

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

Ивановский государственный химико-технологический университет

Сборник вопросов и задач по курсу

«Техника высокого вакуума»

Составитель Н.В. Холодкова

Иваново 2008

Составитель Н.В. Холодкова

УДК 533.5:531.78

Сборник вопросов и задач по курсу «Техника высокого вакуума» / Сост. Н.В. Холодкова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2008. – 64 с.

Сборник содержит задачи по двум разделам «Физика разреженных газов» и «Теоретические основы процесса откачки». Разделы включают необходимый для решения задач теоретический и справочный материал.

Третий раздел содержит варианты заданий двух расчетных работ по курсу. В четвертом разделе «Контрольные вопросы» приведены вопросы, которые позволяют студенту провести самоконтроль качества усвоения теоретического материала.

Сборник предназначен для студентов, обучающихся по направлениям 210100 "Электроника и микроэлектроника" и 150600 "Материаловедение и технология новых материалов" при изучении дисциплины "Техника высокого вакуума".

Рецензент

кандидат химических наук Н.Л. Овчинников (Ивановский государственный химико-технологический университет)

1. ФИЗИКА РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

Элементы кинетической теории и газовые законы

Идеальные газы подчиняется уравнению состояния Менделеева–Клапейрона

$$P \cdot V = N \cdot k \cdot T, \quad (1.1)$$

где P – давление газа, V – объем газа, N – число частиц газа в объеме, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана.

Общее число молекул в ν молях равно:

$$N = N_A \cdot \nu, \quad (1.2)$$

где N_A – число Авогадро.

Поэтому

$$P \cdot V = \nu \cdot R \cdot T, \quad (1.3)$$

где $R = k \cdot N_A$ – универсальная газовая постоянная.

Введя понятие мольного объема

$$v_m = \frac{V}{\nu}, \quad (1.4)$$

уравнению (1.3) можно придать другой вид:

$$P \cdot v_m = R \cdot T. \quad (1.5)$$

Во многих случаях целесообразно представлять уравнение (1.3) с использованием значения массы газа в явном виде:

$$P \cdot V = \frac{m_g}{M} \cdot R \cdot T, \quad (1.6)$$

где m_g – масса газа, $M = \frac{m_g}{\nu}$ – масса одного моля газа.

Закон Дальтона. Полное давление смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов.

Парциальным давлением газа, входящего в смесь, называется давление, под которым находился бы этот газ, если бы из смеси были удалены все остальные газы, а объем и температура сохранились прежними.

$$P_{см} = P_1 + P_2 + \dots + P_n, \quad (1.7)$$

где $P_{см}$ – полное давление смеси; P_1, P_2, \dots, P_n – парциальные давления.

Число молекул в единице объема

$$n = \frac{P}{kT}. \quad (1.8)$$

Основное уравнение кинетической теории газов имеет вид:

$$P = \frac{2}{3} \cdot n \cdot \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (1.9)$$

где m – масса молекулы, $\sqrt{V^2}$ – средняя квадратичная скорость молекулы.

При соударениях друг с другом или со стенками вакуумной камеры молекулы газа изменяют свои скорости как по величине, так и по направлению. В связи с этим возникло понятие функции распределения молекул по скоростям, введенное Максвеллом.

Закон распределения молекул по скоростям (закон Максвелла)

$$f(x) = \frac{dn_V}{n dV} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot V^2 \cdot e^{-\frac{mV^2}{2kT}}, \quad (1.10)$$

где dn_V – число молекул, скорости которых заключены в пределах от V до $V + \Delta V$.

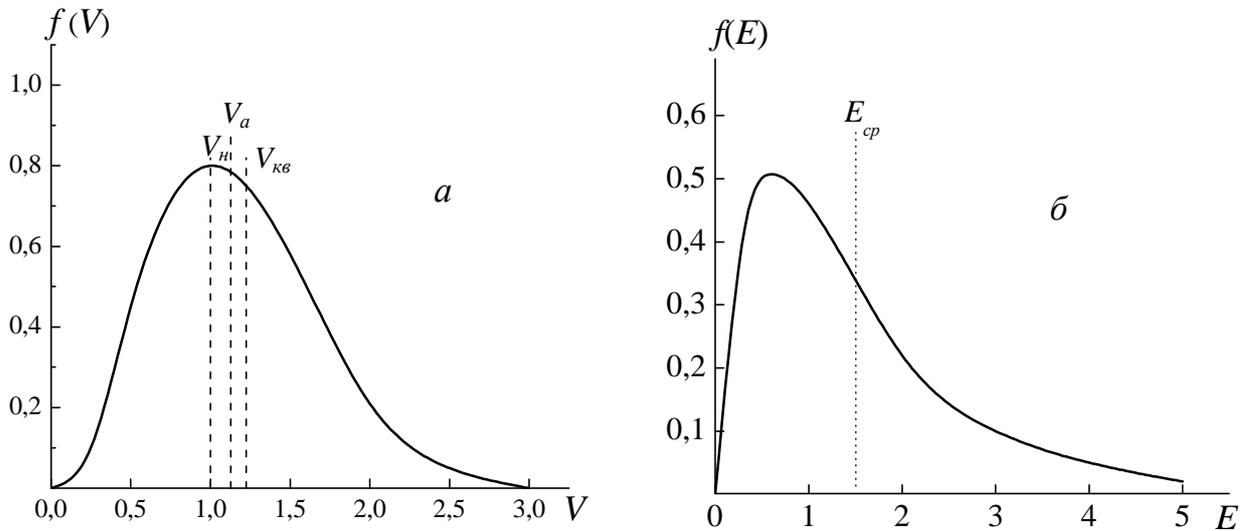


Рис. 1. Функции распределения Максвелла по скоростям (а) и по энергиям (б) в безразмерных единицах

Наивероятная скорость – скорость, при которой наблюдается максимум функции распределения (рис.1):

$$V_H = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (1.11)$$

Если ввести обозначение $U = \frac{V}{V_H}$, то (1.10) запишется в виде

$$\frac{dn_V}{ndU} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot U^2 \cdot e^{-U^2}. \quad (1.12)$$

Средняя квадратичная скорость молекулы

$$V_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (1.13)$$

Средняя арифметическая скорость:

$$V_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (1.14)$$

Распределение молекул по энергиям имеет вид (рис. 1)

$$\frac{dn_E}{n dE} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot (kT)^{-3/2} \cdot e^{-E/(kT)} \sqrt{E}, \quad (1.15)$$

где E – энергия поступательного движения молекулы, dn_E – число молекул, энергия которых лежит в интервале от E до $E + \Delta E$.

В дальнейшем мы будем обычно пользоваться средней арифметической скоростью и лишь при расчете кинетической энергии – средней квадратичной скоростью.

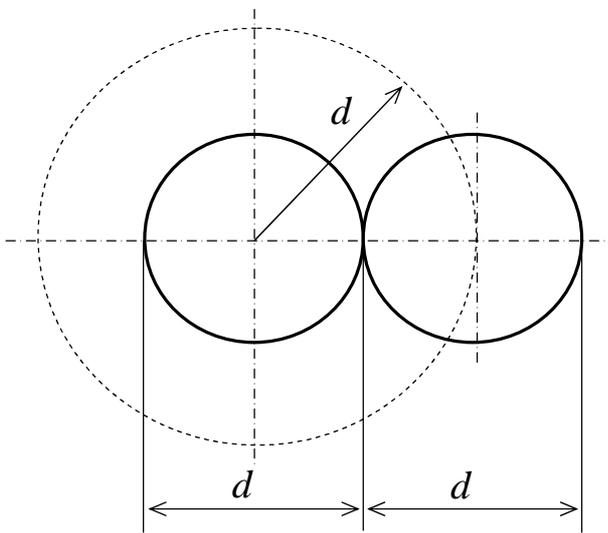


Рис. 2. Столкновение двух одинаковых молекул

Средняя длина свободного пробега определяется как расстояние, при прохождении которого частица в среднем сталкивается с одной молекулой среды. Столкновение может произойти, если расстояние между центрами молекул не более диаметра молекулы d (рис. 2).

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \sigma}, \quad \sigma = \pi \cdot d^2 \quad (1.16)$$

где σ – сечение соударения, d – эффективный диаметр молекулы (рис.2).

Средняя длина свободного пробега молекулы с учетом зависимости сечения соударения от температуры:

$$\lambda_T = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \sigma \cdot \left(1 + \frac{C}{T}\right)}. \quad (1.17)$$

где λ_T – средняя длина свободного пробега при температуре T , C – постоянная Сезерленда.

Среднее число молекул, сталкивающихся со стенкой:

$$Z = \frac{1}{4} \cdot n \cdot V = \frac{P}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T}. \quad (1.18)$$

ЗАДАЧИ

1. Найти среднюю арифметическую, среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 300 мм рт. ст. равна 0,3 г/л.
2. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на 50 м/с?
3. Найти температуру, при которой средняя квадратичная скорость молекул азота больше средней скорости на 40 м/с.
4. При какой температуре воздуха средние скорости молекул N_2 и O_2 отличаются на 30 м/с?
5. Средняя энергия молекул гелия равна $3,92 \cdot 10^{-21}$ Дж. Определить среднюю скорость молекул гелия.
6. Сколько молекул ударяется за 1 с об 1 м^2 стенки сосуда, в котором находится азот при давлении 1 атм и температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$?
7. В сферическом сосуде с внутренним радиусом 5 см содержится водород при температуре 300 К и давлении 10^5 Па. Сколько молекул ударяется о стенку за 1 с?
8. Баллон емкостью 12 л наполнен азотом при давлении $8,1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ и температуре $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Какое количество азота находится в баллоне?
9. Каков может быть наименьший объем баллона, вмещающего 6,4 кг кислорода, если его стенки при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ выдерживают давление в 160 кгс/см^2 ?
10. В сосуде находится 14 г азота и 9 г водорода при температуре $10 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 10^6 Н/м^2 . Рассчитать объем сосуда и массу одного киломоля смеси.

11. Найти среднюю квадратичную скорость молекул воздуха при $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, считая воздух однородным газом, масса одного киломоля которого равна 29 кг/кмоль .
12. Найти отношение средних квадратичных скоростей молекул азота и гелия при одинаковой температуре.
13. Найти число молекул водорода в 1 см^3 , если давление равно 200 мм рт. ст. , а средняя квадратичная скорость молекул при данных условиях равна 2400 м/с .
14. Плотность некоторого газа равна $6\cdot 10^{-2}\text{ кг/м}^3$, средняя квадратичная скорость молекул этого газа равна 500 м/с . Найти давление, которое газ оказывает на стенки сосуда.
15. В сферической колбе объемом 1 л находится азот. При какой плотности азота средняя длина свободного пробега молекул азота больше размеров сосуда?
16. Найти среднее число столкновений в 1 с молекул некоторого газа, если средняя длина свободного пробега при этих условиях равна $5\cdot 10^{-4}\text{ см}$, а средняя квадратичная скорость его молекул равна 500 м/с .
17. В сосуде находится углекислый газ. При некоторой температуре степень диссоциации молекул CO_2 на CO и O_2 равна 25% . Во сколько раз давление в сосуде при этих условиях будет больше того давления, которое имело бы место, если бы молекулы CO_2 не были диссоциированы?
18. Сколько молекул будет находиться в 1 см^3 сосуда при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, если давление в сосуде равно $10^{-11}\text{ мм рт. ст.}$?
19. Какое количество частиц находится в 16 г наполовину диссоциированного кислорода?
20. В сосуде объемом 2 л находится 10 г кислорода при давлении 680 мм рт. ст. Найти среднюю квадратичную скорость молекул газа; число молекул, находящихся в сосуде; плотность газа.

21. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа равна 450 м/с, давление газа равно $5 \cdot 10^4$ Н/м². Найти плотность газа при этих условиях.
22. Найти среднюю квадратичную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 750 мм рт. ст. равна $8,2 \cdot 10^{-5}$ г/см³. Чему равна масса одного киломоля этого газа, если значение плотности дано для температуры 17 °С?
23. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при нормальных условиях равна 461 м/с. Какое количество молекул содержится в 1 г этого газа?
24. Определить среднюю длину свободного пробега молекул CO₂ при 100 °С и давлении 0,1 мм рт. ст. Диаметр молекулы CO₂ $3,2 \cdot 10^{-8}$ см.
25. Определить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха при нормальных условиях. Диаметр молекулы воздуха $3 \cdot 10^{-8}$ см.
26. Найти среднее число столкновений в 1 с молекул CO₂ при 100 °С, если средняя длина свободного пробега при этих условиях равна $8,7 \cdot 10^{-2}$ см.
27. Найти среднее число столкновений в 1 с молекул азота при 27 °С и давлении 400 мм рт. ст. Диаметр молекулы азота $3 \cdot 10^{-8}$ см.
28. Во сколько раз уменьшится число столкновений в 1 с молекул двухатомного газа, если объем газа адиабатически увеличить в 2 раза?
29. Определить среднюю длину свободного пробега атомов гелия в условиях, когда плотность гелия равна $2,1 \cdot 10^5$ кг/м³.
30. Чему равна средняя длина свободного пробега молекул водорода при давлении 10^{-3} мм рт. ст. и температуре 50 °С?

