

«ТЕРМОДИНАМИКА».

Внутренняя энергия идеального газа пропорциональна его температуре.

U – внутренняя энергия [U] = Дж

$$U = \frac{i}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot T$$

i – степень свободы молекул, для идеального одноатомного газа возможны 3 поступательные степени свободы ($i=3$), для идеального двухатомного газа добавляются 2 вращательные степени свободы ($i=5$), для трехатомных молекул характерны еще колебательные степени свободы (их количество зависит от типа связей атомов в молекуле).

Для данной массы газа (для заданного количества вещества) изменение (разница

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot \Delta T$$

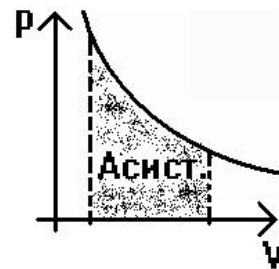
конечного и начального значений величины) внутренней энергии пропорционально изменению температуры. Внутреннюю энергию системы можно изменить двумя способами: совершая работу или путем теплопередачи. По характеру переноса энергии теплопередача классифицируется на теплопроводность (перенос энергии без переноса вещества), конвекцию (перенос энергии потоками самого вещества) и излучение (перенос энергии с помощью волн).

Работа в термодинамике.

Будем различать работу термодинамической системы над внешними силами ($A_{\text{сист.}}$, [$A_{\text{сист.}}$] = Дж) и работу внешних сил над термодинамической системой ($A_{\text{внеш.}}$, [$A_{\text{внеш.}}$] = Дж). Данные величины равны по модулю и противоположны по знаку.

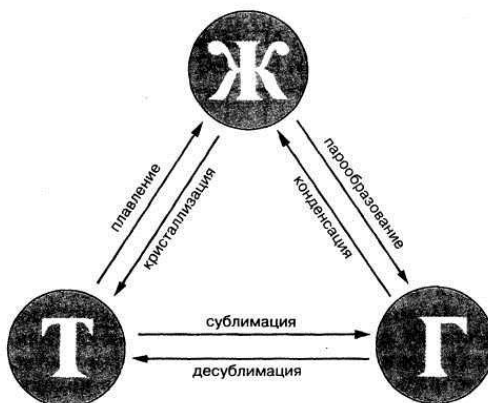
	Сжатие системы	Расширение системы
$A_{\text{сист.}}$	< 0	> 0
$A_{\text{внеш.}}$	> 0	< 0

Величину работы термодинамической системы $A_{\text{сист.}}$ можно определить графически, а если давление в ходе процесса не изменяется, то прибегать к графическому методу не требуется, так как это легко сделать алгебраически $A_{\text{сист.}} = p \cdot \Delta V$.



Количество теплоты – (Q , [Q] = Дж) - энергия теплопередачи.

На диаграмме указаны названия тепловых процессов переходов между основными агрегатными состояниями (Г – газ, Ж – жидкость, Т – твердое тело)



Тепловой процесс	Q	Табличные величины
Нагревание Охлаждение	$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$	c – удельная теплоемкость [c] = Дж/(кг·К)
Плавление Кристаллизация	$Q = \pm \lambda \cdot m$	λ - удельная теплота плавления [λ] = Дж/кг
Парообразование Конденсация	$Q = \pm r \cdot m$	r - удельная теплота парообразования [r] = Дж/кг
Сгорание топлива	$Q = q \cdot m$	q - удельная теплота сгорания топлива [q] = Дж/кг

Уравнение теплового баланса:

Если система теплоизолирована от окружающей среды, то с течением времени в ней установится тепловое равновесие, характеризуемое равенством температуры для всех точек этой

системы, а сумма количеств теплот процессов теплопередачи внутри системы будет равна нулю.

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0.$$

Первое начало термодинамики.

Итак, внутреннюю энергию системы можно изменить, совершая над ней работу и передавая ей тепло: $\Delta U = A_{\text{внеш.}} + Q$.

Такой же смысл в выражении: *количество теплоты, переданное в систему, идет на изменение ее внутренней энергии и работу системы над внешними силами*: $Q = \Delta U + A_{\text{сист.}}$.

