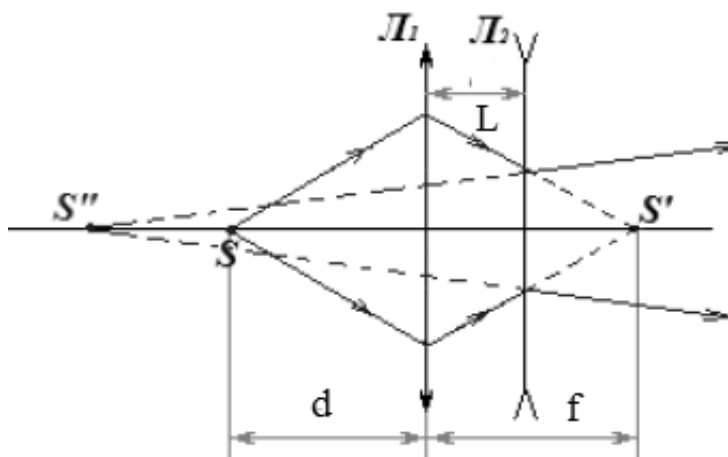


$f = \frac{F_1 d}{d - F_1} = 30$ см $f > L$, следовательно, на линзу L_2 падает сходящийся пучок света, т.е. S' является мнимым источником света для L_2 .

Расстояние источника S' до линзы L_2 равно $d_2 = f - L$. Находим изображение во второй линзе

$$-\frac{1}{F} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad f_2 = \frac{-d_2 F_2}{d_2 - F} = -60 \text{ см}$$

Расстояние f_2 отрицательное, это значит, что изображение во второй линзе мнимое, оно располагается перед линзой L_2



Для нахождения поперечного увеличения системы линз используется формула $\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2 \dots \Gamma_n$

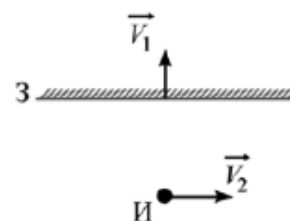
Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. Девочка разглядывает себя в витрине, находясь от нее на расстоянии 1 метра. Витрина состоит из двух стекол. Девочка видит 2 своих отражения, причем ей кажется, что размер одного изображения составляет 3/4 размера другого. Найти расстояние между стеклами витрины.

Задача № 2. В прямоугольной комнате на одной стене висит картина, а на другой – плоское зеркало (рис.). Из какой точки комнаты (А, В или С) можно полностью увидеть отражение картины в зеркале?

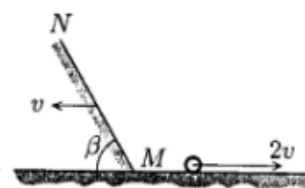


Задача № 3. По комнате движутся во взаимно перпендикулярных направлениях школьница Ирина и шкаф на колесиках, причем шкаф удаляется от Ирины. На шкафу расположено плоское зеркало, в котором Ирина видит свое отражение. Скорости шкафа и Ирины равны соответственно 1,5 м/с и 2 м/с. Найдите модуль скорости Ирины:



1) относительно зеркала, 2) относительно комнаты, 3) относительно Ирины.

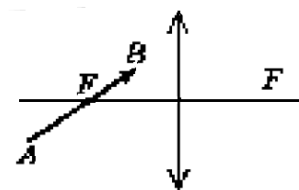
Задача № 4. Поверхность плоского зеркала MN составляет угол $\beta = 60^\circ$ с поверхностью стола. Зеркало перемещают поступательно со скоростью v вдоль стола. По столу в противоположном направлении со скоростью $2v$ катится шарик. Скорости шарика и зеркала перпендикулярны ребру двугранного угла, образованного поверхностями зеркала и стола.



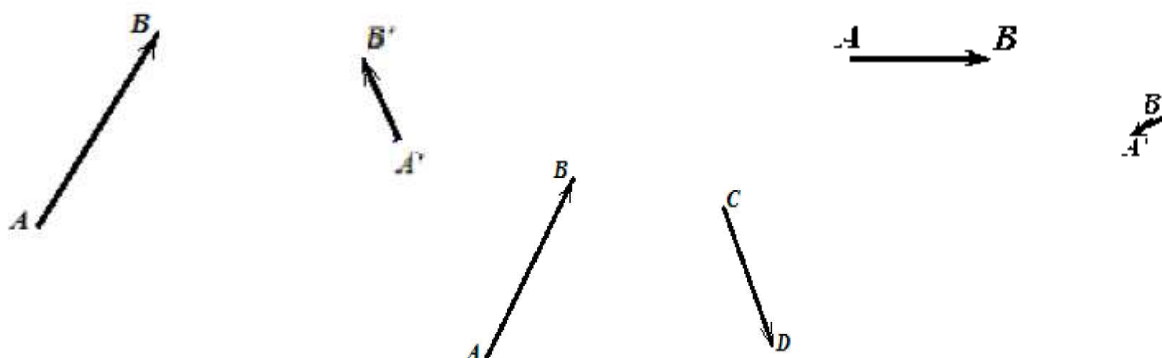
1. Найдите скорость шарика относительно зеркала и укажите ее направление.

2. С какой по модулю скоростью относительно стола перемещается отражение шарика в зеркале?

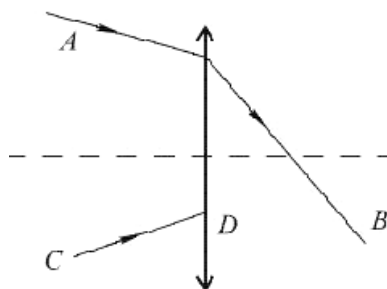
Задача № 5. Постройте изображение наклонной стрелки АВ, проходящей через фокус собирающей линзы.



Задача № 6. Используя построения хода лучей, определите положение линзы и ее фокусов для следующих рисунков:



Задача № 7. По известному ходу луча АВ через собирающую линзу постройте ход луча CD. Положение фокусов не задано.

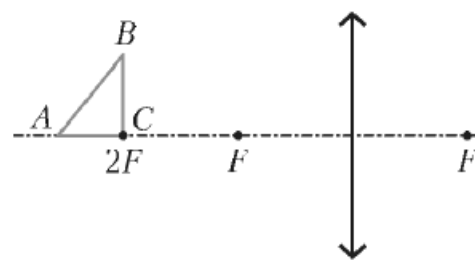


Задача № 8. Точечный источник света помещен в фокусе собирающей линзы с фокусным расстоянием 6 см. За линзой на расстоянии 12 см от нее расположен плоский экран, на котором видно круглое светлое пятно. На какое расстояние от фокуса линзы надо переместить вдоль оптической оси источник света, чтобы радиус светлого пятна на экране увеличился в 2 раза?

Задача № 9. Дерево сфотографировано с расстояния $d = 10$ м. Оптическая сила объектива фотоаппарата $D = 12,6$ дптр. Ширина изображения ствола дерева на фотопленке $L = 2$ мм. Найдите диаметр ствола H .

Задача № 10. Две одинаковые тонкие собирающие линзы, сложенные вплотную, дают на экране изображение лампочки, увеличенное в 3 раза. Расстояние между лампочкой и экраном $\ell = 80$ см. Определить оптическую силу каждой линзы.

Задача № 11. Равнобедренный прямоугольный треугольник ABC площадью $S = 50$ см² расположен перед тонкой собирающей линзой так, что его катет AC лежит на главной оптической оси линзы (рис.). Фокусное расстояние линзы $F = 50$ см. Вершина прямого угла C лежит ближе к центру линзы, чем вершина острого угла A. Расстояние от центра линзы до точки C равно удвоенному фокусному расстоянию линзы. Постройте изображение треугольника и найдите площадь получившейся фигуры.



Задача № 12. Середина стержня, имеющего длину $l = 10$ мм, находится на расстоянии $d = 18$ см от собирающей линзы на ее главной оптической оси. Найдите длину L изображения стержня в двух случаях: а) стержень расположен параллельно плоскости линзы; б) стержень расположен вдоль главной оптической оси линзы. Фокусное расстояние линзы $F = 12$ см.

Задача № 13. Точка А движется в направлении, перпендикулярном главной оптической оси собирающей линзы, с постоянной скоростью 4 см/с. С

какой средней скоростью движется ее изображение, если $d = 0,18$ м, а фокусное расстояние линзы $0,1$ м?

Задача № 14. Точечный источник находится на главной оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 6$ см на расстоянии $d = 8$ см от линзы. Линзу начинают смещать со скоростью $v = 3$ мм/с в направлении, перпендикулярном оптической оси. С какой скоростью движется изображение источника?

Задача № 15. Муха пересекает главную оптическую ось собирающей линзы на расстоянии $a = 3F$, где F – фокусное расстояние линзы, под малым углом α к оси линзы со скоростью v . Под каким углом изображение мухи пересекает главную оптическую ось? Чему равна в этот момент скорость изображения мухи?

Задача № 16. Точечный источник движется со скоростью $v = 2$ мм/с вдоль главной оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 8$ см. С какой скоростью движется изображение источника в тот момент, когда источник находится от линзы на расстоянии $d = 10$ см?

Задача № 17. Собирающую линзу с фокусным расстоянием 10 см перемещают со скоростью 3 мм/с в направлении точечного источника света, находящегося на ее главной оптической оси. С какой скоростью движется изображение в тот момент, когда расстояние между линзой и источником составляет 12 см?

Задача № 18. Над водой на высоте $h_1 = 1,0$ м поместили горизонтально плоское зеркало. На какой высоте h над водой увидит свое отражение рыба, находящаяся на глубине $h_2 = 0,5$ м? Показатель преломления воды $n = 1,33$.

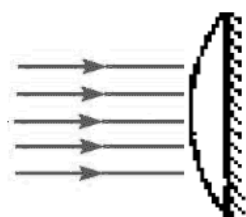
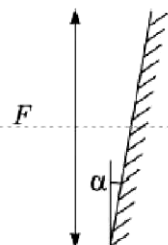
Задача № 19. Фотограф с лодки фотографирует предмет, лежащий на дне прямо под ним на глубине $h = 2$ м. Во сколько раз изображение на пленке будет меньше предмета, если фокусное расстояние объектива $F = 10$ см, расстояние от объектива до поверхности воды $L = 50$ см, а показатель преломления воды $n = 4/3$?