31. При температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и некотором давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода равна $9,5 \cdot 10^{-8}$ м. Чему равно среднее число столкновений в 1 с молекул кислорода, если сосуд откачать до 0,01 первоначального давления? Температура газа остается неизменной.
32. При некоторых условиях средняя длина свободного пробега молекул газа равна $1,6 \cdot 10^{-7}$ м и средняя арифметическая скорость его молекул равна 1,95 км/с. Чему будет равно среднее число столкновений в 1 с молекул этого газа, если давление уменьшить в 1,27 раза?
33. В сосуде находится углекислый газ, плотность которого $1,7\text{ кг/м}^3$, а средняя длина свободного пробега его молекул при этих условиях равна $7,9 \cdot 10^{-6}$ см. Найти диаметр молекулы углекислого газа.
34. Найти среднее время между двумя последовательными столкновениями молекул азота при температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 1 мм рт. ст.
35. Сосуд с воздухом откачан до давления 10 мм рт.ст. Чему равна при этом плотность в сосуде, число молекул в 1 см^3 сосуда и средняя длина свободного пробега молекул? Диаметр молекулы воздуха $3 \cdot 10^{-8}$ см, а масса одного киломоля 29 кг/кмоль. Температура $17\text{ }^{\circ}\text{C}$.
36. Какое предельное число молекул газа должно находиться в 1 см^3 сферического сосуда, диаметр которого равен 15 см, чтобы молекулы не сталкивались друг с другом? Диаметр молекулы газа равен $3 \cdot 10^{-8}$ см.
37. Расстояние между катодом и анодом в разрядной трубке равно 15 см. Какое давление нужно создать в разрядной трубке, чтобы электроны не сталкивались с молекулами воздуха на пути от катода к аноду? Температура равна $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр молекулы воздуха считать равным $3 \cdot 10^{-8}$ см. Средняя длина свободного пробега электронов в газе приблизительно в 5,7 раза больше, чем средняя длина свободного пробега молекул самого газа.

38. Какое давление нужно создать внутри сферического сосуда, диаметр которого равен 100 см, чтобы молекулы не сталкивались друг с другом? Диаметр молекулы газа принять равными $3 \cdot 10^{-8}$ см и температуру равной 0°C .
39. Две сферы объемом 200 и 100 см³ соединены короткой трубкой, в которой имеется пористая перегородка. С ее помощью можно добиться равенства давлений в сосудах, но не температуры. Система находится при температуре 27°C и содержит кислород под давлением 760 мм рт. ст. Малая сфера помещается в сосуд со льдом при 0°C , а большая – в сосуд с паром при 100°C . Какое давление установится в системе? Тепловым расширением сосудов пренебречь.
40. Резервуар на 50 л соединен с резервуаром на 15 л с помощью специальной трубки, в которой имеется специальный клапан, позволяющий газу просачиваться из большего резервуара в малый, если давление в большем превышает давление в меньшем на 88 мм рт. ст. При 17°C больший резервуар содержит газ при атмосферном давлении, а меньший полностью вакуумирован. Каково будет давление в последнем, если оба резервуара нагреть до 162°C ?
41. Какую максимальную концентрацию молекул углекислого газа, газокинетический диаметр которых равен $3,2 \cdot 10^{-10}$ м, можно образовать в сферическом сосуде диаметром 1 м, чтобы средний пробег превосходил величину диаметра?
42. Каково давление в смеси газов емкостью 2 л, если в ней находится 10^{15} молекул кислорода и 10^{-7} г азота, а температура смеси 50°C ?
43. Определить давление и молекулярный вес смеси газов, состоящей из 10 г кислорода и 10 г азота, которые занимают объем 20 л при температуре 150°C .
44. В воздухе содержится 23,6 весовых процента кислорода и 76,4 весовых процента азота. Найти парциальные давления кислорода и азота при давлении 10^5 Па и температуре 20°C .

45. В сосуде находится двухатомный газ под давлением P и температуре T . Каково давление газа, если под действием некоторых факторов произошла диссоциация молекул на атомы? Степень диссоциации, т.е. доля диссоциированных молекул α .
46. Чему равно количество кислорода, находящегося в баллоне и его давление, если кинетическая энергия поступательного движения его молекул равна $2 \cdot 10^3$ Дж, а средняя квадратичная скорость молекул равна 10^3 м/с? Объем баллона равен $0,01$ м³.
47. Смесь азота и кислорода занимает объем $0,5$ л. Определить парциальные давления этих газов, если полное давление смеси составляет 100 Па, причем при давлении 100 Па азот занимал бы объем $0,4$ л, а кислород $0,1$ л.
48. Баллон емкостью V , наполненный газом при давлении P и температуре T , взвешивается. Его вес оказывается равным F . Затем из баллона откачивают газ, пока давление не упадет до P при той же температуре T . Вес баллона в этом случае F_1 . Определить из этих данных плотность газа при нормальных условиях: давлении P_0 и температуре T_0 .
49. Цилиндрический сосуд делится на две части подвижным поршнем, который может перемещаться без трения. Каким будет равновесное положение поршня, когда в обе части сосуда помещены одинаковые массы кислорода и водорода, если общая длина сосуда 85 см?
50. Тонкостенный стеклянный баллон при постоянной температуре был взвешен трижды: 1) откачанный; 2) заполненный воздухом; 3) заполненный неизвестным газом при $P = 1,52 \cdot 10^5$ Па. Значения весов оказались соответственно равны: $F_1 = 200$ г; $F_2 = 204$ г; $F_3 = 210$ г. Определить молекулярный вес неизвестного газа, если молекулярный вес воздуха 29 г/моль.
51. Рассчитать давление ртутного пара, создаваемое полностью испарившейся каплей ртути в 1 г в замкнутом баллоне 100 см³ при температуре 557 °С.

52. Имеется сосуд, разделенный неподвижной перегородкой на две равные части. В одном отсеке находится смесь азота и водорода. Второй отсек откачан до высокого вакуума. В перегородке имеется мембрана, проницаемая для молекул водорода, но не азота. После того, как заслонку убрали, давление в первом отсеке упало до 0,7 от первоначального. Температуру считать постоянной. Найти отношение массы азота к массе водорода. Изменится ли результат, если температуру правого и левого отсеков поддерживать постоянной, но равной?
53. Какое минимальное количество ртути надо поместить в замкнутый объем 100 см^3 при температуре $557 \text{ }^\circ\text{C}$, чтобы при полном испарении ртути достигалось насыщение баллона ртутным паром (давление насыщенных паров ртути при $557 \text{ }^\circ\text{C}$ равно 10^4 мм рт. ст.).
54. Вычислить объем занимаемый молекулами воздуха, ударяющимися в единицу времени о поверхность стенки сосуда площадью 5 см^2 при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Молекулярный вес воздуха 29 г/моль .
55. Для получения хорошего вакуума в стеклянном сосуде необходимо прогревать стенки сосуда при откачке с целью удалить адсорбированный газ. Вычислить, на сколько может повыситься давление в сферическом сосуде радиусом 10 см , если адсорбированные молекулы перейдут со стенок в сосуд? Площадь поперечного сечения молекулы считать равной 10^{-15} см^2 , слой мономолекулярный. Температура равна $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Явления переноса

Коэффициент динамической вязкости

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot V \cdot \lambda. \quad (1.19)$$

или

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot V \cdot \lambda. \quad (1.20)$$

где $\rho = n \cdot m$ – плотность газа.

Коэффициент теплопроводности газа:

$$k = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot V \cdot \lambda \cdot C_v. \quad (1.21)$$

где C_v – удельная теплоемкость газа.

Коэффициент самодиффузии газов:

$$D = \frac{1}{3} \cdot V \cdot \lambda. \quad (1.22)$$

Связь между коэффициентами переноса:

$$k = \eta \cdot C_v. \quad (1.23)$$

$$D = \eta / \rho. \quad (1.24)$$

Число молекул, прошедших путь x без столкновений:

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}. \quad (1.25)$$

Число молекул, средний пробег которых заключается между x и $x + dx$:

$$dn = \frac{1}{\lambda} \cdot n_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} \cdot dx. \quad (1.26)$$

ЗАДАЧИ

1. Требуется найти коэффициент диффузии водорода при нормальных условиях, если средняя длина свободного пробега молекул при этих условиях равна $1,6 \cdot 10^{-7}$ м.
2. Найти коэффициент диффузии гелия при нормальных условиях.
3. Найти количество азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку 100 см^2 за 10 с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном к площадке, равен $1,26 \text{ кг/м}^4$. Температура азота $27 \text{ }^\circ\text{C}$; средняя длина свободного пробега молекул азота 10^{-5} см.
4. При каком давлении отношение коэффициента внутреннего трения некоторого газа к коэффициенту его диффузии равно $0,3 \text{ г/л}$, а средняя квадратичная скорость его молекул равна 620 м/с ?
5. Найти среднюю длину свободного пробега молекул гелия при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт.ст. , если при этих условиях коэффициент внутреннего трения для него равен $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}\cdot\text{с}$.
6. Найти диаметр молекулы кислорода, если известно, что для кислорода коэффициент внутреннего трения при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ равен $18,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$.
7. Найти коэффициент внутреннего трения азота при нормальных условиях, если коэффициент диффузии для него при этих условиях равен $0,142 \text{ см}^2/\text{с}$.
8. Найти коэффициент диффузии и коэффициент внутреннего трения воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Диаметр молекулы воздуха $3 \cdot 10^{-8}$ м.
9. Коэффициенты диффузии и внутреннего трения водорода при некоторых условиях равны, соответственно $1,42 \text{ см}^2/\text{с}$ и $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$. Найти число молекул водорода в 1 м^3 при этих условиях.

10. Во сколько раз коэффициент внутреннего трения кислорода больше коэффициента внутреннего трения азота? Температура газов одинакова.
11. Коэффициенты диффузии и внутреннего трения кислорода равны соответственно $1,22 \cdot 10^5$ м²/с и $1,95 \cdot 10^{-5}$ кг/мс. Найти при этих условиях: плотность кислорода; среднюю длину свободного пробега; среднюю арифметическую скорость его молекулы.
12. Расстояние между нагретой и холодной поверхностями 10 мм, давление газа 750 мм рт.ст. Как изменится коэффициент теплопроводности газа, если давление снизится до 375 мм рт. ст.? Газ – воздух.
13. Расстояние между нагретой и холодной поверхностями 10 мм, давление газа 10^{-3} мм рт.ст. Как изменится коэффициент теплопроводности газа, если давление возрастет до $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.? Газ – воздух.
14. Расстояние между стенками дьюаровского сосуда равно 8 мм. При каком давлении теплопроводность воздуха, находящегося между стенками сосуда, начнет уменьшаться при откачке? Температура воздуха 17 °С; диаметр молекулы воздуха $3 \cdot 10^{-8}$ см.
15. До какого давления необходимо довести воздух в баллоне для алюминирования его поверхности, если навеска алюминия располагается на расстоянии 50 мм от наиболее удаленной точки поверхности баллона?
16. Найти коэффициент теплопроводности водорода, если известно, что коэффициент внутреннего трения для него при этих условиях равен $8,6 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м².
17. Найти коэффициент теплопроводности воздуха при температуре 10 °С и давлении 10^5 Н/см². Диаметр молекулы воздуха $3 \cdot 10^{-8}$ см.
18. В сосуде объемом 2 л находится $4 \cdot 10^{22}$ молекул двухатомного газа. Коэффициент теплопроводности газа равен 0,014 Вт/м·град. Найти коэффициент диффузии газа при этих условиях.

19. Углекислый газ и азот находятся при одинаковых температуре и давлении. Найти для этих газов отношение коэффициентов: 1) диффузии; 2) теплопроводности; 3) внутреннего трения. Диаметры молекул этих газов считать одинаковыми.
20. Теплопроводность гелия при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 1013 ГПа равна $0,143\text{ Вт/м}\cdot\text{град}$. Считая числовой коэффициент в выражениях для D , k и η равным $1/3$, оценить коэффициент самодиффузии D и вязкость η гелия при тех же условиях.
21. Коэффициент самодиффузии кислорода при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 1013 ГПа равен $1,8\cdot 10^2\text{ м}^2/\text{с}$. Оценить среднюю длину свободного пробега молекул кислорода при тех же условиях. Сравнить ее со средним расстоянием между стенками.
22. Вычислить коэффициент взаимной диффузии водорода и азота при 300 К и давлении 10^5 Па .
23. Коэффициент теплопроводности азота при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $3,1\cdot 10^{-5}\text{ кал/см}\cdot\text{с}\cdot\text{град}$. Определить газокинетический диаметр эффективного сечения молекул при этих условиях.
24. Коэффициент внутреннего трения азота при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $1,68\cdot 10^{-4}\text{ г/см}\cdot\text{с}$. Определить значение средней длины свободного пробега молекул азота при нормальном давлении.
25. Коэффициент теплопроводности воздуха при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормальном давлении равен $5,2\cdot 10^{-5}\text{ кал/см}\cdot\text{с}\cdot\text{град}$. Определить величину коэффициента теплопроводности при температуре $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и том же давлении.
26. Коэффициент диффузии водорода при нормальных условиях равен $1,31\text{ см}^2/\text{с}$. Определить величину коэффициента внутреннего трения при этих условиях.
27. Определить среднее число столкновений молекул азота за 1 с при нормальных условиях, если коэффициент вязкости азота при этих условиях $1,8\cdot 10^{-4}\text{ Пуаз}$.

