

## 5 Молекулярно-кинетическая теория

### 5.1 Молекулярное строение вещества

5.1.1<sup>0</sup> Почему газ сжать легче, чем жидкость или твердое тело?

5.1.2<sup>0</sup> Если молекулы движутся непрерывно и хаотично, почему твердые тела не распадаются на молекулы?

5.1.3<sup>0</sup> Как изменилось бы давление в сосуде с газом, если бы внезапно исчезли силы притяжения между его молекулами?

5.1.4 Какое количество вещества содержится в 300 г воды?

5.1.5 Какое количество вещества содержится в железное детали массой 56 кг?

5.1.6 Какова масса 30 молей серной кислоты?

5.1.7 Какова масса 3 молей поваренной соли?

5.1.8 Какой объем занимают 12 молей алюминия?

5.1.9 Какой объем занимают 100 молей ртути?

5.1.10 Сколько атомов содержится в 250 г гелия?

5.1.11 Сколько атомов содержится в серебряной ложке массой 54г?

5.1.12 Сколько молекул содержится в 2 г кислорода?

5.1.13 Сравните число атомов в стальной и алюминиевой ложках равного объема.

5.1.14 Вода из стакана полностью испарилась за 20 суток. Сколько молекул в среднем за сутки испарялось с поверхности воды? Первоначальная масса воды в стакане была 200 г.

5.1.15 При никелировании изделия его покрывают слоем никеля толщиной 1,5 мкм. Сколько атомов никеля содержится в покрытии, если площадь поверхности изделия равна 400 см<sup>2</sup>?

5.1.16 На изделие, поверхность которого равна 25 см<sup>2</sup>, нанесен слой хрома толщиной 2 мкм. Сколько атомов хрома содержит покрытие?

5.1.17 В озеро, имеющее среднюю глубину 10 м и площадь поверхности 20 км<sup>2</sup>, бросили кристаллик поваренной соли массой 0,01 г. Сколько ионов натрия этой соли оказалось бы в наперстке воды объемом 2 см<sup>3</sup>, зачерпнутой из озера, если предположить, что соль, растворившись, равномерно распределилась по всему объему воды?

5.1.18 Капля масла объемом 0,003 мм<sup>3</sup> растеклась по поверхности воды тонким слоем и заняла площадь 300 см<sup>2</sup>. Принимая толщину слоя равной диаметру молекулы масла, определите их диаметр.

## 5.2 Закон Бойля-Мариотта

- 5.2.1** Газ изотермически сжимают от объема 10 л до объема 4 л. Давление при этом увеличилось на 3 атм. Найти какое давление было в газе при объеме 8 л.
- 5.2.2** При постоянной температуре объем газа увеличили на 125% от первоначального. На сколько процентов изменилось давление газа?
- 5.2.3** В вертикально поставленный цилиндр площадью основания  $40 \text{ см}^2$  вставлен поршень, под которым находится столб воздуха высотой 60 см. Насколько опустится поршень, если на него поставить груз массой 10 кг? Масса поршня 2 кг, атмосферное давление нормальное.
- 5.2.4** На какой глубине находился пузырек воздуха, если его объем при всплытии у поверхности воды оказался в 1,5 раза больше, чем под водой? Атмосферное давление у поверхности воды равно 760 мм.рт.ст.
- 5.2.5** Стеклянный сосуд наполнен воздухом при давлении 200 мм.рт.ст. Объем сосуда  $1000 \text{ см}^3$ . Какой объем воды войдет в сосуд, если в нем сделать отверстие на глубине 2 м от поверхности воды? Атмосферное давление 800 мм.рт.ст.
- 5.2.6** В закрытом цилиндрическом сосуде постоянного сечения  $1 \text{ см}^2$  находится газ при давлении 10 мм.рт.ст. Если сосуд расположить горизонтально, то находящийся внутри сосуда поршень делит объем сосуда в отношении 1:2. Если же сосуд поставить вертикально, то поршень установится посередине. Найти массу поршня, считая температуру постоянной.
- 5.2.7** Посередине откаченной и запаянной с обоих концов горизонтальной трубки длиной  $L = 1 \text{ м}$  находится столбик ртути длиной  $l = 20 \text{ см}$ . Если трубку поставить вертикально, столбик ртути сместиться на  $\Delta l = 10 \text{ см}$ . До какого давления была откачана трубка? Плотности ртути  $\rho = 1,36 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$ .
- 5.2.8** Запаянная с обоих концов горизонтально расположенная стеклянная трубка разделена столбиком ртути на две равные части. Длина каждого столбика воздуха 20 см. Давление  $p_0 = 750 \text{ мм.рт.ст}$ . Если трубку поставить вертикально, ртутный столбик опускается на 2 см. Определить длину столбика ртути.
- 5.2.9** В сосуд с ртутью опускают открытую стеклянную трубку, оставляя над поверхностью конец длиной  $l = 60 \text{ см}$ . Затем трубку закрывают и погружают еще на  $\Delta l = 30 \text{ см}$ . Определить высоту столба воздуха в трубке. Атмосферное давление равно  $p_0 = 760 \text{ мм.рт.ст}$ .
- 5.2.10** Открытую стеклянную трубку длиной  $l = 1 \text{ м}$  наполовину погружают в ртуть. Затем трубку закрывают пальцем и вынимают. Какой высоты столбик ртути останется в трубке? Атмосферное давление равно  $p_0 = 760 \text{ мм.рт.ст}$ .
- 5.2.11** Стеклянная трубка, запаянная с одного конца, расположена горизонтально. В трубке находится воздух, отделенный от атмосферы столбиком ртути длиной  $l$ . Длина трубки  $2l$ , длина столбика воздуха  $l/2$ , атмосферное давление  $p_0$ . На какое расстояние сместиться ртуть в трубке если: а) трубку поставить вертикально, открытым концом вверх; б) трубку поставить вертикально открытым концом вниз; в) горизонтально расположенную трубку