Задача № 20. С помощью положительной линзы на экране получено изображение булавки, расположенной перпендикулярно главной оптической оси линзы, с увеличением $\Gamma_1 = 1$. Между линзой и экраном на расстоянии $a = 10$ см от линзы перпендикулярно ее главной оптической оси установили плоское зеркало. Изображение булавки в системе «линза-зеркало» получилось с увеличением $\Gamma_2 = 2$. Определить фокусное расстояние линзы.

Задача № 21. С помощью положительной линзы с фокусным расстоянием $F = 15$ см получено мнимое изображение иголки, расположенной

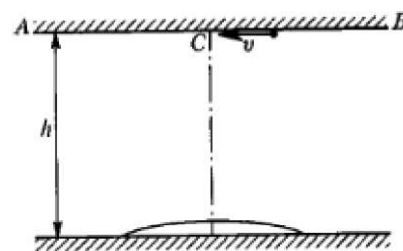
перпендикулярно главной оптической оси линзы, с увеличением $\Gamma_1 = 2$. По другую сторону линзы перпендикулярно ее главной оптической оси установили плоское зеркало. Изображение иголки в системе «линза-зеркало» получилось с увеличением $\Gamma_2 = 3$. Определить расстояние от линзы до зеркала.

Задача № 22. За собирающей линзой расположено плоское зеркало, причем угол между зеркалом и линзой равен α . На главной оптической оси линзы в фокусе расположен источник света S . Определите, на каком расстоянии от S источника света находится его изображение, если фокусное расстояние линзы равно F .

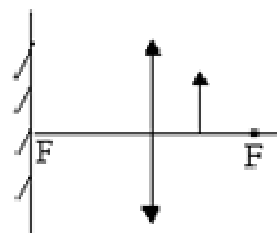


Задача № 23. Плоскую поверхность плосковыпуклой линзы с фокусным расстоянием F посеребрили. На линзу падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси (рис.). В какой точке пересекутся эти лучи?

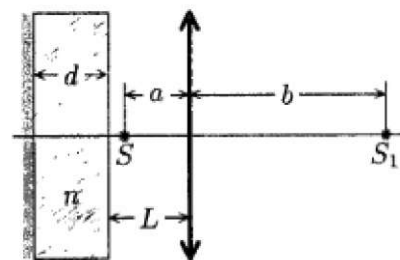
Задача № 24. В комнате на столе лежит плоское зеркало, на котором находится тонкая плосковыпуклая линза с фокусным расстоянием $F = 40$ см. По потолку AB ползет муха со скоростью $v = 2$ см/с (см. рисунок). Расстояние от потолка до зеркала $h = 220$ см. На каком расстоянии от зеркала находится изображение мухи в данной оптической системе?



Задача № 25. В фокальную плоскость тонкой собирающей линзы помещено плоское зеркало. Предмет расположен между фокусом и линзой. Оптическая система создает действительное изображение предмета. Как изменится увеличение, с которым изображается предмет, если расстояние между линзой и предметом уменьшить в два раза?



Задача № 26. Оптическая система, состоящая из собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 12$ см и плоского зеркала в форме посеребренной с одной стороны плоскопараллельной пластинки толщиной $d = 9$ см, создает действительное изображение (после отражения от зеркала и прохождения линзы) точечного источника света S , расположенного на главной оптической оси линзы между линзой и зеркалом (см. рисунок). Расстояние от источника до линзы равно $a = 2F/3$, а от изображения S_1 , даваемого системой, до линзы — $b = 2F$. Найти показатель

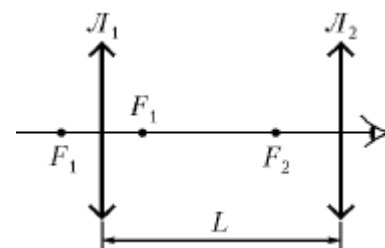


преломления пластинки n . Расстояние между линзой и зеркалом $L = \text{см}$. Отражением от передней поверхности пластины пренебречь.

Задача № 27. Точечный источник света находится на расстоянии $d_1 = 9$ см от собирающей линзы с фокусным расстоянием $F_1 = 6$ см. Позади этой линзы на расстоянии $l = 6$ см от нее находится другая точно такая же линза. На каком расстоянии от второй линзы получится изображение источника, сформированное системой линз?

Задача № 28. На оси x в точке $x_1 = 0$ находится оптический центр тонкой рассеивающей линзы с фокусным расстоянием $F_1 = -20$ см, а в точке $x_2 = 20$ см – тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием $F_2 = 30$ см. Главные оптические оси обеих линз лежат на оси x . Свет от точечного источника, расположенного в точке $x < 0$, пройдя данную оптическую систему, распространяется параллельным пучком. Найдите координату x точечного источника.

Задача № 29. Микроскоп имеет объектив L_1 с фокусным расстоянием $F_1 = 1$ см и окуляр L_2 с фокусным расстоянием $F_2 = 3$ см, расстояние между ними $L = 20$ см (рис.). На каком расстоянии от объектива должен находиться предмет, чтобы окончательное изображение получилось на расстоянии наилучшего зрения $d_0 = 25$ см от глаза (глаз расположен вплотную к окуляру)? Какое при этом получится линейное увеличение предмета?



Задача № 30. Две тонкие положительные линзы с фокусными расстояниями F_1 и F_2 расположены на одной оси. С помощью этой системы линз получено изображение предмета, причем оказалось, что размер изображения не зависит от расстояния от предмета до системы линз. Найти расстояние L между линзами.

Задача № 31. На расстоянии 20 см от точечного источника света помещена собирающая линза диаметром 1 см с фокусным расстоянием 10 см, а на расстоянии 50 см от источника – собирающая линза диаметром 10 см с фокусным расстоянием 20 см. Главные оптические оси линз совпадают, источник находится на оси. На каком расстоянии за большой линзой нужно поместить экран, чтобы световое пятно на нем имело минимальный внешний диаметр? Найдите диаметр этого пятна. Изменится ли освещенность пятна, если убрать маленькую линзу?

Задача № 32. Оптическая система состоит из двух собирающих линз 1 и 2 с фокусными расстояниями $F_1 = 10$ см и $F_2 = 5$ см, находящихся на расстоянии $L = 35$ см друг от друга. Предмет находится на расстоянии $d_1 = 25$

см от первой линзы. Определить, где находится изображение, полученное с помощью такой системы. Чему равно увеличение, даваемое такой системой?

Задача № 33. Оптическая система состоит из двух одинаковых собирающих линз с фокусным расстоянием f , расположенных на расстоянии f друг от друга (главные оптические оси линз совпадают). Предмет находится на расстоянии $a = f/3$ от первой линзы и расположен перпендикулярно главной оптической оси системы. Постройте изображение предмета в данной системе. Найдите расстояние b от изображения до второй линзы и увеличение Γ , даваемое системой.

Задача № 34. Оптическая система состоит из расположенных друг за другом рассеивающей линзы с фокусным расстоянием -10 см и собирающей линзы с неизвестным фокусным расстоянием. Оптические оси линз совпадают. Предмет расположен перпендикулярно оптической оси перед рассеивающей линзой на расстоянии 10 см от нее. Система создает изображение предмета в натуральную величину на экране, находящемся за собирающей линзой на расстоянии 30 см от нее.

- 1) На каком расстоянии от себя создает изображение предмета рассеивающая линза?
- 2) Найдите расстояние между линзами.

ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКИ

Гидроаэродинамика изучает законы движения жидкостей и газов, а также взаимодействия жидкостей и газов с твердыми телами при их относительном движении.

Еще с Древней Греции известны случаи попытки выяснить механические свойства воды и использование водной стихии. Хотя основоположником гидродинамики исследователи считают Э. Торричелли, создателями теоретической гидродинамики являются Д. Бернулли и Л. Эйлер.

В 1727–1729 гг. Д. Бернулли в «Комментариях» Петербургской академии наук напечатал серию статей по гидродинамике. В 1738 г. он издал свою работу «Гидродинамика, или записки о силах и движениях жидкостей», в которой содержатся физические основы механики жидкости.

В 1754 г. Л. Эйлер опубликовал свою работу «Более полная теория машин, приводимых в движение действием воды», в 1755 г. – мемуары «Общие принципы движения жидкостей» и «Общие принципы состояния равновесия жидкостей», в которых он сформулировал основные законы движения идеальной жидкости, получившие широкое применение при расчетах и постройке различных систем водяных двигателей.

В 1858 г. Г.Ф. Гельмгольц заложил основы вихревого движения жидкости. Н.Е. Жуковский заложил основы аэродинамики, а его ученик С.А. Чаплыгин – основы газовой динамики.

Жидкости и газы имеют определенные отличия от твердых тел. Они обладают подвижностью (или текучестью). Чтобы изменить объем и форму твердых тел, необходимо приложить значительные усилия, в то время как жидкости не обнаруживают никакого сопротивления изменению формы. Если к поверхности жидкости прилагаются силы, не перпендикулярные к поверхности, то равновесие жидкости всегда нарушается, и она приходит в движение, как бы малы эти силы ни были. Море рябит при малейшем ветерке. Это так называемые сдвиговые напряжения, приводящие к нарушению равновесия жидкости, заставляя отдельные ее слои скользить один по другому. При этом сила трения покоя, играющая важную роль при рассмотрении движения твердых тел относительно друг друга, отсутствует, поэтому сила реакции при взаимодействии жидкости с окружающими телами всегда направлена перпендикулярно к поверхности раздела.

Раздел физики, изучающий законы движения жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами, называется **гидродинамикой**. По аналогии с гидродинамикой можно говорить об аэродинамике как разделе физики, изучающем законы движения газов и тел в них.