28. Расстояние между стенками дьюаровского сосуда равно 5 мм диаметр эффективного сечения молекул воздуха, заключенного между стенками $3 \cdot 10^{-8}$ см. Температура 20°C . При каком давлении между стенками будут условия высокого вакуума? Как будет вести себя коэффициент теплопроводности в области высокого и низкого вакуума? Как зависит средняя длина свободного пробега молекул от давления в указанных областях?
29. Пространство между двумя большими параллельными пластинами заполнено средой, коэффициент теплопроводности которой изменяется с температурой по закону $k = A/T$, где A – постоянная для данной среды величина. Температуры пластин T_1 и T_2 поддерживаются постоянными ($T_1 > T_2$). Расстояние между пластинами L . Найти плотность потока тепла q и температуру T в среде как функцию x , где x – расстояние, отсчитанное от пластины, температура которой T_1 .
30. Коэффициент диффузии кислорода при температуре 0°C равен $0,19 \text{ см}^2/\text{с}$. Определить среднюю длину свободного пробега молекул газа.
31. Средняя длина свободного пробега атомов гелия при нормальных условиях $180 \cdot 10^{-5}$ см. Определить коэффициент диффузии гелия.
32. Определить длину свободного пробега молекул водорода при температуре 27°C и нормальном давлении, если коэффициент вязкости водорода при 0°C равен $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}\cdot\text{с}$.
33. Пространство между двумя большими параллельными пластинами заполнено гелием. Расстояние между пластинами 50 мм. Температура одной пластины 20°C , другой – 40°C . Вычислить плотность потока тепла при: 1. 10^5 Па , 2. $6,65 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.
34. Имеется пучок атомов калия, проходящий через рассеивающую среду из аргона, находящегося в кювете длиной 1 см при 0°C . Принимая сечение соударения для системы калий – аргон 600 \AA^2 . Рассчитать давление аргона, необходимое для ослабления пучка на 25 %.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ

Быстротой откачки сосуда или **эффективной быстротой действия насоса** называется объем газа, поступающий в единицу времени из сосуда в трубопровод при данном давлении в откачиваемом сосуде.

Быстротой действия насоса при данном впускном давлении называется объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени при этом давлении.

Количество газа, протекающего в единицу времени в любом сечении трубопровода, может быть определено как произведение давления в этом сечении P_1 на объем газа S_1 проходящего через него в единицу времени:

$$Q = P_1 \cdot S_1. \quad (2.1)$$

Поток газа, протекающий во входном сечении вакуумного насоса, называется **производительностью насоса** при данном впускном давлении P_n

$$Q = P_n \cdot S_n. \quad (2.2)$$

Проводимость трубопровода (любого элемента вакуумной системы) определяется как:

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2}. \quad (2.3)$$

где U – проводимость, Q – поток газа, $(P_1 - P_2)$ – разность давлений на концах трубопровода.

Результирующая проводимость последовательного соединения трубопроводов:

$$\frac{1}{U_{\text{посл}}} = \sum \frac{1}{U_i}. \quad (2.4)$$

Результирующая проводимость параллельно соединенных трубопроводов:

$$U_{\text{парал}} = \sum U_i. \quad (2.5)$$

Основное уравнение вакуумной техники:

$$S_{\text{эф}} = \frac{S_n \cdot U}{S_n + U}. \quad (2.6)$$

где $S_{\text{эф}}$ – эффективная быстрота действия насоса (быстрота откачки сосуда), S_n – быстрота действия насоса, U – проводимость трубопровода.

ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Адиабатический процесс

$$PV^x = \text{const}, \quad (2.7)$$

где $x = \frac{C_{P,yд}}{C_{V,yд}}$ – показатель адиабаты; $C_{P,yд}$, $C_{V,yд}$ – удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме, соответственно.

Температура, плотность газа и давление при адиабатическом расширении взаимосвязаны следующим соотношением:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{x-1}; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^x.$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{x-1}; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{(x-1)}{x}}. \quad (2.8)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют начальным и конечным значениям соответствующих параметров.

Для одноатомного газа $x = \frac{5}{3}$,

для двухатомного газа $x = \frac{7}{5}$,

для многоатомного газа $x = \frac{4}{3}$.

На практике обычно имеют дело с промежуточным процессом, когда между газом и стенками имеется неполный теплообмен. В этом случае состояние газа описывается уравнением

$$PV^n = \text{const.} \quad (2.9)$$

где n – показатель политропы: $1 < n < x$.

Критерий определения границ режимов течения газа в трубопроводах

Режим течения газа в трубопроводе определяют соотношением средней длины свободного пробега молекул газа с диаметром трубопровода.

Для воздуха при $T = 293 \text{ К}$

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{P} \text{ (м)} \quad (2.10)$$

где P – давление в мм рт. ст.

Вязкостный режим: $P \cdot d > 0,666 \text{ Па} \cdot \text{м}$.

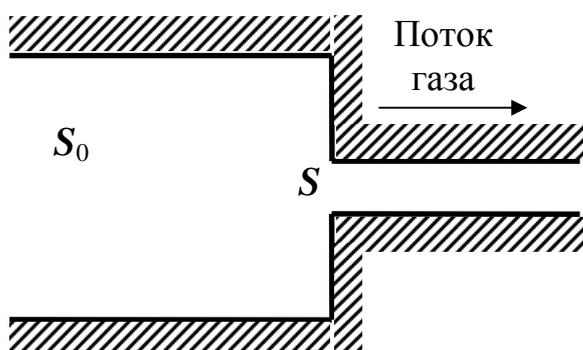
Молекулярный режим: $P \cdot d < 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}$.

Молекулярно–вязкостный режим: $0,02 < P \cdot d < 0,666$

Пропускная способность отверстий

Молекулярный режим течения газа

Отверстием называют канал, у которого толщина, стенок много меньше диаметра. Если поверхность, в которой имеется отверстие, не бесконечна, а имеет ограниченную площадь S_0 , то проводимость отверстия S увеличивается по мере уменьшения $\frac{S_0}{S}$.



В случае цилиндрического резервуара с отверстием в основании цилиндра увеличение проводимости отверстия вызывается в некоторой степени фокусирующим действием,

которое оказывает цилиндр на молекулы, движущиеся в резервуаре в направлении отверстия S .

Если отношение $\frac{S_0}{S} < 1$, то площадь отверстия S заменяется эффективной площадью S' и такое отверстие называют большим:

$$S' = \frac{S}{1 - S/S_0}. \quad (2.10)$$

С этой поправкой можно не считаться, если отношение $\frac{S_0}{S}$ значительно меньше единицы (раз в 10). Наоборот, когда это отношение равно 1, проводимость отверстия становится равной бесконечности, т.е. в этом крайнем случае отверстие уже не оправдывает своего названия и перестает играть роль отдельного элемента трубопровода.

Проводимость малого отверстия

$$U = 36,4 \cdot S \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2.11)$$

или для воздуха при 293 К

$$U = 116 \cdot S.$$

Проводимость большого отверстия

$$U = 36,4 \cdot S \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{S}{1 - S/S_0}. \quad (2.12)$$

или для воздуха при 293 К

$$U = 116 \cdot \frac{S}{1 - S/S_0}.$$

Вязкостный режим течения газа

Проводимость отверстия в вязкостном режиме течения зависит от перепада давления $\tau = \frac{P_1}{P_2}$, где P_1 – давление в сосуде, из которого вытекает газ.

Проводимость малого отверстия:

По мере уменьшения давления $\tau \leq 1$ проводимость возрастает до определенного значения, соответствующего критическому отношению

$$\tau_{кр} = \left(\frac{2}{x+1} \right)^{\frac{x}{x-1}}. \quad (2.13)$$

Для одноатомного газа $\tau_{кр} = 0,437$;

для двухатомного газа и воздуха $\tau_{кр} = 0,528$;

для многоатомного газа $\tau_{кр} = 0,526$.

При отношениях давлений $\frac{P_1}{P_2} < \tau_{кр}$ количество перетекающего газа остается неизменным. При $\tau > \tau_{кр}$ проводимость отверстия определяется выражением

$$U = S \cdot \frac{\tau^{1/x}}{1-\tau} \cdot \sqrt{\left(1 - \tau^{(x-1/x)}\right) \cdot \frac{2x}{x-1} \cdot \frac{RT}{M}}. \quad (2.14)$$

Для воздуха ($M = 29$ г/моль) и комнатной температуре ($T = 293$ К):

при $0,528 \leq \tau < 1$

$$U = 766 \cdot \tau^{0,714} \cdot \frac{S}{1-\tau} \cdot \sqrt{1 - \tau^{0,286}}. \quad (2.15)$$

при $\tau < 0,528$

$$U = 200 \cdot \frac{S}{1-\tau}. \quad (2.16)$$

при $\tau < 0,1$

$$U = 200 \cdot S. \quad (2.17)$$

Проводимость большого отверстия определяется по формулам для проводимости малого отверстия с учетом поправочного коэффициента $\frac{S}{1 - S/S_0}$.

Переходный режим течения

В случае переходного молекулярно–вязкостного режима удобного расчета для пропускной способности не существует. Пользуются обычно формулой, предложенной Кнудсенom:

$$U = U_{\epsilon} + b \cdot U_m. \quad (2.18)$$

где b – коэффициент, учитывающий среднее давление в трубопроводе.

$$b = \frac{1 + D \cdot P_{cp} \sqrt{M / (RT)} / \eta}{1 + 1,24 \cdot D \cdot P_{cp} \cdot \sqrt{M / (RT)} / \eta}, \quad (2.19)$$

где $P_{cp} = \frac{P_1 + P_2}{2}$ – среднее значение давления.

Для воздуха при $T = 293$ К:

$$b = \frac{1 + 1,25 \cdot D / \lambda}{1 + 1,55 \cdot D / \lambda}. \quad (2.20)$$

В широком диапазоне давлений коэффициент b изменяется от 0,8 до 1,0. Для технических расчетов среднее значение $b = 0,9$ может быть принято постоянным.

Пропускная способность трубопроводов

Молекулярный режим

Проводимость длинного ($l > 20 \cdot D$) прямолинейного цилиндрического трубопровода имеет вид

$$U = 38,1 \cdot \frac{D^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2.21)$$

Для воздуха при $T = 293$ К

$$U = 121 \cdot \frac{D^3}{l}. \quad (2.22)$$

Проводимость короткого трубопровода. Из вышеприведенных формул для проводимости длинного трубопровода следует, что по мере уменьшения длины канала его проводимость возрастает и при $l = 0$ должна стремиться к бесконечности. Разумеется, это невозможно, т.к. остается отверстие, проводимость которого конечна.

$$\frac{1}{U_{кор}} = \frac{1}{U_{дл}} + \frac{1}{U_{отв}}. \quad (2.23)$$

Гораздо более точные результаты получаются при использовании формулы Клаузинга, которая учитывает сопротивление входного отверстия:

$$U = 36,4 \cdot S \cdot K \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2.24)$$

где K – поправочный множитель, являющийся функцией отношения $\frac{l}{D}$ (таблица 1).

Для воздуха при $T = 293$ К:

$$U_{кор} = 36,4 \cdot S \cdot K \quad (2.25)$$

В случае коротких трубок поправка не должна применяться, если элемент трубопровода, предшествующий трубке, имеет диаметр, равный диаметру трубки или меньше его.