вращать вокруг вертикально оси, проходящей через открытый конец трубы с угловой скоростью  $\sqrt{g/l}$ ; г) горизонтально расположенную трубку вращать вокруг вертикальной оси, проходящей через закрытый конец трубы с угловой скоростью  $\sqrt{g/l}$ .

**5.2.12** Барометр дает неверные показания, т.к. в него попал пузырек воздуха, который находится на столбиком ртути. При давлении 755 мм.рт.ст барометр показывает 748 мм.рт.ст., а при 740 мм.рт.ст. - 736 мм.рт.ст. Каково показание барометра, если давление равно 760 мм.рт.ст

### 5.3 Закон Гей-Люссака и закон Шарля.

- 5.3.1** При какой температуре находился газ, если при нагревании его на  $\Delta t = 22^\circ\text{C}$  при постоянном давлении объем увеличился вдвое?
- 5.3.2** В цилиндре под поршнем находится воздух при давлении 200 кПа и температуре  $27^\circ\text{C}$ . Какой массы груз надо положить на поршень после нагревания воздуха до  $50^\circ$ , чтобы объем воздуха в цилиндре остался прежним? Площадь поршня равна  $30 \text{ см}^2$ .
- 5.3.3** Воздух в стакане, имеющем высоту 10 см и площадь дна  $25 \text{ см}^2$ , нагрет до  $87^\circ\text{C}$ . Стакан погружен вверх дном в воду так, что его дно находится на уровне поверхности воды. Сколько воды войдет в стакан, когда воздух в стакане примет температуру  $17^\circ\text{C}$ ? Атмосферное давление считать нормальным.
- 5.3.4** Резиновую лодку надули ранним утром, когда температура окружающего воздуха была  $7^\circ\text{C}$ . На сколько процентов увеличилось давление воздуха в лодке, если днем под лучами солнца он прогрелся до  $35^\circ\text{C}$ ?
- 5.3.5** Давление воздуха в автомобильной камере при температуре  $-13^\circ\text{C}$  было 160 кПа (избыточное над атмосферным). Каким станет давление, если в результате длительного движения автомобиля воздух в автомобильной камере нагрелся до  $37^\circ\text{C}$ ?
- 5.3.6** При какой температуре находился газ в закрытом сосуде, если при нагревании его на 140 К давление возросло в 1,5 раза?
- 5.3.7** При изготовлении электроламп их наполняют инертным газом при температуре  $150^\circ\text{C}$ . Под каким давлением должны наполняться лампы, чтобы при температуре  $300^\circ\text{C}$ , которая устанавливается при горении лампы, давление не превышало 0,1 МПа?
- 5.3.8** Бутылка, наполненная газом, плотно закрыта пробкой площадью сечения  $2,5 \text{ см}^2$ . До какой температуры надо нагреть газ, чтобы пробка вылетела из бутылки, если сила трения,держивающая пробку, равна 12 Н? Первоначальное давление воздуха в бутылке и наружное давление одинаковы и равны 100 кПа, а начальная температура равна  $-3^\circ\text{C}$ .
- 5.3.9** В открытой пробирке, вращающейся в горизонтальной плоскости с угловой скоростью  $10 \text{ c}^{-1}$  вокруг вертикальной оси, проходящей через край пробирки, находится столбик ртути длиной  $h = 1 \text{ см}$ , центр которого отстоит от оси вращения на расстояние  $r = 20 \text{ см}$ . До какой температуры  $T_2$  надо нагреть пробирку, чтобы при увеличении угловой скорости в 4 раза столбик ртути не сместился? Начальную температуру и давление считать нормальными.