Применяя первое начало термодинамики к изопроцессам, получают частные случаи данного общего уравнения:

Процесс	Изотермич.	Изобарич.	Изохорич.
Признак	$\Delta T = 0$	$\Delta p = 0$	$\Delta V = 0$
Количество теплоты	Q	Q	Q
Работа системы	$A_{\text{сист.}}$	$A_{\text{сист.}}$	0
Изменение внутренней энергии	0	ΔU	ΔU
I начало	$Q = A_{\text{сист.}}$	$Q = \Delta U + A_{\text{сист.}}$	$Q = \Delta U$

Вводят абстрактную модель адиабатного процесса без теплообмена термодинамической системы с окружающей средой, для которого $Q = 0$ и $A_{\text{сист.}} = -\Delta U$. Это свидетельствует о невозможности построения вечного двигателя первого рода (без подвода тепла), так как исчерпав запас внутренней энергии он будет не способен к работе над внешними телами.

Теплоемкость.

Кроме удельной теплоемкости (с) тела выделяют *полную теплоемкость* (С) тела: $C = c \cdot m$, $[C] = \text{Дж/К}$, такую что $Q = C \cdot \Delta T$.

А так же используют понятие *молярной теплоемкости* (c_{μ} , $[c_{\mu}] = \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$) тела, такой что $Q = c_{\mu} \cdot \nu \cdot \Delta T$. Различают молярную теплоемкость при изохорическом процессе ($c_{\mu V} = i \cdot R / 2$) и

молярную теплоемкость при изобарическом процессе ($c_{\mu p}$). Связь между указанными величинами выведена Р.Майером: $c_{\mu p} = c_{\mu v} + R$.

Второе начало термодинамики устанавливает направление протекания тепловых процессов от тела более нагретого к телу менее нагретому и формулируется следующим образом: *невозможно перевести тепло от тела менее нагретого к телу более нагретому без одновременного изменения в обеих системах или окружающих их телах.*

Тепловые двигатели – устройства, превращающие тепловую энергию в механическую работу. Принцип действия заключается в получении тепла рабочим телом от нагревателя (Q_1), совершении механической работы рабочим телом и выделении части тепла в холодильник (Q_2). Коэффициент полезного действия тепловых машин вычисляется по формуле:

$$КПД = \frac{A_{цикла}}{Q_{нагревателя}} \cdot 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

Идеальная тепловая машина, цикл которой состоит из двух изотерм и двух адиабат, имеет максимально возможный КПД:

$$КПД_{макс.} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$$

КПД тепловых машин невысок, так как холодильником служит обычно окружающая среда (воздух, вода), имеющая вполне определенную и довольно высокую температуру.

«НАСЫЩЕННЫЕ ПАРЫ».

Процессы испарения и конденсации происходят в природе одновременно. Состояние скомпенсированности этих процессов (т.е. когда количество молекул, покидающих жидкость в единицу времени, и количество молекул, возвращающихся из пара за тоже

время, одинаковы) называется динамическим равновесием между жидкостью и ее паром.

Насыщенным паром называется газ, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

Зависимость насыщенного пара от температуры нелинейна, в отличие от зависимости идеального газа от температуры, изображаемой в виде изохоры.

Реальные газы являются ненасыщенными парами. Получение насыщенного пара возможно в момент начала конденсации при сжатии реальных газов. Насыщенные пары можно получить при охлаждении ненасыщенных паров. Температура такого перехода называется *точкой росы*.

Влажность воздуха.

Абсолютной влажностью называется плотность водяного пара (ρ , $[\rho] = \text{кг/м}^3$), содержащегося в воздухе.

Парциальное давление – давление, создаваемое водяным паром.

$$P_{\text{парц}} = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu_{\text{воды}}}$$

Относительная влажность (φ , $[\varphi] = \%$) – отношение парциального давления к давлению насыщенного пара (или отношение абсолютной влажности к плотности насыщенного пара) при той же температуре. Зависимость давления (и плотности) насыщенного пара от температуры ввиду нелинейности фиксируется в справочных таблицах.

$$\varphi = \frac{P_{\text{парц}}}{P_{\text{насыщ.}}} \cdot 100\% = \frac{\rho_{\text{парц}}}{\rho_{\text{насыщ.}}} \cdot 100\%$$

Влажность измеряют психрометром.

«КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКОСТЯХ».

В результате взаимодействия молекул жидкости вдоль ее поверхности и перпендикулярно ее границе действует *сила*

поверхностного натяжения ($F_{\text{нат.}}$, $[F_{\text{нат.}}] = \text{Н}$), стремящаяся сократить длину границы (L , $[L] = \text{м}$) жидкости, так что: $F_{\text{нат.}} = \sigma \cdot L$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения $[\sigma] = \text{Н/м}$, который зависит от вида и состояния жидкости.

Чтобы увеличить площадь поверхности жидкости необходимо совершить работу $A = \sigma \cdot \Delta S$, где ΔS - изменение площади поверхности жидкости (ΔS , $[\Delta S] = \text{м}^2$).

Смачивание – явление, вызванное взаимодействием молекул жидкости с молекулами твердого тела и проявляющееся в искривлении поверхности жидкости у поверхности твердого тела. Если сила взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела больше силы взаимодействия молекул жидкости друг с другом, то жидкость смачивает твердое тело и ее уровень у поверхности твердого тела выше, чем на некотором расстоянии от твердого тела.

Капиллярные явления – подъем или опускание жидкостей в узких трубках (капиллярах) вследствие смачивания. Высота (h , $[h] = \text{м}$) подъема жидкости в капилляре радиуса (R , $[R] = \text{м}$) вычисляется по формуле, где ρ – плотность жидкости, $[\rho] = \text{кг/м}^3$, g – ускорение свободного падения.

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot R}$$

«ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА».

Кристалл – твердое тело с упорядоченной микроструктурой (кристаллическая решетка). Всем кристаллам присуще свойство *анизотропии* – зависимости физических свойств от направления воздействия внутри твердого тела. Все кристаллы плавятся.

Аморфное тело - твердое тело без упорядоченной микроструктуры. Большинство аморфных тел изотропны (однако,

существуют и анизотропные аморфные тела). При повышении температуры и наложении длительных нагрузок аморфные тела «текут». Аморфные тела не имеют температуры плавления, они плавятся постепенно. Аморфные тела при коротковременных нагрузках проявляют свойство упругости. Молекулы аморфных тел ведут себя подобно молекулам жидкости.

Деформация – изменение формы или объема тела.

Деформации классифицируются на упругие (исчезающие после снятия нагрузок) и пластичные (не исчезающие после снятия нагрузок).

Различают следующие виды деформаций:

- растяжение-сжатие (однородное изменение линейных размеров тела)
- сдвиг (однородное смещение слоев тела друг относительно друга)
- изгиб (неоднородное растяжение-сжатие)
- кручение (неоднородный сдвиг)

Механическое напряжение (σ , $[\sigma]=\text{Па}$) – отношение модуля силы упругости ($F_{\text{упр.}}$, $[F_{\text{упр.}}]=\text{Н}$) к площади поперечного сечения (S , $[S]=\text{м}^2$) тела. $\sigma = F_{\text{упр.}} / S$.

Абсолютное удлинение (ΔL , $[\Delta L]=\text{м}$) – изменение линейных размеров тела.

Относительное удлинение (ε , $[\varepsilon]=1$) – модуль отношения абсолютного удлинения к первоначальной длине (L_0 , $[L_0]=\text{м}$) образца. $\varepsilon = | \Delta L / L_0 |$.

Закон Гука: при малых деформациях механическое напряжение пропорционально относительному удлинению образца. $\sigma = E \cdot \varepsilon$, где E – модуль упругости Юнга ($[E] = \text{Па}$) – величина определяемая

экспериментально, заносится в справочные таблицы, для различных материалов различна.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

Пример №1. В изотермическом процессе газ получил 200 Дж теплоты. После этого в адиабатическом процессе он совершил работу в 2 раза большую, чем в первом процессе. На сколько уменьшилась внутренняя энергия газа в результате этих двух процессов?