Основные положения гидро- и аэродинамики

Давление внутри жидкости зависит от степени ее сжатия. Жидкость может быть сжата силой тяжести (собственным весом) или какими-либо внешними силами, действующими на поверхность, ограничивающую данный объем жидкости (поверхностные силы). Сжатие воды, в частности, под действием атмосферного давления приводит к уменьшению ее объема на $1/20000$ часть исходного объема. В связи с этим в физике вводится представление о «несжимаемости» жидкости, подобно тому как используется понятие абсолютно твердого тела. Будем рассматривать несжимаемую жидкость, т.е. жидкость, плотность которой одинакова и не меняется со временем.

При действии лишь поверхностных сил давление во всех точках внутри жидкости одинаково. Этот закон был установлен французским физиком и математиком Блэзом Паскалем и носит его имя.

Закон Паскаля иногда формулируют следующим образом: *давление, создаваемое поверхностными силами, передается без изменения в каждую точку жидкости.*

Рассмотрим ситуацию, иллюстрирующую закон Паскаля. Возьмем сосуд, наполненный жидкостью, с поршнем площадью S , закрывающим открытую часть сосуда. В жидкости находится небольшой полый кубик с тонкими металлическими стенками и площадью грани S_2 . На поршень действует некоторая сила F . Тогда жидкость в сосуде находится под неизменным давлением $p = \frac{F}{S}$.

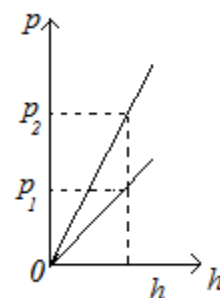
Согласно закону Паскаля, на каждую грань этого кубика независимо от его ориентации будет действовать сила $F_2 = pS_2$. Если бы силы, действующие на различные грани, были разными, кубик бы пришел в движение. В действительности мы этого не наблюдаем. Следовательно, $\frac{F_2}{S_2} = \frac{F}{S}$.

Закон Паскаля справедлив в отсутствии силы тяжести или когда ею можно пренебречь.

В поле тяжести Земли давление жидкости возрастает с глубиной и численно равно весу столба жидкости высотой h . Давление жидкости внутри покоящейся жидкости (или гидростатическое давление) определяется следующим соотношением: $p = \rho gh$.

Как видно из этого уравнения, давление в жидкости прямо пропорционально глубине погружения. Если построить график этой зависимости, видно, что наклон прямой зависит от плотности жидкости. Чем больше угол наклона прямой, тем больше плотность жидкости.

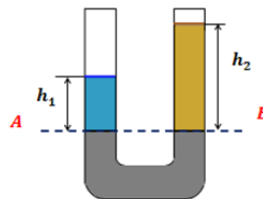
Часто на поверхность жидкости оказывается еще и дополнительное давление, например земной атмосферы. Тогда полное давление на глубине h определяется как сумма давлений: $p = p_0 + \rho gh$.



Это уравнение объясняет, почему в сообщающихся сосудах, заполненных однородной жидкостью, она располагается на одном уровне одинаково, независимо от формы сосудов.

Если сообщающиеся сосуды заполнены разными жидкостями, то наблюдается другая ситуация. Рассмотрим пример решения задачи.

Задача 1. В два колена U-образной трубки налиты вода и масло, разделенные ртутью (см. рис.). Поверхности раздела ртути и жидкостей в обоих коленах находятся на одной высоте. Определить высоту столба воды, если высота столба масла 20 см.



Решение. Давление, создаваемое водой в левом колене на уровне АВ:

$$p_1 = p_{\text{атм}} + \rho_1 g h_1.$$

Давление, создаваемое маслом в правом колене на уровне АВ:

$$p_2 = p_{\text{атм}} + \rho_2 g h_2.$$

Согласно закону Паскаля, давление в обоих коленах трубки на уровне АВ (поверхность раздела ртути и жидкостей) одинаково: $p_1 = p_2$.

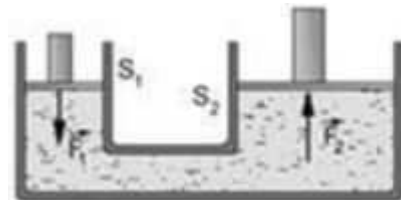
Приравнявая выражения для p_1 и p_2 , получаем:

$$p_{\text{атм}} + \rho_1 g h_1 = p_{\text{атм}} + \rho_2 g h_2.$$

Проведя математические преобразования, получаем: $h_1 = \frac{\rho_2 h_2}{\rho_1}$.

Подставляя значения величин, вычисляем: $h_1 = 0,18$ м.

Закон Паскаля позволяет объяснить принцип действия гидравлического пресса, который состоит из двух сообщающихся между собой цилиндрических сосудов разного диаметра, снабженных поршнями. Пространство под поршнями заполнено жидкостью (обычным маслом).



Обозначив площадь малого поршня как S_1 , а большого – как S_2 . Пусть к малому поршню приложена сила F_1 . Найдем, какую силу F_2 необходимо приложить ко второму поршню, чтобы сохранить равновесие, т.е. скомпенсировать усилие, приложенное к первому поршню.

Давление под первым поршнем будет равно $p_1 = \frac{F_1}{S_1}$, а под вторым $p_2 = \frac{F_2}{S_2}$.

Из условия равновесия следует, что $p_1 = p_2$, т.е. $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$. Из данного соотношения получаем $F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$, т.е. сила F_2 во столько раз больше силы F_1 , во сколько раз площадь второго поршня больше площади первого. Таким образом, при помощи гидравлического пресса можно малой силой уравновесить большую силу.

Предположим теперь, что первый поршень переместился (например, опустился) на расстояние h_1 , тогда часть жидкости вытеснится из первого

цилиндра и поступит во второй, поднимая второй поршень на расстояние h_2 . Если степень сжатия жидкости не изменилась, то объем жидкости, вытесненной из первого цилиндра, равен объему, поступившему во второй, т.е. $h_1 S_1 = h_2 S_2$. Отсюда можно найти $h_2 = h_1 \frac{S_1}{S_2}$. Сравнивая эту формулу с формулой для силы F_2 , видим, что путь, проходимый большим поршнем, во столько раз меньше пути, проходимого меньшим поршнем, во сколько раз сила, действующая на большой поршень, больше силы, действующей на меньший. Таким образом, видно, что соблюдается «золотое правило» механики, т.е. «сколько выигрывается в силе, столько теряется в пути».

Другим основополагающим законом гидростатики является **закон Архимеда**: «На тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости (или газа) в объеме погруженной части тела».

Другими словами, закон Архимеда описывает силу, которая действует на тело со стороны жидкости (или газа), направленную вертикально вверх и равную весу вытесненной жидкости. Выталкивающая сила – это алгебраическая сумма всех сил, действующих на поверхность погруженного в жидкость тела со стороны жидкости.

В поле земного тяготения эта сила направлена против сил тяжести самого тела и приложена в центре тяжести вытесненного объема жидкости.

Закон Архимеда справедлив и в случае, когда тело плавает в жидкости или частично опущено в нее через свободную, т.е. не соприкасающуюся со стенками сосуда, поверхность жидкости. Закон Архимеда позволяет объяснить, почему одни тела плавают, а другие тонут. Для этого достаточно сравнить величины выталкивающей силы и силы тяжести, которые направлены противоположно друг другу. Если выталкивающая сила преобладает, тело всплывает и держится на поверхности, при этом вытесненный им объем жидкости оказывается меньше объема самого тела. Если преобладает сила тяжести, тело тонет и опускается на дно, а сила давления его на дно уменьшается на величину силы Архимеда. Закон Архимеда применим и к телам, находящимся в воздухе.

Рассмотрим пример решения задачи.

Задача 2. На границе раздела двух несмешивающихся жидкостей с плотностями ρ_1 и ρ_2 плавает шар так, что отношение объемов погруженных в жидкости частей шара равно $\frac{V_1}{V_2} = n$. Найти плотность вещества шара.

Решение. По условию плавания тел, вес шара равен весу вытесненных объемов жидкостей $\rho_{\text{ш}} g V_{\text{ш}} = \rho_1 g V_1 + \rho_2 g V_2 = \rho_1 g \frac{n V_{\text{ш}}}{n+1} + \rho_2 g \frac{V_{\text{ш}}}{n+1}$

Проведя математические преобразования, получаем: $\rho_{\text{ш}} = \frac{\rho_1 n + \rho_2}{n+1}$.

Закон Архимеда не только позволяет определять плотность тела неправильной формы, но и дает возможность разъяснить все вопросы, связанные с плаванием тел (как лодок, подводных лодок, так и воздушного шара или дирижабля). Шар поднимается, если вес всего летательного аппарата

вместе с газом в оболочке меньше веса воздуха в объеме, вытесненном аппаратом. Если эти веса равны, то шар висит неподвижно, а если вес аппарата больше веса вытесненного воздуха, то шар опускается. Закон Архимеда выполняется как в жидкостях, так и в газах. Остановимся на отличиях, которые связаны с характером появления выталкивающей (поддерживающей) силы в газах.

Пусть оболочка воздушного шара наполнена легким газом, например водородом. Нижняя часть воздушного шара обычно открытая, и давление водорода у нижнего отверстия равно давлению наружного воздуха. С высотой давление газов падает, причем чем тяжелее газ, тем выше скорость изменения давления.

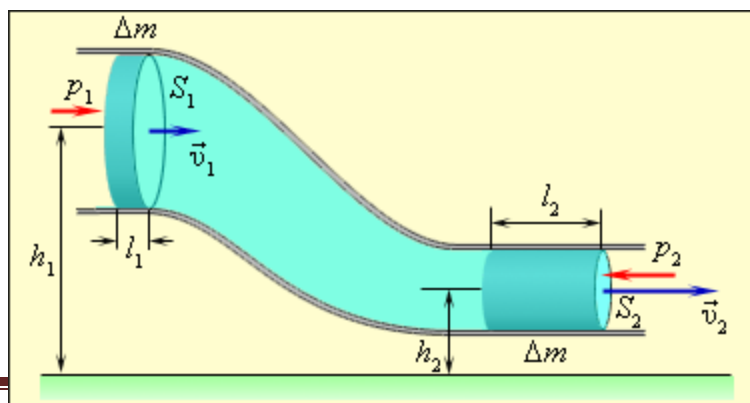
В пределах воздушной оболочки тоже разное падение давления воздуха (снаружи) и водорода (внутри). Давление более легкого водорода падает с высотой медленнее, чем давление воздуха. В связи с этим на оболочку изнутри будет действовать избыточное давление, особенно ощутимое в верхней части оболочки. Следовательно, сила, действующая на купол изнутри, больше силы, действующей снаружи. Поддерживающая (выталкивающая) сила в этом случае создается за счет разности давлений изнутри и снаружи на верхнюю часть оболочки.