Таблица 1

Поправочный коэффициент K в уравнении (2.24)

$\frac{l}{D}$	K	$\frac{l}{D}$	K	$\frac{l}{D}$	K
0	1	0,85	0,5518	4,0	0,2316
0,05	0,9524	0,90	0,5384	4,5	0,2131
0,10	0,9092	0,95	0,5256	5,0	0,1973
0,15	0,8699	1,00	0,5136	6,0	0,1719
0,20	0,8341	1,1	0,4914	7,0	0,1523
0,25	0,8013	1,2	0,4711	8,0	0,1367
0,30	0,7711	1,3	0,4527	9,0	0,1240
0,35	0,7434	1,4	0,4359	10,0	0,1135
0,40	0,7177	1,5	0,4205	15	0,0997
0,45	0,6940	1,6	0,4062	20	0,0861
0,50	0,6720	1,7	0,3931	25	0,0749
0,55	0,6514	1,8	0,3809	30	0,0642
0,60	0,6320	1,9	0,3695	35	0,0563
0,65	0,6139	2,0	0,3589	40	0,0519
0,70	0,5970	2,5	0,3146	45	0,0485
0,75	0,5810	3,0	0,2807	50	0,0458
0,80	0,5659	3,5	0,2537	500	0,002658
				Более 500	$4/3 \cdot d/l$

Влияние местных сопротивлений при молекулярном режиме течения газа учитывают путем некоторого увеличения расчетной длины трубопровода, против фактической. Так, влияние изгиба трубопровода под углом 90° учитывается удлинением трубопровода на $1,33$ диаметра, т. е:

$$l_{расч} = l_{факт} + 1,33 \cdot D \cdot n. \quad (2.26)$$

где n – число изгибов под углом 90° .

Вязкостный режим

Проводимость цилиндрического длинного трубопровода ($l > 20 \cdot D$) круглого сечения:

$$U = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot P_{ср}}{8\eta \cdot l}. \quad (2.27)$$

где R – радиус трубопровода; η – динамическая вязкость;
 $P_{ср} = \frac{P_1 + P_2}{2}$ – среднее значение давления в трубопроводе.

Для воздуха при $T = 293$ К:

$$U = 1360 \cdot \frac{D^4 \cdot P_{ср}}{l}. \quad (2.28)$$

Проводимость трубопровода при течении по нему любого газа определяют по формуле:

$$U_1 = \beta_1 \cdot U. \quad (2.29)$$

где U – проводимость трубопровода при течении по нему воздуха;
 β – коэффициент, учитывающий различие динамических вязкостей рассматриваемого газа η_1 и воздуха η (таблица 2):

$$\beta_1 = \frac{\eta_1}{\eta} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_1} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M}}. \quad (2.30)$$

где σ , σ_1 – диаметры молекул воздуха и рассматриваемого газа; M , M_1 – молекулярная масса воздуха и рассматриваемого газа.

Таблица 2

Значения β_1 для некоторых газов

Газ	Воздух	H ₂	He	H ₂ O	Ne	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂
β_1	1	2,06	0,93	1,94	0,58	1,04	0,9	0,84	1,24

Проводимость коротких трубопроводов ($l < 20 \cdot D$) определяют по эмпирическим зависимостям.

$$U = \frac{\pi \cdot D^4 \cdot P_{cp}}{128 \cdot \eta \cdot l \cdot \left[1 + 4,54 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{M \cdot C}{\eta \cdot R \cdot T \cdot l} \right]}. \quad (2.29)$$

Для воздуха при $T = 293$ К:

$$U = 1360 \cdot \frac{P_{cp}}{l} \cdot \frac{D}{1 + 0,03 \cdot Q/l}. \quad (2.30)$$

Если поток Q неизвестен, то в это уравнение подставляют произвольное значение Q и расчет ведут методом последовательных приближений до тех пор, пока разница между принятым значением и значением $Q = U \cdot \Delta P$ не будет меньше заданной точности расчета.

Переходный режим течения

Течение газа в переходном режиме описывают в основном эмпирическими зависимостями для узких диапазонов λ/D .

Проводимость длинного цилиндрического трубопровода ($l > 20 \cdot D$) определяют по эмпирической зависимости (2.18).

Проводимость коротких трубопроводов ($l < 20 \cdot D$) при молекулярно–вязкостном режиме следует рассчитывать по формуле (2.18), подставляя в нее значения проводимости рассматриваемого короткого трубопровода, рассчитанные соответственно рекомендациям для вязкостного и молекулярного режимов течения газа.

Выбор форвакуумного насоса для диффузионного насоса

Параметры форвакуумного насоса, соответствующего данному диффузионному насосу, определяются, исходя из уравнения неразрывности течения газа

$$P_p \cdot S_p = P_{\text{дифф}} \cdot S_{\text{дифф}}. \quad (2.31)$$

где P_p – давление на входе ротационного насоса (т.е. на выходе диффузионного насоса или давление форвакуума P_0); $P_{\text{дифф}}$ – давление на входе в диффузионный насос (или же рабочее давление P).

Для надежности в работе должно иметь место неравенство

$$P_0 \cdot S_p > P \cdot S_{\text{дифф}}. \quad (2.32)$$

Так как и S_p , и $S_{\text{дифф}}$ являются функциями давления, то условие (2.32) должно выполняться даже в более неблагоприятном случае, а именно

$$P_{0,\min} \cdot S_{p,\min} > P_{\max} \cdot S_{\text{дифф},\max}. \quad (2.33)$$

где P_{max} – максимальное рабочее давление диффузионного насоса, $P_{0, min}$ – минимальное давление форвакуума, $S_{дифф, max}$ – максимальная скорость откачки диффузионного насоса, $S_{p, min}$ – скорость откачки ротационного насоса при $P_{0, min}$.

В условии (2.33) учтен некоторый запас, связанный с тем, что P_{max} и $S_{дифф, max}$ не имеют места одновременно.

Таким образом, скорость откачки форвакуумного насоса должна определяться из условия

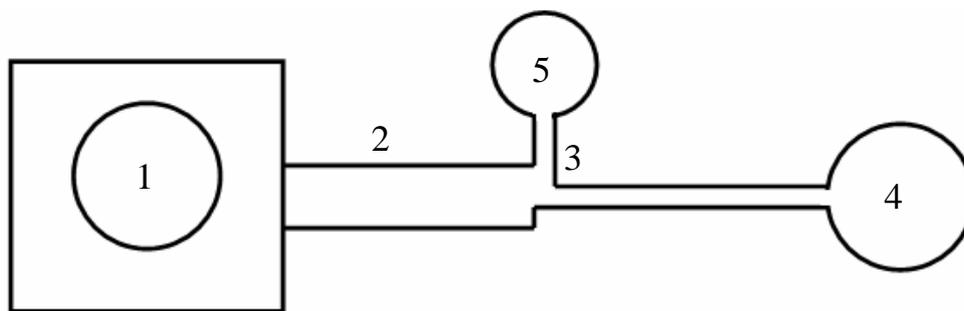
$$S_{p, min} > \frac{P_{max}}{P_{0, min}} \cdot S_{0, max}. \quad (2.34)$$

ЗАДАЧИ

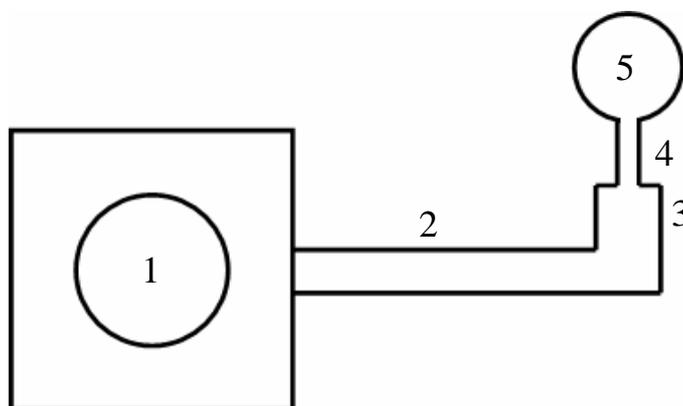
1. Определить пропускную способность трубки, имеющей размеры $d = 2,4$ мм и $L = 100$ мм, при давлении в откачиваемом приборе 0,02; 2; 5 и 12,5 мм рт.ст. Газ – воздух при $T = 20$ °С.
2. Определить пропускную способность трубки длиной 1 м и диаметром 40 мм при давлениях на концах трубопровода $P_1 = 1500$ Па и $P_2 = 1550$ Па. Откачиваемый газ – воздух при $T = 293$ К.
3. Определить проводимость трубопровода длиной 0,8 м и диаметром 0,3 м при среднем давлении в нем $P_{cp} = 10$ Па. Откачиваемый газ – воздух при $T = 293$ К.
4. Рассчитать длительность откачки рабочей камеры технологической установки объемом 50 л от атмосферного давления до 5 Па. Быстрота действия насоса $S_n = 5$ л/с и не зависит от давления. Предельное давление насоса $P_{np} = 0,1$ Па.
5. Вычислить быстроту действия вращательного насоса по следующим данным: объем баллона 10 л, начальное давление 760 мм рт.ст., конечное – 460 мм рт.ст., длительность откачки – 5 с.
6. Какая должна быть пропускная способность вакуумпровода, чтобы быстрота действия насоса была использована на 80%?
7. Какова быстрота откачки объекта, если пропускная способность вакуумпровода составляет 10 л/с, а быстрота действия насоса равна 100 л/с?
8. Как увеличится быстрота откачки электронно–лучевой трубки, штенгель которой имеет пропускную способность 1,2 л/с, если вместо насоса с быстротой действия 6 л/с взять насос с быстротой действия 20 л/с или 100 л/с?
9. Определить явления в откачиваемом приборе соответствующие границам между режимами течения газа, если штенгель имеет размеры $d = 2,4$ мм, $L = 100$ мм. Газ – воздух при температуре 20 °С.

10. Из большого объема откачивается воздух при давлении 10^{-4} мм рт. ст. и комнатной температуре через трубу длиной $L = 2$ м, $r = 10$ см, $S_n = 1$ м³/с. При какой S_n будет обеспечена та же скорость откачки сосуда, если насос присоединить без трубы?
11. Сосуд через длинную трубу откачивается идеальным насосом. Из-за течей в стенках сосуда давление в нем не падает до нуля, а после длительной откачки устанавливается на уровне, при котором $\lambda \gg d$. Как изменится предельный вакуум, если диаметр трубы d уменьшить вдвое? Решить задачу для случаев: 1) $S_n \gg U$. 2) S_n сравнима с U .
12. В реактор для плазмохимической обработки поверхности кремниевых пластин напускается рабочий газ. Поток газа, измеряемый ротаметром, при нормальных условиях составляет 5 см³/с. Давление рабочего газа в реакторе 10^{-3} мм рт. ст. Диаметр и длина вакуумпровода 5 см и 100 см, соответственно. Определить наибольшую быстроту действия насоса. Объяснить полученный результат.
13. Через разрядную трубку диаметром 4 см и длиной 60 см прокачивается воздух при давлении 1 мм рт.ст. Поток газа, измеряемый ротаметром, при нормальных условиях составляет 1 см³/с. Определить разность давлений на концах разрядной трубки.
14. На коллектор откачной установки напаян, тиратрон, который для удобства отпайки в штенгеле имеет перетяжку длиной 0,7 см и диаметром 3 мм. Откачка производится паромасляным насосом с быстротой действия 100 л/с. Определить эффективную быстроту откачки тиратрона, если режим течения газа молекулярный, а сопротивление перетяжки больше сопротивления остальной части трубопровода. Определить время разрежения тиратрона в диапазоне давлений от $14,663 \cdot 10^{-1}$ Н/м² до $1,466 \cdot 10^{-3}$ Н/м²; объем тиратрона 1 дм³, предельный вакуум $1,33 \cdot 10^{-4}$ Н/м².
15. Откачиваемый объем соединен с насосом трубопроводом длиной 1 м и диаметром 0,2 м. Быстрота действия насоса 200 л/с. Определить давление в откачиваемом объеме, если давление во входном патрубке насоса 0,5 Па.

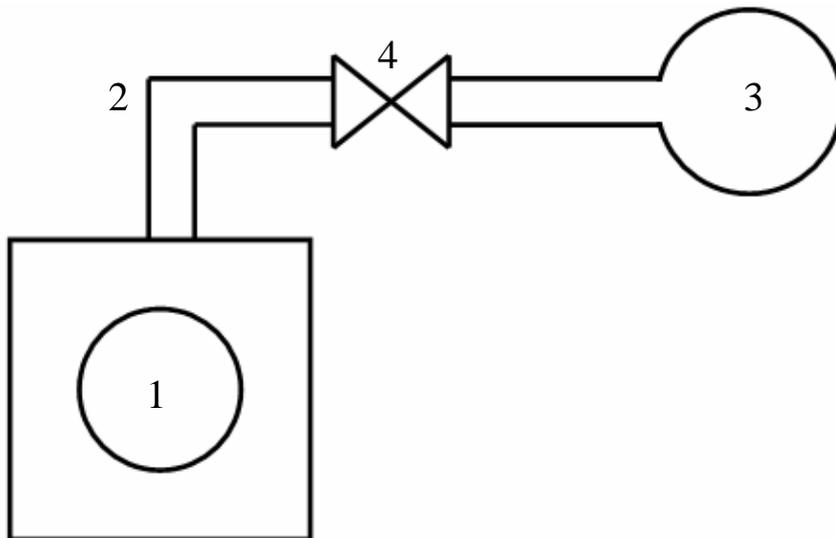
16. Исследование разряда в парах H_2O проводилось в трубке радиусом 1,95 см. За 6,5 мин из источника паров H_2O (ампулы с H_2O) испарилось 0,07 г воды. Определить линейную скорость молекулы H_2O в трубке при давлении 0,27 мм рт. ст. Влиянием трения газа о стенки трубки пренебречь. Температура газа в разрядной трубке 25°C .
17. Вычислить давление в приборе 5, откачиваемого на системе, схема которой показана на рисунке, если манометр 4 показывает давление 10^{-3} мм рт.ст. Трубопровод 2 имеет длину 100 см, диаметр 10 мм, трубопровод 3 – длину 10 см, диаметр 6 мм. Давление у входа в насос 1 – 10^{-6} мм рт. ст.