Дано:	Решение:
$Q_1=200$ Дж $A_2=2 \cdot A_1$ $T_1=const$ $Q_2=0$ Дж	Первое начало термодинамики для первого процесса $Q_1 = \Delta U_1 + A_1$ с учетом его изотермического характера: $Q_1 = A_1$, так как $\Delta U_1 = 0$.
Найти: ΔU -?	Первое начало термодинамики для второго процесса $Q_2 = \Delta U_2 + A_2$ с учетом его адиабатического характера $\Delta U = \Delta U_2 = -A_2$. Тогда $\Delta U = -A_2 = -2 \cdot A_1 = -2 \cdot Q_1 = -400$ Дж.

Пример №2 На рисунке изображены два циклических процесса 1-2-3-1 и 1-3-4-1. У какого цикла КПД больше и во сколько раз? Рабочее тело идеальный одноатомный газ.

Дано:	Решение:
	$KПД = \frac{A_{цикла}}{Q_{нагревателя}} \cdot 100\%$ Работа за цикл численно равна площади, ограниченной петлей цикла. В обоих циклах $A_{1-2-3-1} = A_{1-3-4-1} = \frac{1}{2} \cdot (3p_0 - p_0) \cdot (5V_0 - V_0) =$

Найти:

$$\frac{KПД_{1-2-3-1}}{KПД_{1-3-4-1}} - ?$$

$$4p_0V_0.$$

В цикле 1-2-3-1 рабочее тело получало тепло на участке 1-2 (изохорическое нагревание) и на участке 2-3 (изобарическое расширение):

$Q_{1-2-3-1} = Q_{1-2} + Q_{2-3}$. С учетом первого начала термодинамики данное уравнение перепишем в виде: $Q_{1-2-3-1} = \Delta U_{1-2} + A_{1-2} + \Delta U_{2-3} + A_{2-3}$. Работа изохорического процесса равна нулю: $A_{1-2} = 0$. Работа изобарического процесса $A_{2-3} = p \cdot \Delta V = 3p_0 \cdot (5V_0 - V_0) = 12p_0V_0$.

Изменения внутренней энергии соответственно равны: $\Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$, $\Delta U_{2-3} = \frac{3}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot (T_3 - T_2)$ и

$$\begin{aligned} \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} &= \frac{3}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot (T_2 - T_1) + \frac{3}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot (T_3 - T_2) = \\ &= \frac{3}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot (T_3 - T_1) = \frac{3}{2} \cdot (p_3V_3 - p_1V_1) = \frac{3}{2} \cdot (15p_0V_0 - p_0V_0) = \\ &= 21p_0V_0. \end{aligned}$$

Таким образом $Q_{1-2-3-1} = 21p_0V_0 + 12p_0V_0 = 33p_0V_0$.

В цикле 1-3-4-1 рабочее тело получало тепло на участке 1-3: $Q_{1-3-4-1} = \Delta U_{1-3} + A_{1-3}$.

Изменение внутренней энергии уже было вычислено: $\Delta U_{1-3} = 21p_0V_0$.

Работа на участке 1-3 вычисляется как площадь криволинейной трапеции:

$$A_{1-3} = \frac{1}{2} \cdot (3p_0 + p_0) \cdot (5V_0 - V_0) = 8p_0V_0.$$

Таким образом $Q_{1-3-4-1} = 21p_0V_0 + 8p_0V_0 = 29p_0V_0$.

$$\frac{КПД_{1-2-3-1}}{КПД_{1-3-4-1}} = \frac{4p_0V_0 / 33p_0V_0}{4p_0V_0 / 29p_0V_0} = \frac{29}{33}.$$

Пример №3. В сосуде объемом 40 м^3 находится воздух влажностью 20%. Какую массу воды нужно испарить при данной температуре, чтобы повысить влажность до 50%? Плотность насыщенного пара при данной температуре $17,3 \text{ г/м}^3$.