## 5.4 Графические задачи на изопроцессы

**5.4.1** С некоторой массой газа был проведен циклический процесс (Рис. 1). Перестроить графики в недостающих осях ( $P, V, T$ ). Определить точки, в которых: а) максимальна и минимальна температура; б) наибольшее и наименьшее давление; в) наибольший и наименьший объем.

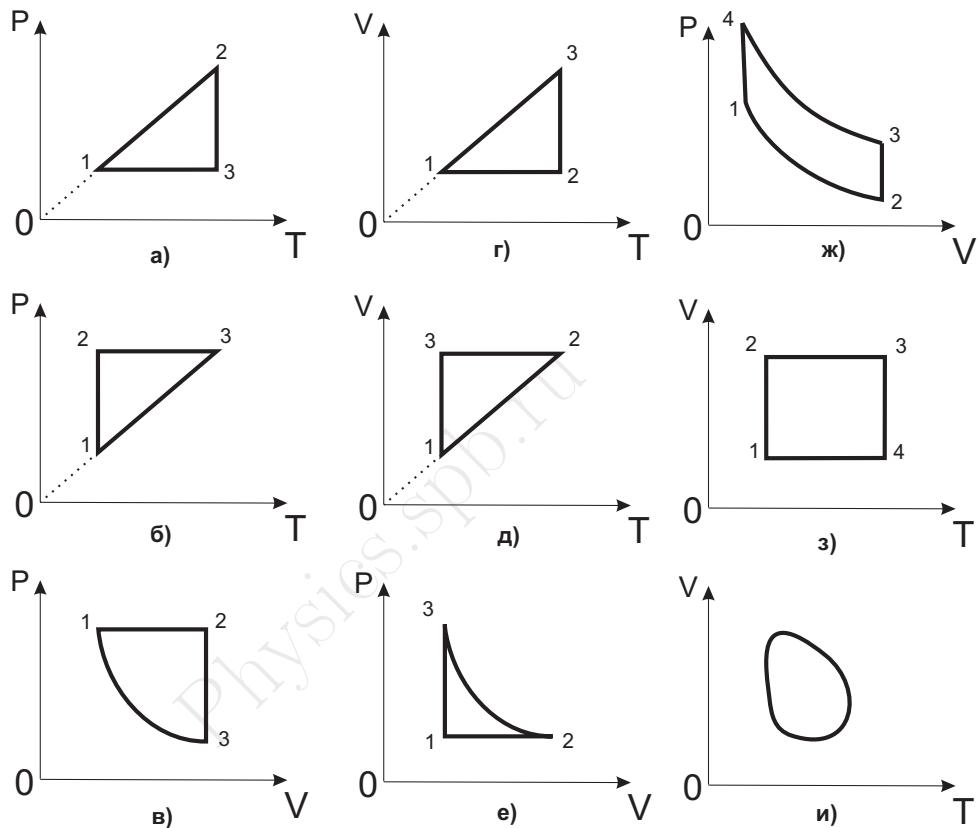


Рис. 1:

## 5.5 Уравнение Клапейрона-Менделеева

- 5.5.1** Определите температуру азота  $N_2$ , имеющего массу 2 г, занимающего объем 830 см<sup>3</sup> при давлении 0,2 МПа.
- 5.5.2** Определите плотность азота при температуре 27°C и давлении 100 кПа.
- 5.5.3** Газ массой 16 г при давлении 1 МПа и температуре 112°C занимает объем 1,6 л. Определите, какой это газ?
- 5.5.4** Перед тактом сжатия давление в цилиндре двигателя внутреннего сгорания равно 0,8 атм, а температура 50°C . Определить температуру смеси в конце такта сжатия, если при этом ее объем уменьшится в 5 раз, а давление увеличится до 7 атм.
- 5.5.5** В закрытом сосуде находится газ под давлением 500 кПа. Какое давление установится в этом сосуде, если после открытия крана 4/5 массы газа выйдет наружу?
- 5.5.6** Температура воздуха в комнате была равна 10°C , а после того как ее натопили, поднялась до 20°C . Объем комнаты 50 м<sup>3</sup>. Насколько изменилась масса воздуха, если давление оставалось нормальным атмосферным?
- 5.5.7** Некоторое количество водорода находится при температуре 200 К и давлении 400 Па. Газ нагревают до температуры 10<sup>4</sup>К, при которой молекулы водорода практически полностью распадаются на атомы. Определите давление газа, если объем и масса остались без изменения.
- 5.5.8** Определить плотность смеси, состоящей из 50 г кислорода и 20 г водорода при температуре 20°C и давлении 0,9 атм.
- 5.5.9** Сколько молекул содержится в 1 см<sup>3</sup> воздуха при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении?
- 5.5.10** В баллоне находилось некоторое количество газа при атмосферном давлении 10<sup>5</sup> Па и температуре 10°C . При открытом вентиле баллон был нагрет, после чего вентиль закрыли и газ остыл до температуры 10°C . При этом давление в баллоне упало до 0,7·10<sup>5</sup> Па. На сколько градусов нагревали баллон?
- 5.5.11** Цилиндрический сосуд делится на две равные части тонким подвижным поршнем. Каким будет равновесное положение поршня, когда в одну часть сосуда помещена некоторая масса кислорода, в другую - такая же масса водорода, если длина сосуда  $l = 85$  см.
- 5.5.12** Баллон содержит газ при температуре 27°C и давлении 40 атм. Каково будет давление в баллоне, если из него выпустить половину массы газа, а температуру при этом понизится до 0°C .
- 5.5.13** В закрытом цилиндрическом сосуде постоянного сечения находится газ при нормальных условиях. Сосуд расположен горизонтально и разделен легкоподвижным поршнем на две части в отношении 1:2. В каком отношении поршень будет делить сосуд, если его меньшую часть нагреть на 27°C , а большую охладить до -127°C .

**5.5.14** Определить массу ртути, которая войдет в стеклянный баллончик объемом  $V_1 = 5\text{ см}^3$  (Рис. 2), нагретый до  $t_1 = 400^\circ\text{C}$ , при его остывании до  $t_2 = 16^\circ\text{C}$ , если плотность ртути при  $t = 16^\circ\text{C}$  равна  $\rho = 13,6 \text{ г/см}^3$

**5.5.15** В цилиндре под поршнем площадью  $100 \text{ см}^2$  находится  $28 \text{ г}$  азота при температуре  $273 \text{ К}$ . На сколько поднимется поршень, если газ нагрели на  $100 \text{ К}$ , а масса поршня равна  $100 \text{ кг}$ . Атмосферное давление считать нормальным.

**5.5.16** В цилиндре, площадь основания которого, равна  $100 \text{ см}^2$ , находится воздух при температуре  $12^\circ\text{C}$ . Атмосферное давление  $101 \text{ кПа}$ . На высоте  $h_1 = 60 \text{ см}$  от основания цилиндра расположен поршень. На сколько опустится поршень, если на него поставить гирю массой  $100 \text{ кг}$ , а воздух в цилиндре при этом нагреть до  $27^\circ\text{C}$ ? Трение поршня о стенки и все самого поршня не учитывать.

**5.5.17** Два одинаковых баллона, содержащие газ при  $0^\circ\text{C}$ , соединены узкой горизонтальной трубкой диаметром  $5 \text{ мм}$ , посередине которой находится капелька ртути. Капелька делит весь сосуд на два равных объема по  $200 \text{ см}^3$ . На какое расстояние переместится капелька, если один баллон нагреть на  $2^\circ\text{C}$ , а другой на столько же охладить? Изменением объемов сосудов пренебречь.

**5.5.18** Как изменится объем пузырька воздуха при подъеме его со дна озера глубиной  $20 \text{ м}$  к поверхности воды? Температура на дне равна  $10^\circ\text{C}$ , а у поверхности  $20^\circ\text{C}$ .

## 5.6 Комбинированные задачи на газовые законы

**5.6.1** Воздушный шар объемом  $1000 \text{ м}^3$  наполнен водородом при  $20^\circ\text{C}$ . Сколько водорода выйдет из шара, если при неизменном давлении температура повысится до  $40^\circ\text{C}$ ?