Именно поэтому клапан, позволяющий выпускать водород из оболочки, делают в верхней части. Его с помощью веревки открывают из корзины шара для того, чтобы уменьшить объем шара и заставить его опускаться.

Первые воздушные шары наполнялись горячим воздухом. Вес нагретого воздуха меньше веса вытесненного холодного воздуха.

Во всех рассматриваемых выше случаях жидкости (или газы) находились в покое. Если жидкости (или газы) приходят в движение, то это более сложное явление. Для его описания используются различные упрощающие предположения (модели). В простейшей модели жидкости (или газы) предполагаются несжимаемыми и идеальными (т.е. без внутреннего трения между движущимися слоями). Из опыта известно, что жидкости бывают с большей вязкостью (мед) и с меньшей вязкостью (вода). Вязкость воздуха гораздо меньше по сравнению с жидкостью. Однако, при движении пылинки в воздухе как раз вязкость играет определяющую роль. При движении идеальной жидкости не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, поэтому выполняется **закон сохранения механической энергии**.

Движение жидкостей существенно усложняется по сравнению с движением твердых тел тем, что существует возможность перемешивания слоев жидкости. При малых скоростях слои жидкости не перемешиваются. Течение, при котором струи не перемешиваются и в каждой точке сечения потока



существует определенная скорость течения, называется **стационарным** слоистым, или **ламинарным**. В стационарном потоке частицы жидкости перемещаются по неизменным во времени траекториям, которые называются **линиями тока**. Опыт показывает, что стационарные потоки возникают только при достаточно малых скоростях движения жидкости. Рассмотрим стационарное движение идеальной несжимаемой жидкости по трубе переменного сечения (см. рис.). Различные части трубы могут находиться на разных высотах.

При увеличении скорости слои жидкости перемешиваются, такое течение называется **турбулентным**.

Скорость жидкости в любой точке ламинарного потока направлена по касательной к линии тока. В такой несжимаемой жидкости объемный расход (объем жидкости ΔV , проходящий через поперечное сечение в единицу времени) должен быть постоянным, т.е. $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{const}$.

Если за промежуток времени Δt жидкость в трубе сечением S переместится на Δl , объем жидкости, проходящий через поперечное сечение можно определить как $\Delta V = S \cdot \Delta l$. Учитывая это соотношение, перепишем $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S \Delta l}{\Delta t} = Sv = \text{const}$ (v – скорость движения частиц жидкости в трубе).

Рассмотрим движение жидкости через трубы разного сечения. Пусть за промежуток времени Δt жидкость в трубе сечением S_1 переместится на $l_1 = v_1 \Delta t$, а в трубе сечением S_2 – на $l_2 = v_2 \Delta t$, где v_1 и v_2 – скорости частиц жидкости в трубах. Тогда условие несжимаемости можно записать в виде:

$$\Delta V = l_1 S_1 = l_2 S_2 \text{ или } v_1 S_1 = v_2 S_2.$$

Это уравнение справедливо для всякой реальной трубы, русла реки, движения крови в нашем организме и т.д.

Таким образом, при переходе жидкости с участка трубы с большим сечением на участок с меньшим сечением скорость течения возрастает, т.е. 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. Поэтому, как уже было сказано ранее, к ее течению можно применить закон сохранения механической энергии.

При перемещении жидкости силы давления совершают работу:

$$\Delta A = p_1 S_1 l_1 - p_2 S_2 l_2 = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t = (p_1 - p_2) \Delta V.$$

Если в потоке воды выделить некий объем (элемент) жидкости, то он, находясь в движении, обладает кинетической энергией $\frac{mv^2}{2}$. Если при прохождении вдоль линии тока жидкость поднимается или опускается, то

изменяется ее потенциальная энергия mgh . Когда жидкость движется из области низкого давления в область высокого, над ней совершается работа. Каждый вид энергии может изменяться, но совершенная над жидкостью работа должна быть равна изменению ее кинетической и потенциальной энергии или только одной из них в случае постоянства другой.

$E_2 - E_1 = \Delta A = (p_1 - p_2)\Delta V$, где E_1 и E_2 – полные механические энергии массы Δm в поле тяготения: $E_1 = \frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_1$; $E_2 = \frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2$.

Работа ΔA сил давления равна изменению потенциальной энергии упругой деформации жидкости, взятому с обратным знаком. Изменения, произошедшие за время Δt в выделенной части жидкости, заключенной между сечениями S_1 и S_2 в начальный момент времени, при стационарном течении сводятся к перемещению массы жидкости $\Delta m = \rho \Delta V$ (ρ – плотность жидкости) из одной части трубы сечением S_1 в другую часть сечением S_2 . Закон сохранения механической энергии для этой массы имеет вид:

$$\frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2 - \left(\frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_1 \right) = (p_1 - p_2) \Delta V$$

$$\text{или } \frac{\rho \Delta V v_2^2}{2} + \rho \Delta V g h_2 - \left(\frac{\rho \Delta V v_1^2}{2} + \rho \Delta V g h_1 \right) = (p_1 - p_2) \Delta V$$

$$\text{Отсюда следует: } \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2.$$

Это выражение называется **уравнение Бернулли**. Из него следует, что сумма $\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const}$, где p – давление в данном сечении трубки, h – глубина данного сечения.

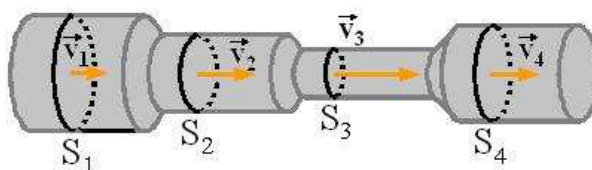
Для горизонтальной трубки тока $h = \text{const}$, уравнение принимает вид: $p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}$, где $\frac{\rho v^2}{2}$ – скоростной (динамический) напор.

Из этого уравнения следует, что в тех сечениях трубки тока, где скорость жидкости больше, статическое давление меньше, а где скорость уменьшается, там статическое давление возрастает.

Для неподвижной жидкости уравнение Бернулли будет иметь вид: $\rho g h_1 + p_1 = \rho g h_2 + p_2$. Если принять $p_2 = p_0$ – давление у поверхности жидкости, а $h_2 - h_1 = h$ – глубина h , отсчитываемая от этой поверхности, тогда получаем: $p = p_0 + \rho g h$. Такое соотношение описывает неподвижную жидкость, которая описана в начале пособия.

Если течение жидкости происходит на одном уровне, т.е. потенциальная энергия любого элемента жидкости не меняется, уравнение Бернулли примет вид: $\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2$.

В опытах обнаружено, что в трубах, имеющих в разных местах неодинаковое сечение, статическое давление p в разных местах различно. Давление в жидкости, текущей по горизонтальной трубе переменного сечения, больше в тех сечениях потока, в которых скорость ее движения меньше, и наоборот,



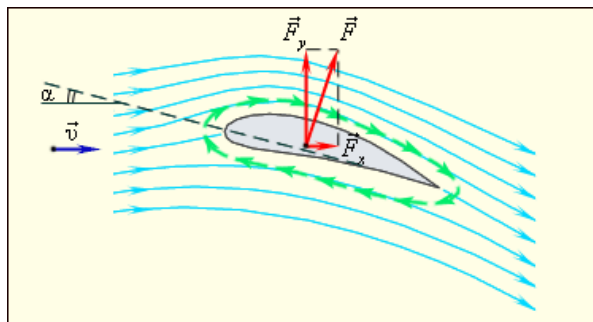
давление меньше в тех сечениях, в которых скорость больше. Пример такого рода, когда по трубе неодинакового сечения пропускается постоянный поток воды, представлен на рисунке.

Это объясняется тем, что в широких частях трубы жидкость должна течь медленнее, чем в узких, так как количество жидкости, протекающей за одинаковые промежутки времени, одинаково для всех сечений трубы. Поэтому при переходе из узкой части трубы в широкую скорость жидкости уменьшается, жидкость тормозится, как бы натекая на препятствие, и степень сжатия ее (а также ее давление) растет. Наоборот, при переходе из широкой части трубы в узкую скорость жидкости увеличивается, и сжатие ее уменьшается; жидкость, ускоряясь, ведет себя подобно распрямляющейся пружине.

Это свойство присуще и газам, используется оно, например, в пульверизаторах или распылителях. Давление в струе воздуха, проходящей с большой скоростью над вертикальной трубкой в пульверизаторе, ниже, чем атмосферное, действующее на поверхность жидкости в сосуде. Из-за этого жидкость выталкивается вверх по трубе и распыляется.

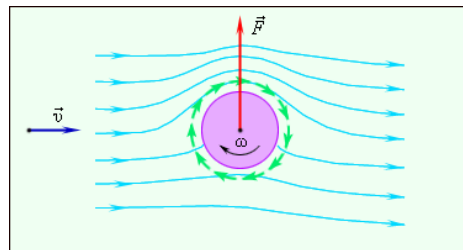
В отличие от жидкостей, газы могут сильно изменять свой объем. Расчеты показывают, что сжимаемостью газов можно пренебречь, если наибольшие скорости в потоке малы по сравнению со скоростью звука в этом газе. Таким образом, уравнение Бернулли можно применять к достаточно широкому классу задач аэродинамики. 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 рисунке изображены линии тока воздуха при обтекании крыла самолета. Из-за специального профиля крыла и наличия угла атаки, т.е. угла наклона крыла по отношению к набегающему потоку воздуха, скорость воздушного потока над крылом оказывается больше, чем под крылом. Поэтому на рисунке 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 F , действующая на крыло. Вертикальная составляющая 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 F_x представляет собой силу сопротивления среды.