18. Вычислить, на сколько процентов увеличится скорость откачки системы, состоящей из насоса 1 ($S_n = 7$ л/с), трубопровода 2 ($L = 100$ см, $d = 20$ мм), штенгеля 3 ($L = 15$ см, $d = 10$ мм), имеющего перетяжку 4 в месте отпаивания прибора ($L = 1$ см, $d = 5$ мм) и откачиваемого прибора 5:
- при замене насоса на имеющий $S_n = 100$ л/с;
 - при расширении диаметра перетяжки до 6 мм.



19. На сколько процентов уменьшится проводимость системы, изображенной на рисунке, состоящей из насоса 1, трубопровода 2 ($L = 10$ см, $d = 2$ см) и откачиваемого сосуда 3, если поставить кран 4 с отверстием диаметром 5 мм? Режим течения газа – молекулярный.



20. Проводимость трубопровода, соединяющего откачиваемый объем с насосом, равна 10^{-5} м³/с. Суммарное газовыделение в объеме равно $2 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с. Определить минимальное давление, установившееся в объеме при давлении во входном патрубке насоса 10^{-1} Па.
21. Предельное давление механического насоса равно $2 \cdot 10^{-1}$ Па. Определить допустимую величину течи, при которой возможно получение давления в откачиваемом объеме 10^{-2} Па при проводимости трубопровода $3 \cdot 10^{-4}$ м³/с.
22. Выбрать размеры трубопровода (L и d), при которых возможно достижение в откачиваемом объеме давления 10^{-4} Па, если давление во входном патрубке насоса $3 \cdot 10^{-5}$ Па, а величина натекания в объем $1 \cdot 10^{-5}$ м³ Па/с. Режим течения газа – молекулярный.

3. ЗАДАНИЯ НА РАСЧЕТНЫЕ РАБОТЫ

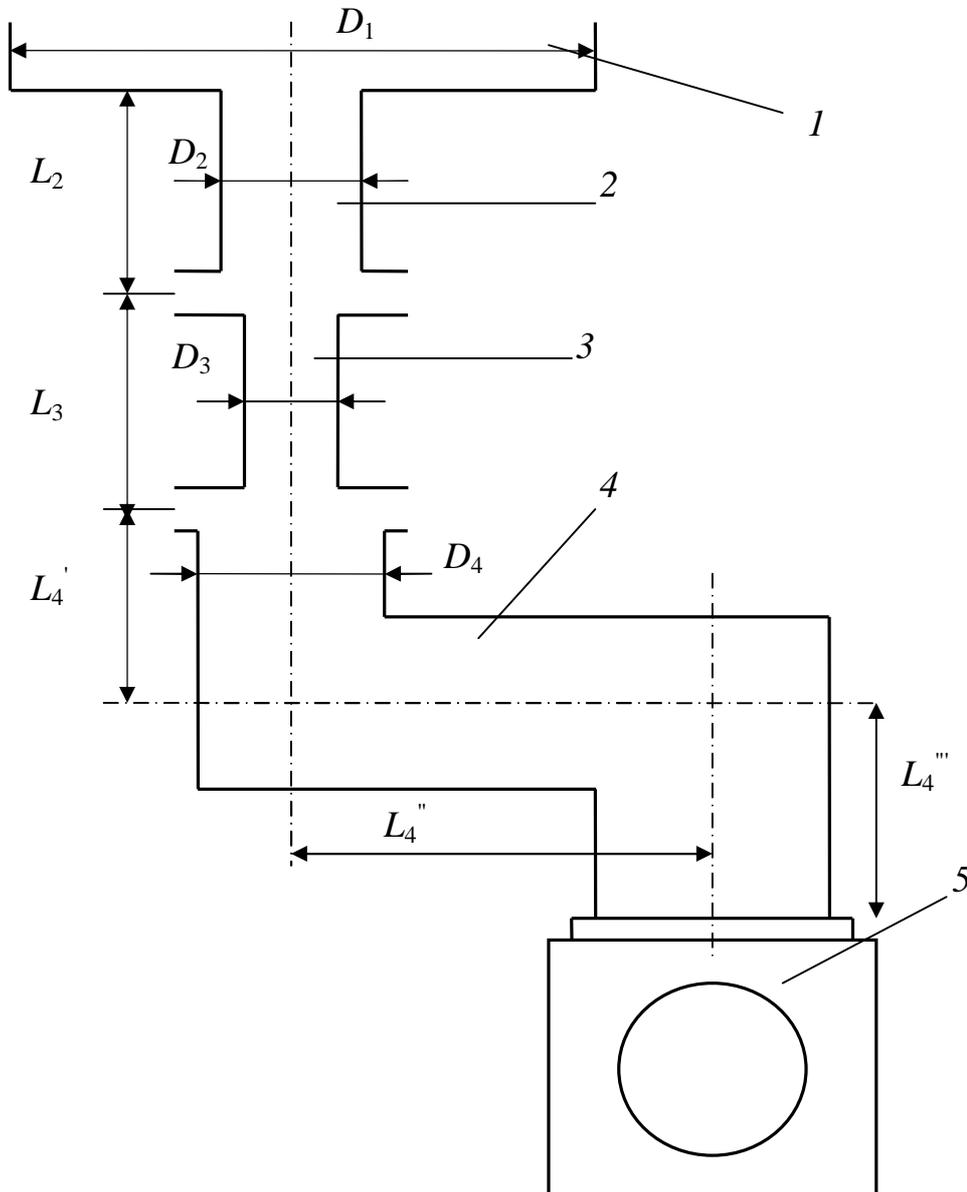
Расчетная работа № 1

"Расчет проводимости сложных вакуумпроводов"

Схема 1

Трубопровод, соединяющий откачиваемый сосуд 1 диаметром D_1 с вакуумным насосом 5, состоит из цилиндрического трубопровода 2 длиной L_2 и диаметром D_2 , переходника 3 длиной L_3 и диаметром D_3 и двух колен со сторонами L_4' , L_4'' , L_4''' и диаметром D_4 .

Определить быстроту откачки S_0 сосуда, давление P_1 в сосуде и проводимость трубопровода U , если быстрота действия вакуумного насоса равна S_n при давлении во входном патрубке насоса P_n . Откачиваемый газ – воздух. Температура – 293 К.



Варианты заданий для схемы №1

№	$S_H, \text{ м}^3/\text{с}$	$P_H, \text{ Па}$	$D_1, \text{ м}$	$D_2, \text{ м}$	$D_3, \text{ м}$	$D_4, \text{ м}$	$L_2, \text{ м}$	$L_3, \text{ м}$	$L_4', \text{ м}$	$L_4'', \text{ м}$	$L_4''', \text{ м}$
1	2,0	$3 \cdot 10^{-4}$	10	0,5	0,7	0,3	1,0	0,5	0,8	1,0	0,8
2	6,0	$1 \cdot 10^{-4}$	6	0,2	0,4	0,2	1,2	0,3	0,5	0,7	0,5
3	3,5	$3 \cdot 10^{-5}$	4	0,4	0,6	0,3	0,9	0,4	0,7	0,9	0,7
4	5,0	$1 \cdot 10^{-5}$	2	0,2	0,4	0,2	0,9	0,2	0,7	0,7	0,7
5	5,5	$1 \cdot 10^{-4}$	8	0,7	0,9	0,4	0,5	0,7	1,2	0,8	1,2
6	4,2	$2 \cdot 10^{-4}$	7	0,6	0,9	0,4	1,0	0,6	0,9	1,1	0,9
7	3,0	$5 \cdot 10^{-4}$	10	0,3	0,5	0,2	1,2	0,3	0,5	0,8	0,6
8	2,5	$1 \cdot 10^{-5}$	6	0,8	1,2	0,5	0,3	0,8	1,1	1,4	1,1
9	6,5	$5 \cdot 10^{-4}$	5	0,4	0,6	0,2	0,4	0,4	0,8	1,4	0,8
10	1,5	$1 \cdot 10^{-3}$	4	0,3	0,5	0,3	0,7	0,3	0,7	1,0	0,7
11	2,5	2,5	10	0,5	0,8	0,3	1,0	0,5	0,8	1,0	0,8
12	6,5	1,0	6	0,2	0,4	0,1	1,2	0,2	0,5	0,7	0,5
13	4,0	1,5	4	0,4	0,6	0,2	0,9	0,4	0,7	0,9	0,7
14	5,5	1,4	2	0,2	0,4	0,1	0,9	0,2	0,7	0,7	0,7
15	6,0	1,2	8	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	1,2	2,8	1,2
16	3,0	0,9	7	0,6	0,9	0,3	1,0	0,6	0,9	1,1	0,9
17	3,5	1,5	10	0,3	0,5	0,2	1,2	0,3	0,6	0,8	0,6
18	3,0	2,0	6	0,8	1,0	0,4	0,3	0,8	1,1	1,4	1,1
19	6,5	2,0	5	0,4	0,5	0,2	0,4	0,4	0,8	1,0	0,8
20	2,0	0,5	4	0,3	0,6	0,2	0,7	0,3	0,7	1,0	0,8

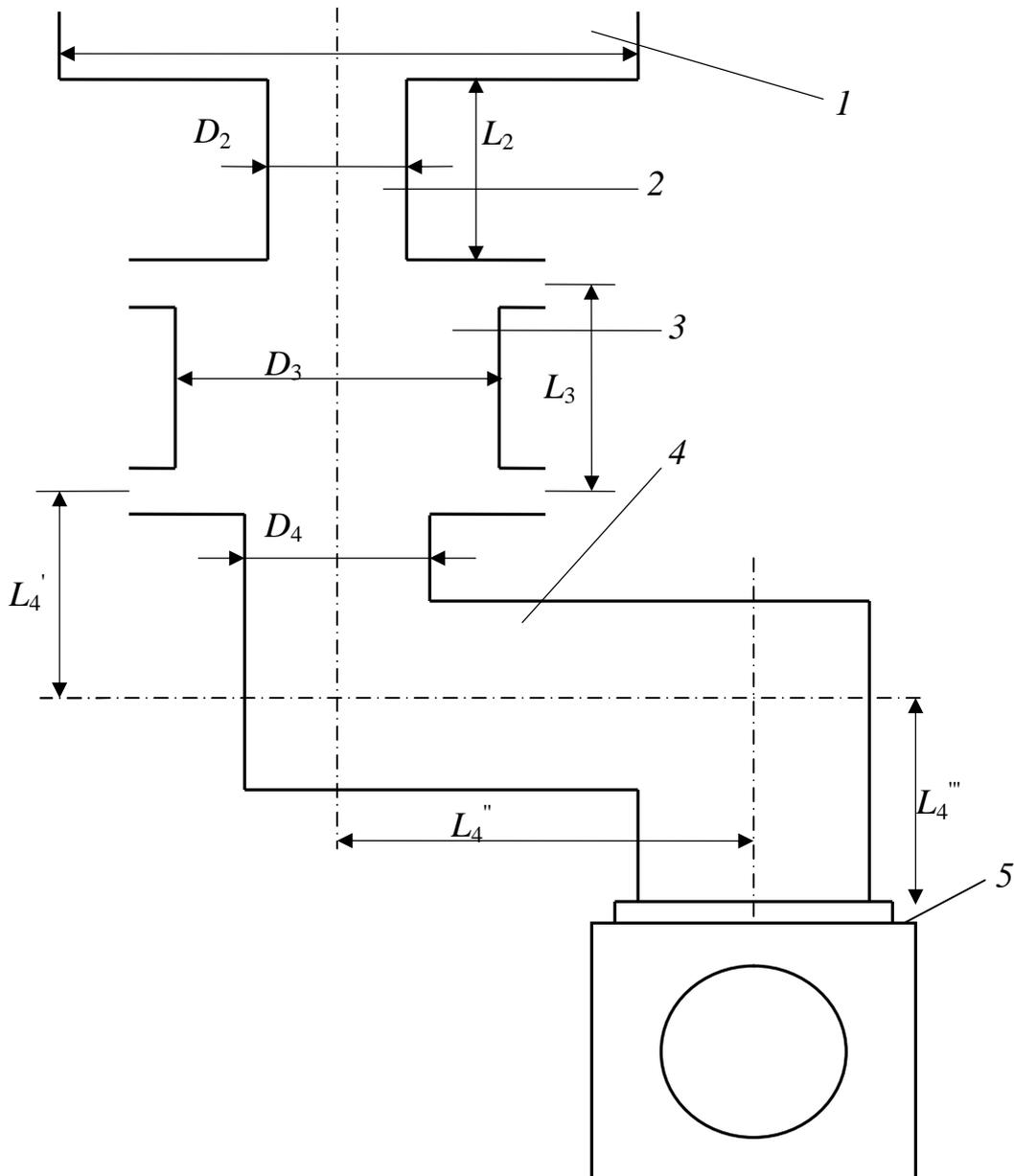
Расчетная работа № 1

"Расчет проводимости сложных вакуумпроводов"

Схема 2

Трубопровод, соединяющий откачиваемый сосуд 1 диаметром D_1 с вакуумным насосом 5, состоит из цилиндрического трубопровода 2 длиной L_2 и диаметром D_2 , переходника 3 длиной L_3 и диаметром D_3 и двух колен со сторонами L_4' , L_4'' , L_4''' и диаметром D_4 .