**5.6.2** Сферическая оболочка воздушного шара, сообщающаяся с атмосферой, имеет диаметр  $10 \text{ м}$  и массу  $10 \text{ кг}$ . На сколько градусов надо нагреть воздух в шаре, чтобы он взлетел? Температура воздуха равна  $27^\circ\text{C}$ , атмосферное давление  $735 \text{ мм.рт.ст}$

**5.6.3** Сферическая оболочка шара сделана из материала, квадратный метр которого имеет массу  $1 \text{ кг}$ . Шар наполнен гелием при нормальном атмосферном давлении, температура воздуха и гелия  $0^\circ\text{C}$ . При каком минимальном радиусе шара он будет подниматься?

**5.6.4** Воздушный шар имеет газонепроницаемую оболочку массой  $400 \text{ кг}$  и содержит  $100 \text{ кг}$  гелия. Какой груз он может удерживать в воздухе на высоте, где температура воздуха  $17^\circ\text{C}$ , а давление  $10^5 \text{ Па}$ ? Считать, что оболочка шара не оказывает сопротивления изменению объема шара.

**5.6.5** Сколько балласта должен выбросить аэростат объемом  $300 \text{ м}^3$  для того, чтобы подняться с высоты, на которой барометр показывает  $730 \text{ мм.рт.ст}$  при температуре  $-15^\circ\text{C}$ , до высоты, на которой барометр показывает давление  $710 \text{ мм.рт.ст}$ , а температура равна  $-20^\circ\text{C}$ ?

**5.6.6** Воздушный шар объемом  $240 \text{ м}^3$ , заполненный водородом при температуре  $300 \text{ К}$ , поднимает полезный груз массой  $300 \text{ кг}$ . Какой полезный груз сможет поднять этот же воздушный шар, если заполнить его горячим воздухом при температуре  $400 \text{ К}$ ? До какой температуры

нужно нагреть воздух, чтобы воздушный шар, смог поднять груз массой 100 кг, как и при заполнении его водородом?

**5.6.7** Общая масса газонепроницаемой оболочки воздушного шара и его корзины равна 400 кг. Шар заполнен гелием массой 100 кг. Он может поднять в воздух груз массой 225 кг. Какую минимальную массу гелия нужно добавить в оболочку шара, чтобы шар поднял еще одного пассажира массой 50 кг? Считать, что оболочка шара не оказывает сопротивления изменению его объема, воздушных течений в вертикальном направлении нет. Температура и давление гелия внутри шара и воздуха снаружи шара соответственно одинаковы.

**5.6.8** Найти число ходов поршня, которое нужно сделать, чтобы поршневым воздушным насосом откачать воздух из сосуда емкостью  $V$  от давления  $p_0$  до давления  $p$ , если емкость насоса  $\Delta V$ .

**5.6.9** Объем камеры насоса равен  $V_0$ . За сколько циклов можно накачать автомобильную камеру объемом  $V$  от атмосферного давления до двух атмосфер? Считать, что температура остается неизменной.

**5.6.10** В цилиндре под поршнем площадью  $100 \text{ см}^2$  находится 28 г азота при температуре  $100^\circ\text{C}$ . К поршню через систему блоков подвешен груз массой 50 кг (Рис. 3). Цилиндр охлаждается до  $0^\circ\text{C}$ . Насколько и в каком направлении сдвинется груз? Атмосферное давление нормальное, весом поршня пренебречь.

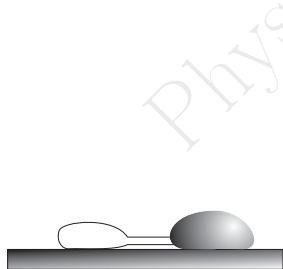


Рис. 2:

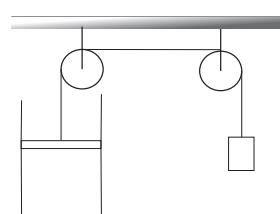


Рис. 3:

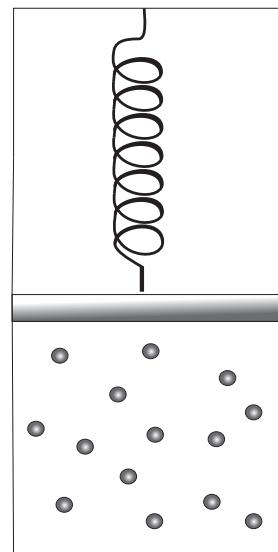


Рис. 4:

**5.6.11** В закрытом с обоих концов откаченном цилиндре подвешен на пружине скользящий без трения поршень, положение равновесия которого находится у дна цилиндра. В пространство под поршнем вводится такое количество газа, что поршень поднимается на высоту  $h$  (Рис. 4). На какой высоте установится поршень, если этот газ нагреть от  $T_0$  до  $T_1$ ? Считать, что пружина испытывает упругую деформацию.