Дано:	Решение:
$V=40 \text{ м}^3$ $\varphi_1=20\%$ $\varphi_2=50\%$ $\rho_{\text{насыщ.}} = 17,3 \text{ г/м}^3$	$\varphi_1 = \frac{\rho_{\text{парц}_1}}{\rho_{\text{насыщ.}}} \cdot 100\%, \quad \varphi_2 = \frac{\rho_{\text{парц}_2}}{\rho_{\text{насыщ.}}} \cdot 100\%.$ $\rho_{\text{парц}_1} = \frac{m_1}{V}, \quad \rho_{\text{парц}_2} = \frac{m_2}{V}.$
Найти: Δm -?	$m_1 = \rho_{\text{парц}_1} \cdot V, \quad m_2 = \rho_{\text{парц}_2} \cdot V.$ $\Delta m = m_2 - m_1 = (\rho_{\text{парц}_2} - \rho_{\text{парц}_1}) \cdot V.$ <p>Из формул влажности:</p> $\rho_{\text{парц}_1} = \frac{\varphi_1 \cdot \rho_{\text{насыщ.}}}{100\%}, \quad \rho_{\text{парц}_2} = \frac{\varphi_2 \cdot \rho_{\text{насыщ.}}}{100\%}, \text{ тогда:}$ $\Delta m = \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{100\%} \right) \cdot \rho_{\text{насыщ.}} \cdot V.$ <p>После вычислений: $\Delta m=207 \text{ г}.$</p>

Пример №4. Образец имеет длину 5 м и площадь поперечного сечения $2,5 \text{ мм}^2$. После приложения силы 100 Н абсолютное удлинение образца составило 1 мм. Найдите механическое напряжение и модуль Юнга материала образца.

Дано:	Решение:
-------	----------

$L_0=5 \text{ м}$ $S=2,5 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ $\Delta L=10^{-3} \text{ м}$ $F=100 \text{ Н}$	По определению механического напряжения: $\sigma = F/S=100 \text{ Н}/2,5 \cdot 10^6 \text{ м}^2 = 4 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Относительное удлинение: $\varepsilon = \Delta L/ L_0 $. По закону Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, тогда $\sigma = E \cdot \Delta L/ L_0 $, значит $E = \sigma/ \Delta L/ L_0 $. $E = 4 \cdot 10^7 \text{ Па} \cdot 5 \text{ м}/10^{-3} \text{ м} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па} = 20 \text{ ГПа}$.
Найти: σ - ? E - ?	

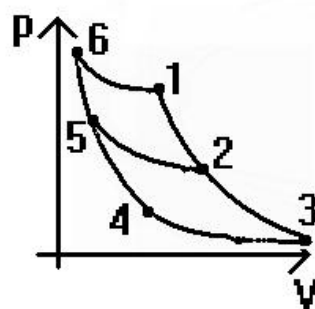
Пример №5. В дне сосуда с ртутью имеется отверстие. Какова может быть максимальная высота столба ртути, чтобы ртуть не выливалась из отверстия диаметром 1 мм? Считать, что ртуть не смачивает материал, из которого изготовлен сосуд. Коэффициент поверхностного натяжения ртути 470 мН/м. Плотность ртути 13600 кг/м³.

Дано:	Решение:
$\sigma=0,47 \text{ Н/м}$ $d=10^{-3} \text{ м}$ $\rho=13600 \text{ кг/м}^3$	Сила поверхностного натяжения: $F_{\text{нат.}} = \sigma \cdot L$, где $L=2 \cdot \pi \cdot R= \pi \cdot d$ – длина окружности – границы отверстия, а значит и действия силы поверхностного натяжения.
Найти: h - ?	Таким образом: $F_{\text{нат.}} = \sigma \cdot \pi \cdot d$. Сила поверхностного натяжения должна уравновешивать силу тяжести, которая равна: $F_{\text{тяж.}} = m \cdot g= \rho \cdot V \cdot g= \rho \cdot S \cdot h \cdot g= \rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h \cdot g/4$. Тогда $F_{\text{нат.}} = F_{\text{тяж.}} \rightarrow \sigma \cdot \pi \cdot d = \rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h \cdot g/4$. $\sigma = \rho \cdot d \cdot h \cdot g/4$. $h = 4 \cdot \sigma/(\rho \cdot d \cdot g)$. После вычислений: $h = 14 \text{ мм}$.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

"ТЕРМОДИНАМИКА."