Определить быстроту откачки S_0 сосуда, давление P_1 в сосуде и проводимость трубопровода U , если быстрота действия вакуумного насоса равна S_n при давлении во входном патрубке насоса P_n . Откачиваемый газ – воздух. Температура – 293 К.



Варианты заданий для схемы №2

№	$S_H, \text{м}^3/\text{с}$	$P_H, \text{Па}$	$D_1, \text{м}$	$D_2, \text{м}$	$D_3, \text{м}$	$D_4, \text{м}$	$L_2, \text{м}$	$L_3, \text{м}$	$L_4', \text{м}$	$L_4'', \text{м}$	$L_4''', \text{м}$
1	2,0	$3 \cdot 10^{-4}$	10	0,5	0,4	0,4	1,0	0,4	0,8	1,0	0,8
2	6,0	$1 \cdot 10^{-4}$	6	0,2	0,1	0,1	1,2	0,1	0,5	0,7	0,5
3	3,5	$3 \cdot 10^{-5}$	4	0,4	0,3	0,3	0,9	0,3	0,7	0,9	0,7
4	5,0	$1 \cdot 10^{-5}$	2	0,2	0,1	0,1	0,9	0,1	0,7	0,7	0,7
5	5,5	$1 \cdot 10^{-4}$	8	0,7	0,5	0,8	0,5	0,5	1,2	0,8	1,2
6	4,2	$2 \cdot 10^{-4}$	7	0,6	0,4	0,7	1,0	0,4	0,9	1,1	0,9
7	3,0	$5 \cdot 10^{-4}$	10	0,3	0,15	0,4	1,2	0,15	0,5	0,8	0,6
8	2,5	$1 \cdot 10^{-5}$	6	0,8	0,6	0,9	0,3	0,6	1,1	1,4	1,1
9	6,5	$5 \cdot 10^{-4}$	5	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,8	1,4	0,8
10	1,5	$1 \cdot 10^{-3}$	4	0,3	0,2	0,4	0,7	0,2	0,7	1,0	0,7
11	2,5	2,5	10	0,5	0,4	0,6	1,0	0,4	0,8	1,0	0,8
12	6,5	1,0	6	0,2	0,1	0,3	1,2	0,1	0,5	0,7	0,5
13	4,0	1,5	4	0,4	0,3	0,5	0,9	0,3	0,7	0,9	0,7
14	5,5	1,4	2	0,2	0,2	0,3	0,9	0,1	0,7	0,7	0,7
15	6,0	1,2	8	0,7	0,7	0,8	0,5	0,5	1,2	2,8	1,2
16	3,0	0,9	7	0,6	0,6	0,7	1,0	0,4	0,9	1,1	0,9
17	3,5	1,5	10	0,3	0,3	0,4	1,2	0,15	0,6	0,8	0,6
18	3,0	2,0	6	0,8	0,8	0,9	0,3	0,6	1,1	1,4	1,1
19	6,5	2,0	5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,8	1,0	0,8
20	2,0	0,5	4	0,3	0,3	0,4	0,7	0,2	0,7	1,0	0,8

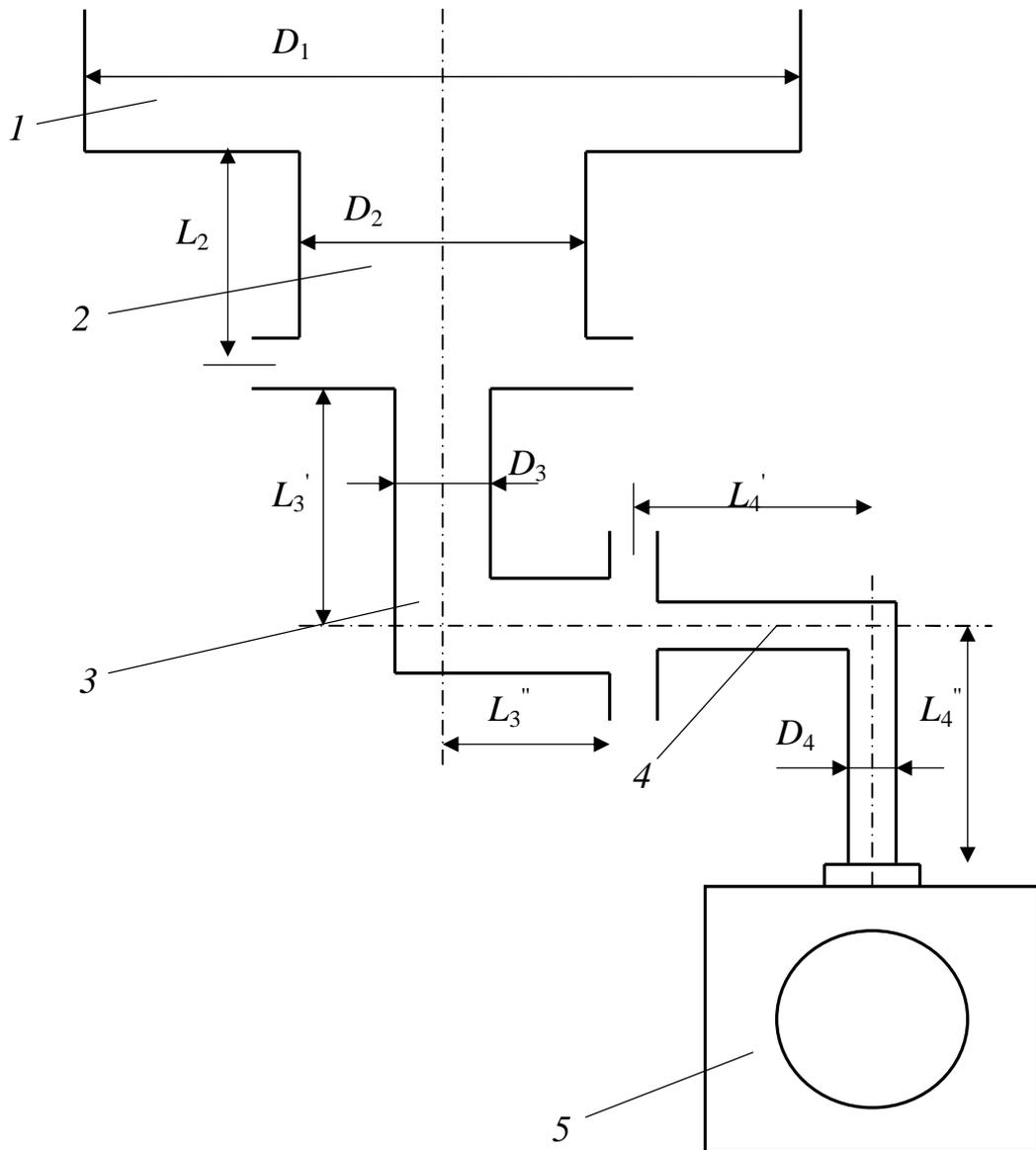
Расчетная работа № 1

"Расчет проводимости сложных вакуумпроводов"

Схема 3

Трубопровод, соединяющий откачиваемый сосуд 1 диаметром D_1 с вакуумным насосом 5, состоит из цилиндрического трубопровода 2 длиной L_2 и диаметром D_2 , переходника 3 диаметром D_3 из двух колен L_3' и L_3'' и переходника 4 с диаметром D_4 и двух колен L_4' и L_4'' .

Определить быстроту откачки S_0 сосуда, давление P_1 в сосуде и проводимость трубопровода U , если быстрота действия вакуумного насоса равна S_n при давлении во входном патрубке насоса P_n . Откачиваемый газ – воздух. Температура – 293 К.



Варианты заданий для схемы №3

№	$S_H, \text{м}^3/\text{с}$	$P_H, \text{Па}$	$D_1, \text{м}$	$D_2, \text{м}$	$D_3, \text{м}$	$D_4, \text{м}$	$L_2, \text{м}$	$L_3', \text{м}$	$L_3'', \text{м}$	$L_4', \text{м}$	$L_4'', \text{м}$
1	2,0	$3 \cdot 10^{-4}$	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	3,0	3,0	3,0	3,0
2	6,0	$1 \cdot 10^{-4}$	3,5	2,0	1,5	1,0	1,2	3,0	3,0	3,0	3,0
3	3,5	$3 \cdot 10^{-5}$	4,0	2,0	0,3	0,3	0,9	3,0	3,0	3,0	3,0
4	5,0	$1 \cdot 10^{-5}$	2,0	1,5	1,4	1,0	0,9	2,8	2,8	3,0	3,0
5	5,5	$1 \cdot 10^{-4}$	2,0	1,5	1,2	1,0	0,5	2,4	2,4	3,0	3,0
6	4,2	$2 \cdot 10^{-4}$	1,5	1,0	0,8	0,5	1,0	1,6	1,6	1,5	1,5
7	3,0	$5 \cdot 10^{-4}$	3,5	2,0	1,8	0,5	1,2	1,6	1,6	1,5	1,5
8	2,5	$1 \cdot 10^{-5}$	1,0	0,5	0,4	0,2	0,3	0,8	0,8	0,6	0,6
9	6,5	$5 \cdot 10^{-4}$	2,5	2,0	1,5	0,8	0,4	3,0	3,0	2,4	2,4
10	1,5	$1 \cdot 10^{-3}$	3,5	3,0	2,0	1,0	0,7	4,0	4,0	3,0	3,0
11	2,5	2,5	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	3,0	3,0	3,0	3,0
12	6,5	1,0	3,5	2,0	1,5	1,0	1,2	3,0	3,0	3,0	3,0
13	4,0	1,5	4,0	3,5	2,0	1,2	0,9	4,0	4,0	3,6	3,6
14	5,5	1,4	2,0	1,0	0,8	0,4	0,9	1,6	1,6	0,9	0,9
15	6,0	1,2	2,0	1,0	0,8	0,4	0,5	1,6	1,6	0,9	0,9
16	3,0	0,9	1,5	1,0	0,6	0,4	1,0	1,2	2,4	0,9	0,9
17	3,5	1,5	3,5	2,0	1,2	0,4	1,2	2,4	2,4	0,9	0,9
18	3,0	2,0	1,0	0,5	0,4	0,2	0,3	0,8	0,8	0,9	0,9
19	6,5	2,0	2,5	2,0	1,2	0,4	0,4	2,4	2,4	0,9	0,9
20	2,0	0,5	3,5	1,0	0,8	0,6	0,7	1,8	1,8	1,8	1,8

Расчетная работа № 2

"Расчет времени откачки объема до требуемого давления"

Расчитать время откачки объема V от атмосферного давления до 10^{-2} Па насосом с номинальной быстротой действия S_n и рабочей характеристикой, представленной на рисунке, через трубопровод своего варианта расчетной работы №1.