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 (стрелки на рисунке вокруг крыла). 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. 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. Рисунок иллюстрирует обтекание вращающегося цилиндра набегающим потоком. Эффект Магнуса проявляется, например, при полете закрученного мяча при игре в теннис или футбол.



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 силы трения. Его вывод основан на законе сохранения механической энергии при течении жидкости или газа. Поэтому с помощью уравнения Бернулли нельзя дать исчерпывающее объяснение 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 уравнения Бернулли может привести к качественно неверным результатам.

Внутренним трением, или **вязкостью**, называется явление возникновения сил, препятствующих относительному перемещению слоев жидкости. Силы внутреннего трения направлены вдоль соприкасающихся слоев (но не перпендикулярно к их поверхностям, как силы упругости) и зависят от их относительных скоростей. Причиной внутреннего трения является перенос частицами вещества импульсов между соприкасающимися слоями.

При движении сферического тела в идеальной жидкости оно не должно испытывать лобовое сопротивление. Если же такое тело движется в вязкой жидкости, возникает сила сопротивления, модуль которой пропорционален скорости v и радиусу сферы r (закон Стокса) $F_{\text{сop}} \sim v \cdot r$ или $\mathbf{F} = 6\pi\eta vr$. Этот закон получен в предположении, что стенки сосуда не влияют на движение тела. Коэффициент пропорциональности в этой формуле зависит от свойств жидкости и ее температуры. 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 mg , выталкивающая сила F_A и сила сопротивления среды $F_{сопр}$), оказываются скомпенсированными, и их равнодействующая равна нулю.

Скорость равномерного падения малого шарика радиусом r и плотностью ρ в вязкой жидкости с плотностью $\rho_{ж}$ и вязкостью η вычисляется по формуле:

$$v = g \frac{\rho - \rho_{ж}}{\eta} \frac{2r^2}{9}.$$

Эта формула справедлива для движения шарика не только в жидкости, но и в газе. Она может быть использована, в частности, для вычисления времени выпадения пыли в воздухе. Поясним это следующим примером. Для воздуха – среды, в которой взвешены различные частицы пыли, – вязкость $\eta = 0,000175$ Па·с. Около 80% пыли, обнаруженной в легких умерших людей, составляют частицы размером от 5 до 0,2 мкм. Если считать пылинки шарообразными, а плотность пыли равной плотности земли ($\rho = 2,5$ г/см³), то, вычисляя скорость падения этих пылинок по формуле $v = g \frac{\rho - \rho_{ж}}{\eta} \frac{2r^2}{9}$, найдем, что ее значения находятся в пределах 0,2 - 0,0003 см/с. Для полного выпадения такой пыли в комнате высотой 3 м потребуется около 12 суток при условии полной неподвижности воздуха и отсутствия броуновского движения.

При решении задач с использованием уравнения Бернулли можно использовать следующий алгоритм решения задач:

1. Кратко записать условие, сделать рисунок, обозначить давления, направление и скорость течения жидкости.
2. Записать закон Бернулли. Записать уравнения для нахождения входящих в него величин.
3. Решить уравнения в общем виде.
4. Подставить числовые значения, вычислить.

Рассмотрим пример решения задачи.

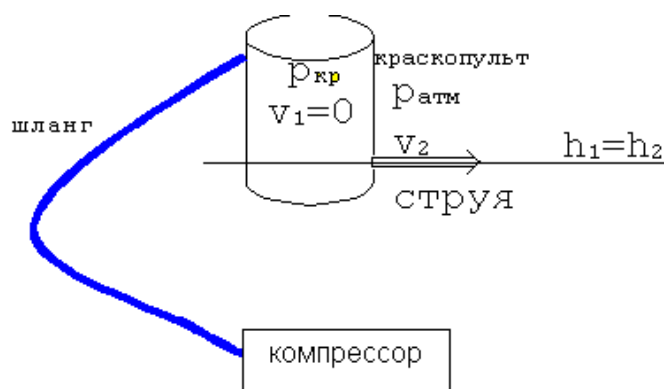
Задача 3.

Какое давление создает компрессор в краскопульте, если струя жидкой краски плотностью 0,8 г/см³ вытекает из него со скоростью 25 м/с?

Решение.

1. Известно:
 $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$
 $v = 25 \text{ м/с}$
2. Записать закон Бернулли. Записать уравнения для нахождения входящих в него величин: $\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2$.

Учитывая, что $p_1 = p_{кр}$, $p_2 = p_{атм}$, $h_1 = h_2$, $v_1 = 0$, запишем:



$$p_{кр} + \rho gh_1 + 0 = p_{атм} + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

Проведем математические преобразования и получаем:

$$p_{кр} = p_{атм} + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

Подставляя числовые значения, получаем $p_{кр} = 351300$ Па.

Задачи для самостоятельного решения

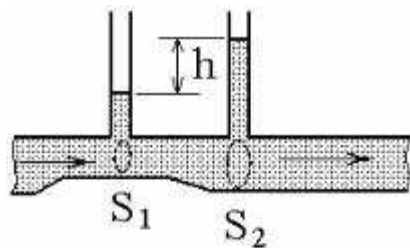
1. Полый железный шар весит в воздухе 5Н, а в воде – 3Н. Определить объем внутренней полости шара.
2. Сплошное однородное тело, погруженное в жидкость с плотностью ρ_1 , весит P_1 , а в жидкость с плотностью ρ_2 – P_2 . Найти плотность вещества.
3. Стекланный цилиндр плотностью находится на горизонтальном полу лифта, движущегося с направленным вертикально вниз ускорением. Давление цилиндра на пол $p = 7,5$ кПа. Найти высоту h цилиндра.
4. К малому поршню гидравлического пресса приложена сила 196Н, под действием которой за один ход он опускается на 25 см, вследствие чего большой поршень поднимается на 5 см. Какая сила давления передается при этом на большой поршень?
5. На малый поршень гидравлического пресса площадью 5 см^2 поставили гирю массой 2 кг. Площадь большого поршня 50 см^2 . Определите: давление в системе; силу, которая должна действовать на большой поршень, чтобы удержать систему в равновесии; перемещение большого поршня, если перемещение малого составило 2 см.
6. Какова должна быть высота цилиндрического сосуда радиусом 5 см, заполненного водой, чтобы сила давления воды на дно сосуда была равна силе ее давления на боковую поверхность?
7. Динамометр, к которому подвешен кусок сплава, состоящего из меди и серебра, показывает в воздухе 2,41Н, а в воде – 2,71Н. Определить массу меди и серебра в этом куске. Выталкивающей силой воздуха пренебречь.
8. Тонкая деревянная палочка длиной 20 см закреплена шарнирно на одном конце и опущена свободным концом в воду. Какая часть длины палочки будет находиться в воде при равновесии?
9. Аэростат, наполненный газом с плотностью ρ_1 , имеет подъемную силу F_1 . Найти подъемную силу в случае наполнения аэростата газом с плотностью ρ_2 . Вес оболочки равен P .
10. Площадь поршня в шприце равна S_1 , а площадь отверстия на выходе – S_2 . Ход поршня l . На поршень действует сила F . Найти скорость и время вытекания воды из шприца, если он расположен горизонтально, а скорость поршня постоянная.
11. Бак цилиндрической формы с площадью основания 1 м^2 и объемом 3 м^3 заполнен водой. Пренебрегая вязкостью воды, определить время,

необходимое для опустошения бака, если на дне бака образовалось круглое отверстие площадью 10 см^2 .

12. Сопло фонтана, дающего вертикальную струю высотой 5 м, имеет форму усеченного конуса, сужающегося вверх. Диаметр нижнего сечения 6 см, верхнего – 2 см. Высота сопла 1 м. Определить расход воды, подаваемой фонтаном, в 1 с, разность давлений в нижнем сечении и атмосферного давления.

13. На столе стоит широкий цилиндрический сосуд высотой 50 см. Сосуд наполнен водой. Пренебрегая вязкостью, найти, на какой высоте от дна сосуда следует сделать небольшое отверстие, чтобы струя из него была в поверхность стола на максимальное расстояние $l_{\text{макс}}$ от сосуда. Чему равно $l_{\text{макс}}$?

14. Две манометрические трубки установлены на горизонтальной трубе переменного сечения в местах, где сечения трубы равны S_1 и S_2 (см рис.). По трубе течет вода. Найти объем воды, протекающей в единицу времени через сечение трубы, если разность уровней воды в манометрических трубках равна Δh .



15. В дне сосуда имеется отверстие диаметром d_1 . В сосуде вода поддерживается на постоянном уровне, равном h . Считая, что струя не разбрызгивается, и пренебрегая силами трения в жидкости, определить диаметр струи, вытекающей из сосуда на расстоянии $h_1 = 2h$ от его дна.

16. Найти среднюю плотность ρ планеты, если на ее экваторе показание динамометра, к которому подвешено тело, на 10% меньше, чем на полюсе. Продолжительность суток на планете $x = 6$ ч.

17. В наполненное до краев ведро опускают кусок льда. Часть воды, равная объему погруженной части льда, при этом выливается. Изменится ли давление на дно, когда лед растает?

18. В цилиндрическое ведро диаметра $D = 25$ см налита вода, занимающая объем $V = 12$ л. Каково давление p воды на стенку ведра на высоте $h = 10$ см от дна?

19. До какой высоты h нужно налить жидкость в цилиндрический сосуд радиуса R , чтобы сила F , с которой жидкость давит на боковую поверхность сосуда, была равна силе давления на дно?

20. Пробирку длины $l = 10$ см доверху заполняют водой и опускают открытым концом в стакан с водой. При этом почти вся пробирка находится над водой. Найти давление p воды на дно пробирки. Атмосферное давление $p_0 = 0,1$ МПа.

21. Цилиндрический сосуд высоты $h = 1$ м заполняют маслом с плотностью $\rho = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и погружают открытым концом в бассейн с водой. Найти давление масла в сосуде непосредственно у его дна в точке А, если известно, что нижний конец сосуда находится на глубине 3 м от поверхности воды в бассейне. Атмосферное давление $p_{\text{н}} = 0,1$ МПа.