1. Газу передано количество теплоты 100 Дж и внешние силы совершили над ним работу 300 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа?
2. При нагревании 2 моль аргона внутренняя энергия газа возросла на 250 Дж. На сколько градусов возросла его температура?
3. В сосуде содержится смесь из 200 г воды и 130 г льда при температуре 0°C . В этот сосуд впускают 5 г водяного пара при 100°C . Найти окончательную температуру и состав смеси.
4. Для нагревания 2 кг газа на 5 К при постоянном давлении требуется 9,1 кДж теплоты, а при постоянном объеме необходимо 6,5 кДж теплоты. Что это за газ?
5. При адиабатическом процессе газом была совершена работа 10 Дж. Как изменилась внутренняя энергия газа?
6. Тепловая машина с максимально возможным КПД получает от нагревателя, температура которого 500 К, за один цикл количество теплоты 3360 Дж. Температура холодильника 400 К. Найдите КПД тепловой машины и ее работу за один цикл.
7. Сколько тепла выделится, если 2 л кипятка охладить до 20°C ?
8. Процессы 1-2-3 и 4-5-6 адиабатические. Процессы 6-1, 5-2, 4-3 изотермические. КПД цикла 1-2-5-6-1 составляет 33%. КПД цикла 2-3-4-5-2 составляет 50%. Найдите КПД цикла 1-2-3-4-5-6-1.
9. В теплоизолированном сосуде находится вода массой 500 г и лед массой 60 г при температуре 0°C . В воду впускается водяной пар массой 10 г при температуре 100°C . Какой станет температура воды



в сосуде после установления теплового равновесия? Теплоемкость сосуда не учитывать.

10. При нагревании на 7 К идеального одноатомного газа его внутренняя энергия увеличилась на 348,6 Дж. Определить количество вещества данного газа.

11. Небольшой стержень составлен из трех кусков одинаковых размеров, плотности которых равны $1,8 \text{ г/см}^3$; $7,3 \text{ г/см}^3$; $8,9 \text{ г/см}^3$, а удельные теплоемкости соответственно равны $1300 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $230 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $460 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Определить количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг такого стержня на 1 К.

12. Воздух в комнате объемом 90 м^3 нагревается на 10 К. Какой объем горячей воды должен пройти для этого через радиаторы водяного отопления? Вода при прохождении через радиаторы охлаждается на 20 К. Потери тепла составляют 50%. Удельная теплоемкость воздуха в данном случае равна $1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Плотность воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$.

13. Тепловая машина совершает идеальный цикл Карно, получая от нагревателя 42 кДж теплоты. Какую работу она совершает за цикл, если абсолютная температура нагревателя в 3 раза больше абсолютной температуры холодильника?

"НАСЫЩЕННЫЕ ПАРЫ."

14. Температура воздуха 16°C , точка росы 6°C . Определите абсолютную и относительную влажность воздуха. Давление насыщенных паров при 6°C составляет 933 Па, а при 16°C - 1813 Па.

15. В котел объемом 5 м^3 накачали 20 кг воды и нагрели до 180°C . Найти массу и давление пара в котле, если при данной температуре плотность насыщенных паров составляет $5,05 \text{ кг/м}^3$.

"КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКОСТЯХ. "

16. Соломинка длиной 8 см неподвижна на поверхности воды. По одну сторону от соломинки наливают мыльный раствор. Под действием какой силы, и в каком направлении начнет двигаться соломинка? Коэффициент поверхностного натяжения воды 73 мН/м.

17. В дне чайника имеется круглое отверстие диаметром 0,1 мм. До какой высоты можно налить в чайник воду, чтобы она не вытекала через отверстие? Изменится ли ответ, если воду нагревать?

18. На какую высоту поднимется вода по капилляру диаметром 1 мкм?

"ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА."

19. Проволока длиной 5,4 м под действием нагрузки удлинилась на 2,7 мм. Определить относительное удлинение проволоки.

20. Груз весом 5 кН висит на тросе диаметром поперечного сечения 28 мм. Найдите механическое напряжение в тросе.