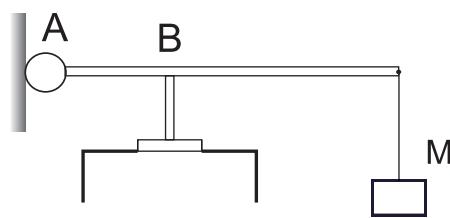


Рис. 5:

**5.6.12** В цилиндр объемом  $0,5 \text{ м}^3$  насосом закачивается воздух со скоростью  $0,002 \text{ кг/с}$ . В верхнем торце цилиндра есть отверстие, закрытое предохранительным клапаном. Клапан удерживается в закрытом состоянии стержнем, который может свободно поворачиваться вокруг оси в точке A (Рис. 5). К свободному концу стержня подвешен груз массой 2 кг. Клапан открывается через  $580 \text{ с}$  работы насоса, если в начальный момент времени давление воздуха в цилиндре было равно атмосферному. Площадь закрытого клапаном отверстия  $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , расстояние  $AB$  равно  $0,1 \text{ м}$ . Температура воздуха в цилиндре и снаружи не меняется и равна  $300 \text{ К}$ . Определите длину стержня, если его можно считать невесомым.

**5.6.13** Определить, каким был бы коэффициент объемного расширения газа, если бы за начальный объем  $V_0$  принимали бы объем не при  $0^\circ\text{C}$ , а при  $100^\circ\text{C}$ ?

## 5.7 Основное уравнение МКТ

- 5.7.1 Оценить среднюю скорость движения молекул водорода при нормальных условиях.
- 5.7.2 При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул азота равна второй космической скорости для Земли?
- 5.7.3<sup>0</sup> Почему на Луне нет атмосферы?
- 5.7.4 Каково давление азота, если средняя квадратичная скорость его молекул 500 м/с, а его плотность 1,35 кг/м<sup>3</sup>?
- 5.7.5 Какова средняя квадратичная скорость движения молекул газа, если, имея массу 6 кг, он занимает объем 5 м<sup>3</sup> при давлении 200 кПа?
- 5.7.6 Средние квадратичные скорости молекул водорода и кислорода 1840 м/с и 460 м/с. Сравните средние кинетические энергии этих молекул?
- 5.7.7 Плотность газа в баллоне электрической лампы  $\rho = 0,9\text{ кг}/\text{м}^3$ . При горении лампы давление в ней возросло от 0,8 атм до 1,1 атм. На сколько при этом увеличилась средняя квадратичная скорость движения молекул?
- 5.7.8 При какой температуре молекулы кислорода имеют такую же среднюю квадратичную скорость, что и молекулы азота при температуре 100°C ?
- 5.7.9 Два одинаковых сосуда, содержащие одинаковое количество гелия, соединены краном. В первом сосуде средняя скорость атомов равна 1000 м/с, во втором - 2000 м/с. Какой будет скорость, если кран открыть и сделать сосуды сообщающимися?
- 5.7.10 Два одинаковых сосуда содержат азот и кислород соответственно, причем концентрация молекул в сосудах одинакова. Сосуды соединены между собой короткой трубкой с краном. В первом сосуде средняя квадратичная скорость молекул 500 м/с, во втором - 400 м/с. Какой будет средняя квадратичная скорость молекул, если открыть кран и дать газам перемешаться? Теплообменом с окружающей средой пренебречь.
- 5.7.11 Средняя квадратичная скорость молекул аргона, при давлении 10<sup>5</sup> Па равна 414 м/с. Определить среднюю длину свободного пробега молекул аргона и частоту их столкновений.
- 5.7.12 Найти среднюю длину свободного пробега молекулы азота при температуре 0° и давлении 10<sup>-3</sup> мм.рт.ст
- 5.7.13 В баллоне объемом 2,53 л содержится углекислый газ при температуре 400 К и давлении 1,3 Па. Сколько столкновений происходит между молекулами за 1 с?