22. В U-образную трубку наливают ртуть. Затем в одно из колен трубки наливают масло, а в другое – воду. Границы раздела ртути с маслом и водой в

обоих коленах находятся на одном уровне. Найти высоту столба воды h_0 , если высота столба масла $h = 20$ см, а его плотность $\rho = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

23. В два цилиндрических сообщающихся сосуда наливают ртуть. Сечение одного из сосудов вдвое больше другого. Широкий сосуд доливают водой до края. На какую высоту h поднимется при этом уровень ртути в другом сосуде? Первоначально уровень ртути был на расстоянии от верхнего края широкого сосуда. Плотности ртути и воды ρ и ρ_0 известны.

24. В U-образную трубку с сечением S налита ртуть, занимающая объем V . Затем в одно из колен трубки налили воду и опустили железный шарик массы m . На какую высоту h поднялся уровень ртути в другом колене? Плотности ртути и воды ρ и ρ_0 известны.

25. Малый поршень гидравлического пресса за один ход опускается на высоту $h = 0,2$ м, а большой поршень поднимается на высоту $H = 0,01$ м. С какой силой F действует пресс на зажатое в нем тело, если на малый поршень действует сила $500H$?

26. При подъеме груза, имеющего массу $m = 2$ т, с помощью гидравлического пресса была затрачена работа $A = 40$ Дж. При этом малый поршень сделал 10 ходов, перемещаясь за один ход на высоту $h = 10$ см. Во сколько раз площадь S большого поршня больше площади s малого?

27. В цилиндрический сосуд налиты равные по массе количества воды и ртути. Общая высота столба жидкостей в сосуде $H = 143$ см. Найти давление p на дно сосуда. Плотность ртути $\rho = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

28. Льдина равномерной толщины плавает, выступая над уровнем воды на высоту $h = 2$ см. Найти массу льдины, если площадь ее основания $S = 200$ см². Плотность льда $\rho = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

29. Каким может быть наибольший объем V льдины, плавающей в воде, если алюминиевый брусок объема $V_2 = 0,1$ м³, примерзший к льдине, заставляет ее утонуть? Плотности льда и алюминия $\rho_1 = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\rho_2 = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³.

30. Кусок льда массы $m = 1,9$ кг плавает в цилиндрическом сосуде, наполненном жидкостью с плотностью $\rho = 0,95 \cdot 10^3$ кг/м³. Площадь дна сосуда $S = 40$ см². На сколько изменится уровень жидкости, когда лед растает?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НА РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

С теплом, прежде всего, у нас связано ощущение летнего солнечного дня, домашнего уюта, комфорта. Особенно сильно мы это чувствуем дождливой осенью или зимой. Даже в оценке человеческих отношений мы часто используем это понятие, говоря «тепло человеческих отношений», «тепло человеческих сердец», «теплый прием», «теплые чувства».

Тепло – это не только приятное ощущение, но и необходимое условие для жизни. Жизнь большинства людей мира немыслима без отапливаемого дома. Да и тем, кто живет в теплых странах, тепло нужно для приготовления пищи, для многих хозяйственных дел.

Если в обыденной жизни тепловое состояние тел определяется по ощущениям, то в физике – по их температуре. Температура характеризует степень нагретости тел относительно друг друга и их внутреннюю энергию. Тела, окружающие нас: дома, автомобили, стол в комнате, горящая электрическая лампочка, текущая из крана вода, горящий в плите газ – могут иметь разную температуру и, соответственно, разную внутреннюю энергию. Температура – одна из важных характеристик внешней среды, определяющих условия жизни. Климат или погоду мы, прежде всего, связываем с температурой воздуха, от температуры воды в реке или озере зависит разнообразие и активность водной жизни.

Нагревание, охлаждение, испарение, кипение, конденсация – некоторые примеры того, какие тепловые явления происходят вокруг нас. Никакие процессы сами по себе не происходят. У каждого из них есть свой источник и механизм реализации. Любые тепловые явления в природе обусловлены получением тепла от внешних источников.

Для дальнейшего понимания того, что собой представляют тепловые явления, необходимо дать определение теплоты. *Теплота – энергетическая характеристика теплообмена, т.е. количества энергии, которое отдает (получает) тело или система при взаимодействии.*

В процессе взаимодействия тел друг с другом происходит передача тепла от горячего к холодному телу. *Процесс передачи тепла от тела с более высокой энергией к телу с меньшей энергией называется **теплопередачей**.* В качестве примера можно рассмотреть кипяток, налитый в стакан. Через некоторое время стакан станет горячим, т. е. произошел процесс передачи тепла от горячей воды к холодному стакану.

Однако тепловые явления характеризуются не только теплопередачей, но и таким понятием, как **теплопроводность**. Что оно означает, можно пояснить на примере. Если поставить сковородку на огонь, ее ручка, хоть она и не соприкасается с огнем, нагреется так же, как и вся остальная сковорода. Подобный нагрев обеспечивается теплопроводностью. Нагрев осуществляется в одном месте, а затем нагревается все тело. Или не нагревается – это зависит от

того, какой теплопроводностью оно обладает. Если теплопроводность тела высокая, тепло легко передается от одного участка к другому, если же теплопроводность низкая, передача тепла не происходит.

При нагревании различных тел количество затраченной теплоты зависит от массы и рода тела и определяется с помощью известной формулы:

$$Q = c_{\text{уд}} \cdot m \cdot \Delta t \quad \dots (1),$$

где $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость вещества (обычно берется из специальной таблицы), m – масса тела, $\Delta t = t_2 - t_1$ – изменение температуры тела.

Если тело в твердом состоянии получило достаточно большое количество тепла (энергии), то это может привести к разрушению кристаллической решетки. *Процесс перехода тела из кристаллического твердого состояния в жидкое, т.е. переход вещества из одного агрегатного состояния в другое, называется **плавлением**.*

Количество теплоты, которое требуется, чтобы расплавить вещество массой m , находящееся при температуре плавления, зависит от рода вещества и от массы тела и определяется известной формулой:

$$Q = \lambda \cdot m \quad \dots (2),$$

где λ – удельная теплота плавления вещества, берется из специальной таблицы. Необходимо помнить, что плавление и отвердевание – это взаимобратные процессы, поэтому при отвердевании вещества выделится такое же количество теплоты, что затратилось при плавлении.

При дальнейшем поглощении теплоты жидкостью, когда ее температура достигает определенного значения, большая часть подводимой теплоты начинает расходоваться на разрыв связей между частицами вещества, оставшая часть – на работу, совершаемую при расширении пара. Вещество в очередной раз изменяет свое агрегатное состояние. Происходит переход вещества в газообразное состояние.

Кипение – это интенсивное парообразование, которое происходит при нагревании жидкости не только с поверхности, но и внутри нее.

Количество теплоты, необходимое для испарения вещества массой m при температуре кипения, определяется формулой:

$$Q = r \cdot m \quad \dots (3),$$

где r – удельная теплота парообразования, берется из специальной таблицы. Следует помнить, что, так как испарение и конденсация – это взаимобратные процессы, при конденсации жидкости выделится такое же количество теплоты, что затратилось при испарении.

Тепловой процесс (термодинамический процесс) – это изменение макроскопического состояния термодинамической системы.

Система, в которой идет тепловой процесс, называется рабочим телом.

Тепловые процессы можно разделить на равновесные и неравновесные. *Равновесным называется процесс, при котором все состояния, через которые проходит система, являются равновесными состояниями.*

Тепловые процессы можно разделить на обратимые и необратимые. Обратимым называется процесс, который можно провести в противоположном направлении через все те же самые промежуточные состояния.

Для осуществления тепловых процессов нагревания, плавления, кипения необходимо некоторое количество теплоты. Оно может быть получено от сгорания различного топлива. Количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива, зависит от рода топлива и определяется его массой. Для расчета количества теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, используется следующая формула:

$$Q = q \cdot m, \dots (4),$$

где q – удельная теплота сгорания топлива (показывает количество теплоты, выделяющейся при сгорании 1 кг топлива), m – масса топлива.

Можно выделить несколько простых, но широко распространенных на практике тепловых процессов:

- *Адиабатный процесс* – без теплообмена с окружающей средой.
- *Изохорный процесс* – происходящий при постоянном объеме.
- *Изобарный процесс* – происходящий при постоянном давлении.
- *Изотермический процесс* – происходящий при постоянной температуре.

В технике важны круговые процессы (циклы), т.е. повторяющиеся процессы, например цикл Карно. Теория тепловых процессов применяется для проектирования двигателей, холодильных установок, в химической промышленности, в метеорологии.

Машина для преобразования тепловой энергии в механическую работу называется **тепловым двигателем**. В тепловом двигателе происходит расширение газа, который давит на поршень, заставляя его перемещаться, или на лопатки колеса турбины, сообщая ему вращение. Примерами поршневых двигателей являются паровые машины и двигатели внутреннего сгорания (карбюраторные и дизельные).

Коэффициентом теплового двигателя называется величина, характеризующая эффективность работы двигателя (или механизма). Вычисляется КПД по известной формуле:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{Q} \dots (5),$$

где η – коэффициент полезного двигателя, $A_{\text{полезная}}$ – полезная работа, совершаемая двигателем («полезной» называют ту работу, ради совершения которой и создается двигатель), Q – количество теплоты, которое необходимо затратить (получить от нагревателя), чтобы совершить полезную работу.

Решение задач термодинамики основано на уравнении закона сохранения и превращения энергии с учетом формул изменения внутренней энергии тел и некоторых уравнений механики. Умение правильно применять закон сохранения энергии к конкретным физическим процессам представляет основную трудность при решении задач на теплоту. Особое внимание здесь

нужно обратить на различие между количеством теплоты и изменением внутренней энергии и на выбор системы тел (или тела), для которой составляется основное уравнение.

Нередко возникают затруднения при числовых расчетах в задачах, связанных с превращением одного вида энергии в другой. Здесь нужно помнить, что в уравнении закона сохранения и превращения энергии

$$Q = \Delta U + A$$

все три величины: **количество теплоты Q** , **изменение внутренней энергии ΔU** и **работы A** – должны быть выражены в одних единицах.