Предельное давление насоса $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

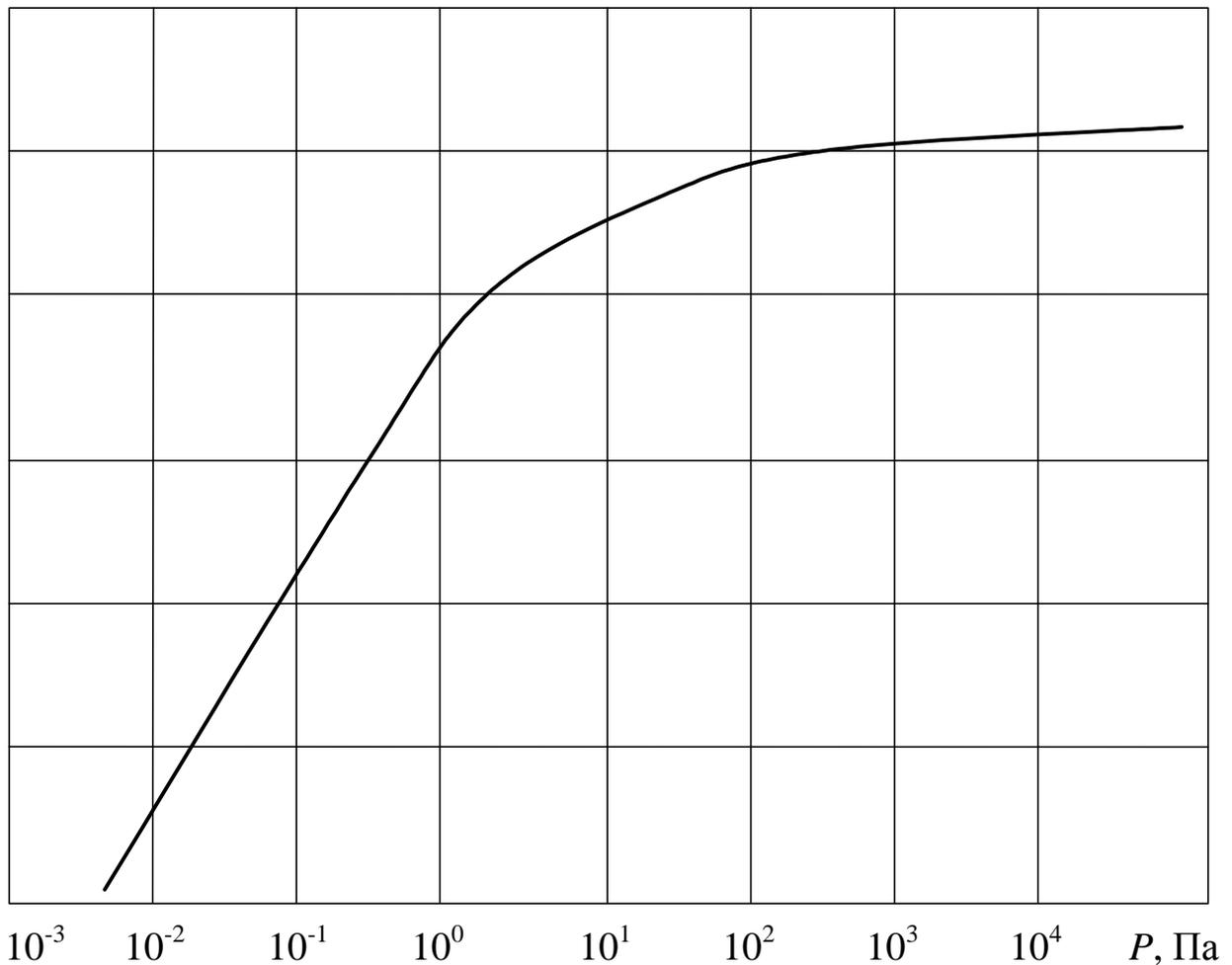
Для своего варианта:

V [м³] – численно равен $10^{-2} \cdot D_1$.

S [м³/с] – численно равен $10^{-3} \cdot S_n$.

Рабочая характеристика насоса

S_n , м³/с



4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит физический смысл понятия давления газа?
2. Почему в вакуумной технике все газы и пары рассматриваются как идеальные?
3. Каково соотношение между наиболее вероятной, среднеарифметической и среднеквадратичной скоростями газовых молекул?
4. Каков физический смысл среднеквадратичной скорости молекул?
5. Распределение Максвелла допускает сколь угодно большие скорости. Как это согласовать с конечностью полной кинетической энергии молекул газа?
6. Каким образом изменяется форма кривой, изображающей распределение Максвелла, с изменением температуры?
7. О чем говорит закон Дальтона?
8. Можно ли использовать закон Дальтона при большой плотности газовой смеси?
9. Справедлив ли закон Дальтона для химически реагирующих газов? Почему?
10. Какие параметры связывает уравнение Менделеева–Клапейрона?
11. Какая энергия молекулы играет роль при вычислении давления, оказываемого газом на стенку?
12. Под каким углом молекулы отражаются после соударения с поверхностью твердого тела?

13. Как понимать термин "столкновение молекул"? От каких параметров зависит среднее число столкновений молекул в единице объема газа за одну секунду. Как аналитически выражается эта зависимость?
14. Какая из скоростей максвелловского распределения входит в формулу для числа столкновений (квадратичная, средняя арифметическая или наивероятная)?
15. Каков физический смысл сечения соударения молекулы?
16. Что называют средней длиной свободного пробега молекул?
17. Что такое "вакуум" с точки зрения длины свободного пробега? Почему понятие "вакуум" является относительным?
18. Зависит ли средняя длина свободного пробега молекул от их размеров?
19. Зависит ли средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа?
20. Что называют постоянной Сезерленда?
21. Распределение молекул по длинам свободного пробега. Что это такое?
22. Как записывается общее уравнение переноса? Какие условия налагаются на газ при выводе этого уравнения?
23. Как получить из общего уравнения переноса законы диффузии, теплопроводности и вязкости?
24. В чем сущность явления внутреннего трения?
25. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения?
26. Какая связь между коэффициентами динамической и кинематической вязкости?

27. Зависит ли коэффициент внутреннего трения газа от его плотности?
28. От каких характеристик молекул зависит коэффициент внутреннего трения?
29. Что такое конвекция газа?
30. В чем состоит особенность процесса переноса тепла в пристеночной области при низких давлениях газа?
31. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности?
32. Почему в пристеночном слое толщиной λ газу нельзя приписать определенную температуру?
33. Какие виды теплопередачи вы знаете?
34. При каком давлении и каких условиях коэффициент теплопроводности перестает зависеть от давления?
35. Какова размерность коэффициентов вязкости и теплопроводности для газов?
36. Как зависят от давления коэффициенты вязкости и теплопроводности для газов?
37. В каком газе больше коэффициент теплопроводности – в He или H_2 ?
38. Что такое упорядоченное количество движения молекул газа?
39. Зависит ли коэффициент теплопроводности газа от массы молекулы?
40. Что характеризует коэффициент аккомодации и как он определяется?
41. От чего зависит коэффициент аккомодации?

42. В чем сущность явления диффузии?
43. Каков физический смысл коэффициента диффузии?
44. Какая разница между стационарной и нестационарной диффузией?
45. Какая разница между коэффициентом самодиффузии и взаимной диффузии?
46. Как показать, что коэффициент диффузии зависит от температуры? Какова эта зависимость?
47. Могут ли коэффициенты взаимной диффузии и самодиффузии быть равными?
48. В чем отличие эффузии от диффузии?
49. От каких параметров состояния газа зависят коэффициент диффузии, коэффициент внутреннего трения, коэффициент теплопроводности?
50. Какова размерность коэффициента диффузии, коэффициента внутреннего трения и коэффициента теплопроводности? В каких единицах измеряется каждый из этих коэффициентов в системе СИ?
51. Каков физический смысл градиента скорости, градиента температуры, градиента плотности?
52. Будут ли происходить явления переноса в вакууме? Опишите, физическую картину явления переноса и охарактеризуйте зависимость коэффициентов переноса от давления в вакууме.
53. Для чего в термосах и сосудах Дьюара делают двойные стенки?
54. Что нужно учитывать при измерении давления в вакуумной системе, температура которой не везде одинакова?

55. Какие виды течения газа по трубопроводам вам известны?
56. Почему трубопровод оказывает сопротивление движению газа?
57. Какой режим течения газа в вакуумной технике играет второстепенную роль?
58. Что характеризует коэффициент Рейнольдса?
59. В чем отличие ламинарного и молекулярного режимов течения газов?
60. Дайте определение потока газа, объёмной скорости течения и проводимости элемента вакуумной системы.
61. Почему при молекулярном режиме течения газа проводимость не зависит от давления газа?
62. При каком режиме течения газа проводимость сильнее зависит от размеров трубопровода?
63. Как определить проводимость трубопровода при среднем вакууме?
64. Что характеризует соотношение Лавалья?
65. Как найти объем, занимаемый молекулами, ударяющимися о единицу поверхности в единицу времени?
66. Почему при вычислении проводимости короткого и длинного трубопроводов пользуются разными формулами?
67. Влияет ли изгиб трубопровода на его проводимость?
68. В чем разница между стационарным и квазистационарным режимами течения газа?
69. Какие вопросы решают техника и технология вакуума?

70. По каким принципам можно классифицировать вакуумные насосы?
71. Назовите важнейшие параметры вакуумных насосов.
72. В чем разница между номинальной и эффективной быстротой действия насоса?
73. Что такое производительность насоса?
74. Что такое коэффициент использования насоса?
75. Как определяется вакуум-фактор?
76. Что называют основным уравнением вакуумной техники?
77. Что называют давлением запуска вакуумного насоса?
78. Что называют наибольшим рабочим давлением вакуумного насоса?
79. Может ли наибольшее рабочее давление насоса быть равным давлению запуска?
80. Почему быстрота действия насоса при предельном давлении равна нулю?
81. Почему давление в откачиваемом объеме не может уменьшиться до нуля?
82. Что называют предельным давлением насоса?
83. Почему предельное давление насоса не может быть уменьшено до нуля?
84. Какие способы определения быстроты действия насосов вы знаете?
85. Что называют объемной откачкой газа?

86. Можно ли существенно увеличить быстроту действия механического насоса, увеличив частоту циклов откачки?
87. Что называют геометрической быстротой действия механического насоса?
88. Почему реальная быстрота действия механического насоса меньше геометрической быстроты действия?
89. Что называют "вредным" пространством ротационных насосов?
90. Какие способы уменьшения объема "вредного" пространства вам известны?
91. На какие характеристики насоса влияет наличие "вредного" пространства?
92. Чем определяется предельное давление ротационных насосов?
93. Почему включение механического насоса начинают с кратковременного цикла "включение–выключение"?
94. Почему при откачке больших объемов с атмосферного давления механическими насосами используют дросселирование потока газа?
95. Почему для ротационных насосов нормируется давление паров воды на входе в насос?
96. Для чего применяют газовый балласт в механических насосах?
97. Какие характеристики насоса ухудшаются при применении газового балласта?
98. При откачке воздуха с большим содержанием паров воды предельное давление насоса увеличилось. Как с помощью газового балласта восстановить предельное давление насоса?
99. В чем назначение рабочей жидкости в механических насосах?

100. Назовите основные характеристики рабочей жидкости для механических насосов.
101. Для чего применяют ловушки?
102. В чем противоречивость требований к ловушкам?
103. Для чего применяют маслоотражатели?
104. Всегда ли необходимо применять ловушки?
105. Какие типы ловушек вам известны?
106. Для чего применяют последовательное и параллельное включение насосов?
107. Почему после выключения механического насоса в него рекомендуется напускать атмосферный воздух?
108. Почему уровень рабочей жидкости в корпусе механического насоса необходимо поддерживать на определенной отметке?
109. Почему определение уровня рабочей жидкости необходимо проводить только при работающем насосе?
110. На чем основана пароструйная откачка?
111. В чём разница между диффузионным и эжекторным насосами?
112. Может ли в пароструйном насосе выпускное давление быть равным атмосферному?
113. Какие насосы называют бустерными?
114. Какая важная характеристика насосов для бустерного насоса является второстепенной?
115. Зависит ли быстрота действия пароструйного насоса от рода откачиваемого газа?

116. Какой зависимостью связано предельное давление пароструйного насоса с давлением на выходе?
117. Как зависит быстрота действия пароструйного насоса от мощности кипятильника?
118. Для чего используют многоступенчатые пароструйные насосы?
119. Назовите основные характеристики рабочих жидкостей для пароструйных насосов.
120. Почему рабочие жидкости пароструйных насосов нельзя использовать в механических насосах?
121. Что называют насосом с фракционированием рабочей жидкости?
122. Для каких целей служит байпасная линия в вакуумных установках?
123. В каких случаях можно обойтись без байпасной линии?
124. Для чего охлаждают стенки пароструйного насоса?
125. На выхлопе пароструйных насосов часто устанавливают форвакуумный баллон. Для чего он нужен?
126. Можно ли по внешнему виду отличить бустерный насос от обычного диффузионного?
127. Опасно ли попадание атмосферного воздуха в работающий диффузионный насос?
128. В какой области рабочей характеристики использование насоса наиболее рационально?
129. Вам сообщили, что через 10 минут отключат воду в помещении, где работает вакуумная установка с пароструйным насосом. Что вы предпримете?

130. Зависит ли быстрота действия диффузионного насоса от рода рабочей жидкости?
131. Почему быстрота действия диффузионных насосов резко уменьшается как в области высоких давлений, так и в области остаточного давления?
132. Каким образом можно отрегулировать оптимальный режим работы пароструйного насоса?
133. Что такое удельная быстрота действия и вакуум-фактор для пароструйных насосов?
134. Каковы особенности ловушек для пароструйных насосов?
135. Какие ловушки имеют большее защитное действие?
136. Что называют ионно-сорбционной откачкой?
137. В чем особенности откачки инертных газов?
138. Зависит ли быстрота действия ионно-сорбционных насосов от рода откачиваемого газа?
139. В чем принцип действия испарительных насосов?
140. При откачке, каких газов существенную роль играет "замуровывание атомов"?
141. Какие металлы используют для получения пленок в испарительных насосах?
142. В чем недостатки резистивных и электронно-лучевых испарителей геттера?
143. В чем отличие насосов с независимым и саморегулирующимся распылением активного металла?

144. Как можно регулировать скорость испарения титана в орбитронном насосе?
145. Каков механизм получения пленки геттера в магниторазрядном насосе?
146. В чем назначение магнитного поля в магниторазрядном насосе?
147. Чем определяется верхний предел рабочих давлений магниторазрядного насоса?
148. Почему мала быстрота действия магниторазрядных насосов при относительно высоких давлениях?
149. В чём недостатки диодных магниторазрядных насосов?
150. Как повысить быстроту действия магниторазрядного насоса по инертным газам?
151. Чем ограничен ресурс магниторазрядного насоса?
152. Почему предварительное разрежение в ионно-сорбционных насосах нужно создавать безопасными средствами откачки?
153. Что называют аргоновой нестабильностью?
154. Как можно дополнительно понизить предельное давление ионно-сорбционных насосов?
155. Почему именно магниторазрядные насосы используют для автономной работы в некоторых электровакуумных приборах?
156. Что называют криогенной откачкой?
157. Любые ли газы откачивают криогенные насосы?
158. Какие разновидности криогенной откачки вам известны?
159. Что называют молекулярной откачкой?

160. Какие конструкции турбомолекулярных насосов вам известны?
161. Почему стенки статорных и роторных прорезей имеют противоположный наклон?
162. Назовите преимущества и недостатки турбомолекулярных насосов в сравнении с пароструйными насосами.
163. Зависит ли быстрота действия молекулярных насосов от рода откачиваемого газа?
164. Назовите принцип действия адсорбционных насосов.
165. Почему толщина слоя сорбента в адсорбционных насосах обычно не превышает 30 мм?
166. Что можно использовать в качестве адсорбентов?
167. Как можно повысить сорбционную емкость адсорбента?
168. Каковы основные характеристики адсорбционных насосов?
169. Необходимо ли предварительное разрежение для работы адсорбционных насосов?
170. Назовите преимущества и недостатки адсорбционных насосов по сравнению с другими высоковакуумными насосами.
171. Как определить предельное остаточное давление насоса?
172. Как измерить наибольшее выпускное давление?
173. Как измерить давление запуска и время пуска сорбционных насосов?
174. На какие классы по принципу действия делятся вакуумметры?
175. В чем разница между вакуумметрами прямого и косвенного действия?

176. Что является источником ошибок при измерении низких давлений?
177. Какие разновидности гидростатических манометров вам известны?
178. Как повысить чувствительность U-образного манометра?
179. Чем ограничено минимально возможное давление, измеряемое U-образным манометром?
180. Зависят ли показания U-образного манометра от рода газа, давление которого измеряется?
181. U-образный манометр является абсолютным или относительным манометром?
182. Зависит ли чувствительность U-образного манометра от площади сечения его колен?
183. Как устроен укороченный U-образный манометр?
184. На какие группы подразделяют деформационные манометры по типу чувствительного элемента?
185. Чем ограничена чувствительность деформационных манометров?
186. Как можно повысить чувствительность деформационных манометров?
187. Какое применение могут найти компрессионные манометры?
188. Какие способы измерения давления компрессионным манометром вам известны?
189. Назовите недостатки компрессионных манометров.

190. На чем основан принцип действия ионизационных вакуумметров?
191. На какие группы по способу ионизации газа подразделяются ионизационные вакуумметры?
192. Зависят ли показания ионизационного манометра от рода газа?
193. Что принимают за минимальное измеряемое давление в ионизационных вакуумметрах?
194. Чем ограничены пределы измерений ионизационных манометров?
195. Из каких соображений выбирается энергия электронов в термоэлектронном ионизационном манометре?
196. Сравните термоэлектронные ионизационные манометры с внутренним и внешним коллекторами ионов.
197. В чём недостатки большинства ионизационных манометров?
198. Как повысить верхний предел измеряемых давлений термоэлектронным ионизационным манометром?
199. Как понизить нижний предел измеряемых давлений термоэлектронным ионизационным манометром?
200. Назовите принцип работы радиоизотопного манометра.
201. В чем достоинства радиоизотопного манометра по сравнению с термоэлектронным ионизационным?
202. На чем основан принцип работы тепловых манометров?
203. Какие способы измерения давления тепловыми манометрами вам известны?
204. В каких случаях целесообразно применение этих способов?

205. Как уменьшить влияние температуры окружающей среды на показания манометра сопротивления?
206. Из какого металла изготавливают нить манометра сопротивления?
207. Почему нить манометра сопротивления делают длинной и тонкой?
208. Объясните принципы работы термопарного манометра.
209. Как изменяется градуировочная характеристика термопарного манометра при изменении температуры окружающей среды?
210. Почему чувствительность термопарного манометра мала в начале и в конце рабочего диапазона?
211. Почему нагреватель термопарного манометра изготовлен из платины?
212. Чем ограничен диапазон измерений термопарного манометра?
213. Как повысить чувствительность термопарного манометра?
214. Зависят ли показания термопарного манометра от рода газа?
215. Назовите общие рекомендации при подсоединении манометров к вакуумной установке.
216. Какое значение имеет очистка и обезгаживание манометрических преобразователей?
217. В каких случаях при измерении давления необходимо учитывать сорбционно-десорбционные эффекты?
218. Как уменьшить инерционность отсчета давления?
219. Назовите методы градуировки вакуумметров.

220. В чем недостаток статического метода градуировки вакуумметров?
221. Назовите возможные причины образования течей в вакуумных установках.
222. Как отличить газозыделение в системе от натекания через негерметичность?
223. В каких единицах измеряется натекание?
224. Можно ли при наличии течи получить в установке требуемое давление?
225. Что является основным параметром любого метода течеискания?
226. Какие ограничения имеет метод опрессовки?
227. Как повысить чувствительность метода опрессовки?
228. В чем суть поиска течей методом манометров?
229. Какими свойствами должно обладать пробное вещество в методе манометров?
230. Почему иногда после поиска течей методом манометров наблюдается временное улучшение вакуума?
231. Объясните принцип катарометрического метода поиска течей?
232. Чем отличаются метод палладиевого барьера и обычный манометрический метод поиска течей?
233. В чем суть искрового метода течеискания?
234. В чем особенность применения люминесцентного способа поиска течей?

235. Какие недостатки имеет искровой метод течеискания?
236. Объясните принцип работы галоидного течеискателя.
237. Какие принципиальные разновидности поиска течей галоидным течеискателем вам известны?
238. Какой метод поиска течей является самым чувствительным?
239. В чем разница между статическим и динамическим масс-спектрометрами?
240. К какому типу относится омегатронный и монополярный масс-спектрометры?
241. Какие способы разделения ионов по массам в масс-спектрометрах вам известны?
242. Что называют чувствительностью и разрешающей способностью масс-спектрометра?
243. В чем суть разделения ионов по массам в магнитном анализаторе?
244. В чем достоинство времяпролетного масс-спектрометра?
245. Какие методы течеискания пригодны для поиска течей только в металлических вакуумных установках?
246. Что означает обнаружение "ложных" течей в масс-спектральном методе поиска течей?
247. Почему в масс-спектрометрическом методе поиска течей в качестве пробного газа используют гелий?
248. Как осуществляется отбор анализируемого газа в масс-спектрометре?
249. В чем сложность расшифровки масс-спектров?

250. Для чего делают калибровку масс-спектрометра по чистым газам?
251. Какие системы регистрации ионного тока вам известны?
252. В чем разница между статической и динамической чувствительностью масс-спектрального метода течеискания?
253. Какие методы измерения потока разреженного газа вы знаете?
254. Какие методы дозирования потока газа вы знаете?
255. Какие спаи металла со стеклом называют согласованными?
256. Какие уплотнители разборных систем вы знаете?
257. Что нужно учитывать при конструировании соединений с резиновым уплотнителем?
258. В чем достоинства и недостатки резиновых уплотнителей?
259. Какие особенности эксплуатации тефлоновых уплотнителей вам известны?
260. Какое применение находят гибкие вакуумные соединения (сильфоны)?
261. Почему для прогреваемых разборных соединений не рекомендуется использовать в качестве уплотнителя алюминий?
262. Какие способы неразъемных соединений применяют в вакуумной технике?
263. На какие группы подразделяются вакуум-плотные герметичные соединения?
264. Какие разновидности контактной сварки вам известны?

265. Назовите достоинства диффузионной сварки.
266. В чем принципиальная разница в способах соединения сваркой и пайкой?
267. Что нужно учитывать при проектировании узлов вакуумной системы, предназначенных для аргоновой сварки?
268. Почему не рекомендуется производить сварку одного и того же шва со стороны вакуума и атмосферы?
269. Как нужно проектировать резьбовые соединения, находящиеся в вакууме?
270. Каковы особенности проектирования смотровых окон в вакуумных технологических установках?
271. Как с помощью сильфона можно осуществить ввод движения в вакуум?
272. Как с помощью сильфона выполнить ввод качательного движения в вакуум?
273. Назовите основные требования к вакуумной коммутационной аппаратуре.
274. Какое преимущество имеет вакуумная коммутационная арматура с ручным приводом по сравнению с электромеханическим приводом?
275. Назовите основные типы устройств для напуска газа в вакуумные системы.
276. Каково назначение золотниковых устройств в вакуумных установках?
277. Какие конструкционные материалы используют при изготовлении вакуумных установок?

278. Что нужно учитывать при изготовлении из латуни деталей вакуумной установки?
279. Какое применение в вакуумной технике находят легкоплавкие металлы и сплавы?
280. Для чего в вакуумных установках применяют шлюзовые системы?
281. Что называют закрытыми шлюзовыми системами?
282. Назовите недостатки открытых шлюзовых систем.
283. Назовите недостатки полуоткрытых шлюзовых систем.

СПРАВОЧНЫЙ РАЗДЕЛ

Физические постоянные

Наименование величины	Округленное значение в системе СИ
Постоянная Больцмана, k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Универсальная газовая постоянная, R	8,314 Дж/моль·К
Заряд электрона, e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона, m_e	$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона, m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Планка, h	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Скорость света в вакууме, c	$3,0 \cdot 10^8$ м/с
Число Авогадро (число молекул в 1 моле вещества)	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹

Перевод единиц давления

	Па (Н/м ²)	бар	мбар	мм рт. ст. (тор)	атм
Па (Н/м ²)	1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$
бар	$1 \cdot 10^5$	1	1000	750	0,987
мбар	100	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,75	$9,87 \cdot 10^{-4}$
мм рт. ст. (тор)	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,33	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
атм	$1,01 \cdot 10^5$	1,013	1013	760	1

Температура Сезерленда, эффективный диаметр молекул и теплоемкость для ряда газов

Газ	C , К	d , 10^{-10} м	C_v , кДж/(кг·К)
N ₂	104	2,74	0,73
O ₂	125	3,01	0,66
CO ₂	273	3,36	0,66
Ar	152	3,00	0,31
H ₂ O	659	2,53	1,47
Ne	56	2,35	0,68
H ₂	72	2,41	10,2
He	20	1,94	3,13
Воздух	113	3,00	0,72

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов. / Л.Н. Розанов. – М.: Высш. шк., 1990. – 320с.
2. Грошковский, Я. Техника высокого вакуума / Я. Грошковский; пер. с польск. – М.: Мир, 1975. – 624с.
3. Вакуумная техника: Справочник / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1985. – 360с.
4. Пипко, А. П. Основы вакуумной техники: учебник для техникумов/ А.П. Пипко, В.Я. Плисковский, Б. И. Королев, В.И. Кузнецов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432с.
5. Петров, В. А. Вакуумная техника / В.А. Петров. – М.: Наука, 1983. – 500с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ФИЗИКА РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ	3
Элементы кинетической теории и газовые законы	3
Задачи	7
Явления переноса	14
Задачи	15
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ.....	19
Процессы изменения состояния газа в вакуумных системах.....	20
Адиабатический процесс.....	20
Критерий определения границ режимов течения газа в трубопроводах	21
Пропускная способность отверстий.....	22
Пропускная способность трубопроводов.....	25
Выбор форвакуумного насоса для диффузионного насоса.....	29
Задачи	31
3. ЗАДАНИЯ НА РАСЧЕТНЫЕ РАБОТЫ	35
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	42
Справочный раздел	62
Список литературы	63

Холодкова Наталия Витальевна

Сборник вопросов и задач по курсу ТЕХНИКА ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 23.10.2008. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 4,13. Тираж 100 экз. Заказ

ГОУВПО Ивановский государственный
химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и
финансов ГОУ ВПО "ИГХТУ"
153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7