1. Три группы задач об изменении внутренней энергии тел

Задачи об изменении внутренней энергии тел можно разделить на три группы.

В задачах первой группы рассматривают такие явления, где в изолированной системе при взаимодействии тел изменяется лишь их внутренняя энергия без совершения работы над внешней средой.

Одни из тел, участвующих в теплообмене, при этом охлаждаются, другие – нагреваются. Согласно закону сохранения и превращения энергии (1), для тел, внутренняя энергия которых уменьшается, можно записать:

$$Q_{\text{отд}} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \dots + \Delta U_n = \sum_{i=1}^n \Delta U_i \quad (2)$$

поскольку ни сами тела, ни над телами работу не совершают ($A = 0$).

Аналогично для тел, энергия которых возрастает, мы получим:

$$Q_{\text{получ}} = \Delta U'_1 + \Delta U'_2 + \dots + \Delta U'_m = \sum_{k=1}^m \Delta U'_k \quad (2')$$

Из определения понятия количества теплоты и закона сохранения энергии как следствие вытекает:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{получ}} \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n \Delta U_i = \sum_{k=1}^m \Delta U'_k \quad (3)$$

Перенеся все члены в левую часть равенства, уравнение (3) представим в ином виде:

$$\sum_{i=1}^n \Delta U_i - \sum_{k=1}^m \Delta U'_k = 0, \quad \text{или короче:} \quad \sum \Delta U = 0. \quad (3')$$

Последнее уравнение является очевидным следствием первого начала термодинамики – в изолированной системе тел, где происходят только процессы теплопередачи, внутренняя энергия системы не изменяется, и, следовательно, алгебраическая сумма изменений энергии отдельных тел равна нулю.

Уравнение (3) называют **уравнением теплового баланса**, оно обычно служит основным расчетным соотношением для всех задач **первой группы**.

Правила решения задач первой группы:

1. Прочитав условие задачи, нужно установить, у каких тел внутренняя энергия уменьшается, у каких – возрастает. Особое внимание следует обращать на то, происходят ли в процессе теплообмена агрегатные превращения или нет.

2. Составить уравнения для тел, энергия которых уменьшается (2), и для тел, энергия которых возрастает (2'), и приравнять полученные суммы.

3. При записи уравнения теплового баланса в виде (3) нужно в выражении $c \cdot m(t_2 - t_1)$ для изменения внутренней энергии всегда вычитать из большей температуры тела меньшую и суммировать все члены арифметически. Если же уравнение записывается в виде (3'), необходимо вычитать из конечной температуры тела начальную и суммировать члены с учетом получающегося знака.

4. В ряде задач задается КПД (η) теплообмена, в этом случае его всегда нужно ставить сомножителем перед $Q_{отд}$.

В задачах второй группы рассматривают явления, связанные с превращением одного вида энергии в другой при взаимодействии двух тел. Результат такого взаимодействия – изменение внутренней энергий одного тела вследствие совершенной им или над ним работы. Теплообмен между телами здесь, как правило, не учитывают.

Уравнение закона сохранения и превращения энергии в этом случае имеет вид:

$$0 = \Delta U + A \quad (4)$$

Решение задач второй группы удобно проводить по следующей схеме:

1. Анализируя условие задачи, нужно прежде всего установить, у какого из двух взаимодействующих тел изменяется внутренняя энергия и что является причиной этого изменения: работа, совершенная самим телом, или работа, совершенная над телом. Кроме того, следует убедиться, что в процессе взаимодействия тел теплота извне к ним не подводится, т.е. действительно ли $Q = 0$.

2. Записать уравнение (4) для тела, у которого изменяется внутренняя энергия, учтя знак перед A и КПД (η) рассматриваемого процесса. При записи уравнения (4) с учетом КПД удобно поступать так. Если по смыслу задачи работа совершается за счет уменьшения внутренней энергии одного из тел и по каким-либо причинам лишь часть ее идет на совершение работы A , то

$$A = \eta \cdot \Delta U \quad (4')$$

Если же из условия видно, что внутренняя энергия тела увеличивается за счет работы, совершенной над телом, и по каким-либо причинам лишь часть ее идет на увеличение U , то

$$\eta \cdot A = \Delta U \quad (4'')$$

3. Составив уравнение (4') или (4''), нужно найти выражение для A и ΔU .

Для A возможно одно из следующих соотношений:

$$A = F \cdot s;$$

$$A = N \cdot \tau;$$

$$A = W_2 - W_1.$$

Здесь F – сила, s – перемещение, N – мощность, τ – время выполнения работы, W – энергия.

4. Для ΔU чаще всего достаточно использовать одну из формул:

$$\Delta U = q \cdot m \quad (\text{сжигание топлива});$$

$$\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta t + \lambda \cdot m \quad (\text{нагрев и плавление тела});$$

$$\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta t + r \cdot m \quad (\text{нагрев и испарение}).$$

Подставляя в исходное уравнение вместо A и ΔU их выражения, получим окончательное соотношение для определения искомой величины. Если в условиях задачи даются дополнительные условия, то к основному уравнению следует, как обычно, добавить вспомогательные.

5. Далее нужно выписать числовые значения известных величин, проверить число неизвестных в уравнениях и решить систему уравнений относительно искомой величины.

Задачи третьей группы объединяют в себе две предыдущие. В этих задачах рассматривают взаимодействие трех и более тел. В процессе такого взаимодействия к одному из тел подводится некоторое количество теплоты Q , в результате чего изменяется его внутренняя энергия и совершается работа. Для решения этих задач надо **составить полное уравнение закона сохранения и превращения энергии** (1).

2. Основные физические законы и формулы

➤ **Удельная теплоемкость вещества:**

$$c = \frac{Q}{m \Delta T};$$

где c – удельная теплоемкость вещества; Q – количество теплоты; m – масса вещества; ΔT – изменение температуры.

➤ **Удельная теплота парообразования:**

$$L = \frac{Q}{m};$$

где L – удельная теплота парообразования; Q – количество теплоты, необходимое для превращения в пар жидкости массой m , находящейся при температуре кипения.

➤ **Удельная теплота плавления:**

$$\lambda = \frac{Q}{m};$$

где λ – удельная теплота плавления; Q – количество теплоты, необходимое для плавления твердого тела массой m , находящейся при температуре плавления.

➤ **Уравнение теплового баланса:**

$$\sum Q_{\text{отд}} = \sum Q_{\text{получ}}.$$

где $\sum Q_{\text{отд}}$ – количество теплоты, отдаваемое более нагретыми телами при теплообмене; $\sum Q_{\text{получ}}$ – количество теплоты, получаемое более холодными телами.

➤ **Работа газа при изобарном процессе:**

$$A = p\Delta V;$$

где A – работа газа при изобарном процессе; p – давление идеального газа; V – объем идеального газа; T – абсолютная температура идеального газа; m – масса идеального газа; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная.

➤ **Первое начало термодинамики:**

$$Q = \Delta U + A;$$

где Q – количество теплоты, полученной системой; ΔU – изменение внутренней энергии системы; A – работа, совершенная системой.

➤ **КПД тепловой машины:**

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1};$$

где η – КПД тепловой машины; A – полезная работа, совершенная рабочим телом; Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя; Q_2 – количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику.

➤ **КПД идеальной тепловой машины:**

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

где η_{max} – КПД идеальной тепловой машины; T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

Примеры решения задач

Задача 1. В чайник налили воду при температуре 10 °С и поставили на нагреватель. Через 10 минут вода закипела. Через сколько минут после закипания она полностью выкипит?

Решение: Решение данной задачи будет очень сложным, если не использовать следующую формулу:

$$N = \frac{Q_1}{T_1},$$

где N – полезная мощность нагревателя (постоянная для каждого нагревателя величина); Q_1 – количество теплоты, которое потребовалось для нагревания воды до кипения. Тогда $Q_2 = NT_2$, где Q_2 – количество теплоты, которое потребовалось для полного выкипания воды.

Тогда

$$T_2 = \frac{Q_2}{N} = \frac{Q_2}{Q_1} T_1 = \frac{rmT_1}{c_{\text{вод}}m\Delta T} = \frac{rT_1}{c_{\text{вод}}\Delta T}.$$

В получившееся выражение подставляем числовые значения величин, вычисляем и получаем ответ 61 минута.

Задача 2. Стальной шарик массой 10 г вынут из печи и опущен в воду при температуре 10 °С. При этом температура поднялась до 25 °С. Какова была температура печи, если масса воды равна 50 г?

Решение: Считая, что вся теплота от нагретого шарика пошла на нагревание воды (потерь тепла нет) запишем уравнение теплового баланса, используя формулу:

$$c_1 m_1 (t_{\text{печи}} - t_2) = c_2 m_2 (t_2 - t_1).$$

Откуда выражаем искомую температуру печи

$$t_{\text{печи}} = t_2 + \frac{c_2 m_2}{c_1 m_1} (t_2 - t_1),$$

подставляем в нее числовые значения, вычисляем и получаем ответ 855 °С.

Задача 3. Для приготовления ванны емкостью 200 л смешали холодную воду при 10 °С с горячей при 60 °С. Сколько литров холодной воды нужно взять, чтобы в ванне установилась температура 40 °С?

Решение: Закон сохранения энергии при теплообмене между телами теплоизолированной системы имеет вид:

$$Q_1 + Q_2 + \dots = 0 \text{ - (уравнение теплового баланса).}$$

При этом положительной считается теплота, полученная телом, отрицательной – отданная; уравнение теплового баланса записывается автоматически для любого числа тел:

$$c_1 m_1 (t^* - t_1) + c_2 m_2 (t^* - t_2) + \dots = 0,$$

где t^* – температура теплового равновесия. В данной задаче, учитывая, что $m_1 = \rho V_1$ и $m_2 = \rho V_2$, получим

$$c V_1 (t^* - t_1) + c V_2 (t^* - t_2) = 0.$$

Учитывая, что $V_1 + V_2 = V$, где V – объем ванны, находим

$$V_1 = V \frac{t_2 - t^*}{t_2 - t_1} = 80 \text{ л.}$$

Задача 4. В латунный калориметр массой 0,15 кг, содержащий 0,20 кг воды при 15 °С, опустили железную гирю массой 0,26 кг при температуре 100 °С. Найти общую установившуюся температур. Потери тепла не учитывать.

Решение. Составим уравнение теплового баланса. Количество тепла, отданное железной гирей:

$$Q_g = c_g m_g (T - \theta).$$

Количество тепла, полученное водой:

$$Q_w = c_w m_w (\theta - T_1).$$

Количество тепла, полученное калориметром:

$$Q_k = c_k m_k (\theta - T_1).$$

На основании закона сохранения энергии

$$Q_g = Q_w + Q_k, \text{ или } c_g m_g (T - \theta) = (c_w m_w + c_k m_k) (\theta - T_1).$$

Находим из уравнения теплового баланса окончательную температуру:

$$\theta = \frac{c_{\Gamma} m_{\Gamma} T + (c_{\text{с}} m_{\text{с}} + c_{\text{к}} m_{\text{к}}) T_1}{c_{\Gamma} m_{\Gamma} + c_{\text{с}} m_{\text{с}} + c_{\text{к}} m_{\text{к}}}.$$

Подставляя числовые значения величин, получаем

$$\frac{460 \cdot 0,26 \cdot 373 + (4187 \cdot 0,2 + 380 \cdot 0,15) \cdot 288 \text{ (Дж / кг} \cdot \text{K)} \cdot \text{кг} \cdot \text{K}}{460 \cdot 0,26 + 4187 \cdot 0,2 + 380 \cdot 0,15 \text{ (Дж / кг} \cdot \text{K)} \cdot \text{кг}} = 298 \text{ K}$$

Ответ: Окончательная температура 298 К (25 °С).

Задача 5. Стальной снаряд, летевший со скоростью 200 м/с, ударяется в земляную насыпь и застревает в ней. На сколько градусов повысится температура снаряда, если на его нагревание пошло 60% кинетической энергии?

Решение. Из всей кинетической энергии снаряда на его нагревание ушла часть энергии $\frac{1}{2} \kappa m v_0^2$.

Увеличение внутренней энергии снаряда равно $\kappa m \Delta T$.

Составим уравнение теплового баланса:

$$\kappa m \Delta T = \frac{\kappa m v_0^2}{2}.$$

Из составленного уравнения теплового баланса:

$$\Delta T = \frac{v_0^2}{2}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$\Delta T = \frac{0,6 \cdot 40000 \text{ м}^2 / \text{с}^2}{2 \cdot 460 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{K)}} \approx 26 \text{ K}$$

Ответ: Температура снаряда повысилась примерно на 26 К.

Задача 6. На сколько километров пути хватит автомобилю 40 л бензина, если сила тяжести автомашины 35,3 кН, общее сопротивление движению составляет 0,050 этой силы, КПД двигателя 18%. Движение считать равномерным.

Решение. Пройденный путь можно найти из формулы для работы, совершенной двигателем:

$$s = A/F.$$

Работу А двигатель совершает, используя часть (Q_1) всей энергии Q, полученной при сжигании топлива:

$$\eta = Q_1/Q, \text{ откуда } Q_1 = Q\eta.$$

Энергия, выделяющаяся при сгорании топлива

$$Q = qm, \text{ где } m = \rho V.$$

Отсюда $A = Q_1 = Q\eta = qm\eta = q\rho V\eta$.

Сила тяги при равномерном движении равна силе сопротивления движению F, которая по условию составляет 0,050 силы тяжести машины, т.е.

$$F = 0,050 P.$$

Полученные нами выражения для А и F подставляем в формулу для s:

$$s = \frac{q\rho\eta V}{0.050P}.$$

Подставляя числовые значения и вычисляя, получаем

$$s = \frac{4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} \cdot 700 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,040 \text{ м}^3 \cdot 0,18}{0,050 \cdot 35300 \text{ Н}} \approx 130000 \text{ м} \approx 130 \text{ км}.$$

Ответ: Бензина хватит примерно на 130 км.

Задача 7. Вычислите КПД газовой горелки, если в ней используется газ с теплотой сгорания 36 Мдж/м^3 , а на нагревание 3 л воды в чайнике от 10°C до кипения было израсходовано 60 л газа. Теплоемкость чайника $600 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$, удельная теплоемкость воды $4200 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}$

Решение: КПД тепловой машины вычисляется по формуле $\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{Q}$,

полезной работой в этой ситуации будет работа, совершаемая горелкой при нагревании чайника и при нагревании непосредственно воды. При этом сгорит некоторое количество газа и при горении выделится количество теплоты Q .

$$A_{\text{полезная}} = Q_{\text{нагр. чайника}} + Q_{\text{чайника}}$$

$$\eta = \frac{c_{\text{воды}} m \Delta t + C_{\text{чайника}} \Delta t}{qV_{\text{газа}}}, \text{ где } m_{\text{воды}} = \rho V_{\text{воды}}$$

Подставляем исходные данные, производим вычисления и получаем ответ 55%.

Задача 8. С какой высоты (в км) должен падать оловянный шарик, чтобы при ударе о поверхность он полностью расплавился? Считать, что 50% энергии шарика идет на его нагревание и плавление. Начальная температура шарика 32°C . Температура плавления олова 232°C , его удельная теплоемкость $200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, удельная теплота плавления 58 кДж/кг . $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Решение: Уменьшение механической энергии при падении и неупругом ударе шарика равно его начальной потенциальной энергии. В соответствии с законом сохранения энергии, именно настолько возросла внутренняя энергия системы воздух-шарик-Земля:

$$\Delta U = mgh.$$

Половина этой энергии идет на приращение внутренней энергии шарика, в результате чего происходит его нагревание и плавление:

$$\frac{1}{2} mgh = c m \Delta t + \lambda m,$$

где $\Delta t = 200^\circ\text{C}$ – разница между температурой плавления и начальной температурой шарика. Получаем:

$$h = \frac{2(c\Delta t + \lambda)}{g} = 20 \text{ км}.$$

Задача 9. На электроплитке мощностью 600 Вт за 35 мин нагрели 2,0 л воды от 293 до 373 К, причем 200 г воды обратилось в пар. Определить КПД электроплитки.

Решение: По определению, КПД нагревателя равен

$$\eta = (Q_1/Q) \cdot 100\%,$$

где $Q_1 = c_в \cdot m_в (T_2 - T_1) + rm$ – количество тепла, израсходованное на нагревание воды и на превращение части ее в пар, $Q = Pt$ – тепловая энергия, израсходованная электроплиткой.

Подставим выражения для Q_1 и Q в формулу для КПД:

$$\eta = \frac{c_в m_в (T_2 - T_1) + rm}{Pt}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$\eta = \frac{4187 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 2 \text{ кг} \cdot 80 \text{ К} + 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot 0,2 \text{ кг}}{600 \text{ Вт} \cdot 2100 \text{ с}} \approx 0,89.$$

Ответ: Коэффициент полезного действия электроплитки приблизительно равен 89%.

Задача 10. У какого количества воды можно понизить температуру от 20 до 0°С, охлаждая ее 200 г серного эфира с начальной температурой 20°С, испаряющегося под уменьшенным давлением? Удельную теплоту испарения эфира считать не зависящей от температуры. КПД установки 80%.

Решение. Задача решается с помощью уравнения теплового баланса. Испаряющийся при пониженном давлении эфир должен поглотить количество тепла rm . Так как при этом он охлаждается от T_1 до T_2 , количество тепла, поглощенное им извне, будет равно $rm - mc(T_1 - T_2)$. Из-за несовершенства теплоизоляции тепло будет поступать и от окружающего атмосферного воздуха; по условию, от охлаждаемой воды будет взята лишь часть $Q_1 = \eta[r m - mc(T_1 - T_2)]$ необходимого для испарения эфира тепла. На основании закона сохранения энергии имеем

$$\eta m = [r - c(T_1 - T_2)] = c_в m_в (T_1 - T_2).$$

Подставляя числовые значения, получим

$$m_в = \frac{0,8 \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot [3,52 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг} - 2330 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 20 \text{ К}]}{4187 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 20 \text{ К}} \approx 0,58 \text{ кг}$$

Ответ: Масса воды, у которой можно понизить температуру, равна примерно 0,58 кг.

Задача 11. КПД холодильника равен 80%. Какое количество холодильного агента (фреона – 12) должно испариться для обращения в лед 150 г воды с начальной температурой 289°К?

Решение: Задача решается с помощью уравнения теплового баланса. Количество теплоты, которое отдает вода при охлаждении и замерзании:

$$Q_1 = c_в m_в (T_1 - T_2) + \lambda m_в$$

Количество теплоты, затраченное на испарение фреона:

$$Q_2 = r_в m_в.$$

Величины Q_1 и Q_2 связаны между собой формулой

$$\eta = Q_1/Q_2.$$

На основании закона сохранения энергии составляем уравнение теплового баланса:

$$c_{\text{в}} m_{\text{в}} (T_1 - T_2) + \lambda m_{\text{в}} = r_{\text{ф}} m_{\text{ф}} \eta.$$

Решив это уравнение относительно $m_{\text{ф}}$, найдем

$$m_{\text{ф}} = \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}} (T_1 - T_2) + \lambda m_{\text{в}}}{r_{\text{ф}} \eta}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$m_{\text{ф}} = \frac{0,150 \text{ кг} \cdot [4187 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 16 \text{ К} = 3632 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}]}{1,68 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot 0,80}.$$

Ответ: Масса испарившегося фреона равна примерно 0,044 кг.

А.В. Гаврилов, Л.В. Горбанева, А.Ф. Немцев

**Физика: методическое пособие для участников
летней (очной) сессии**

ВЫПУСК 10

Методическое пособие по физике для учащихся и преподавателей

Подписано к печати 28.07.2016 г. Формат 60х84 1/16.

Тираж 65 экз.

КГБОУ ДО ХКЦРТДиЮ

680000, г. Хабаровск, ул. Комсомольская, 87

© КГБОУ ДО ХКЦРТДиЮ, 2016

© А.В. Гаврилов, Л.В. Горбанева, А.Ф. Немцев, 2016