

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.В. Логвиненко, В.И. Иванов

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

УДК 621.521

Логвиненко Е.В., Иванов В.И. Сборник задач по вакуумной технике: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 40 с.

Предназначено для студентов направлений бакалавриата 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика и 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по дисциплине «Вакуумная техника» (всех форм обучения).

Рецензент: доктор техн. наук, проф. Вологжанина С.А.

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 2 от 30.10.2015 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015

© Логвиненко Е.В., Иванов В.И., 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения величин.....	4
Основные уравнения.....	6
1. Элементы кинетической теории газов и газовые законы.....	9
2. Проводимость трубопровода (канала)	
Идеальный вакуумный насос.....	19
3. Основное уравнение вакуумной техники.....	22
4. Вакуумные насосы и системы.....	25
5. Криогенные вакуумные насосы.....	31
6. Вакуумметрия.....	34
Список литературы.....	38
Приложение.....	39

ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН

n [1/м³] - число молекул в 1 м³;

$\bar{v}_{ар}$ [м/с]- средняя арифметическая скорость молекул;

\bar{l} [м] - средняя длина свободного пробега молекул;

$R_0 = 8314$ [Дж/(кмоль·К)] - универсальная газовая

постоянная;

M [кг/кмоль] - молекулярная масса;

$R = \frac{R_0}{M}$ [Дж/(кг·К)] - удельная газовая постоянная (газовая

постоянная конкретного газа);

d [м] - характерный размер объекта;

T [К] - абсолютная температура;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К] - постоянная Больцмана;

$Kn = \frac{\bar{l}}{d}$ - критерий Кнудсена;

p [Па] - давление;

$N_{уд}$ [1/(м²·с)] - число молекул, набегающих на 1 м² за

1 секунду;

G [кг/с] - массовая производительность насоса (массовый расход газа);

S_n^* [м³/с] - быстрота действия идеального насоса;

F [м²] - площадь;

V [м³] - объем объекта (камеры);

$U_э$ [В]- напряжение;

$R_э$ [Ом]- сопротивление;

$I_э$ [А]- сила тока;

Q [м³·Па/с] - поток газа;

τ [с]- продолжительность вакуумирования, время;

m [кг]- масса;

U [м³/с] - проводимость канала (системы);

$U_{отв}$ [м³/с] - проводимость отверстия;

S_o [м³/с] - скорость откачки объекта;

S_n [м³/с] - быстрота действия насоса;

η - вакуум-фактор (коэффициент X_0);

K - коэффициент использования насоса;

$S_{уд} [м^3/(с·м^2)]$ - объем газа, набегающего на $1 м^2$ поверхности за 1 секунду;

$S [м^3/с]$ - объемный расход газа;

K_k - коэффициент Клаузинга;

σ - эффективный диаметр молекулы;

C - постоянная, зависящая от рода газа.

Индексы:

о – параметр объекта;

н – параметр насоса;

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

1. Уравнения состояния идеального газа:

$$pV = \frac{mR_oT}{M};$$

$$p = nkT;$$

$$pS = \frac{GR_oT}{M}.$$

2. Среднеарифметическая скорость движения молекул:

$$\bar{v}_{ар} = \sqrt{\frac{8R_oT}{\pi M}}.$$

3. Число молекул, ударяющихся в течение одной секунды об 1 м^2 поверхности:

$$N_{уд} = \frac{1}{4} n \cdot \bar{v}_{ар}.$$

4. Объем газа, набегающий на 1 м^2 поверхности за 1 секунду:

$$S_{уд} = 36,4 \sqrt{\frac{T}{M}}.$$

5. Поток газа:

$$Q = S \cdot p.$$

6. Критерий Кнудсена:

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d}.$$

7. Средняя длина свободного пробега молекул:

$$\bar{l} = \frac{kT}{\sqrt{2} \cdot p \cdot \pi \cdot \sigma^2 \left(1 + \frac{C}{T}\right)}.$$

8. Средняя длина свободного пути молекул воздуха при температуре $T=293\text{ К}$:

$$\bar{l} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{p}.$$

9. Коэффициент теплопроводности газов:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{v}_{ар} \cdot \bar{l} \cdot c_v.$$

10. Тепловой поток:

при $Kn \ll 1$

$$Q_T = \frac{\lambda}{d} \cdot F(T_T - T_x);$$

при $Kn \approx 1$

$$Q_T = \frac{\lambda}{d} \cdot F(T_T - T_x) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\bar{l}}{\alpha_{ак} \cdot K_i \cdot d}};$$

при $Kn \gg 1$

$$Q_T = \lambda \cdot F(T_T - T_x) \cdot \frac{K_i \cdot \alpha_{ак}}{\bar{l}};$$

где $K_i = 1,92$ - для двухатомных газов.

11. Проводимость:

$$U = \frac{Q}{p_o - p_n}.$$

12. Минимальное давление, достигаемое в объекте откачки:

$$p_{min} = \frac{Q}{S_o}.$$

13. Проводимость сложного трубопровода при параллельном соединении его элементов:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

14. Проводимость сложного трубопровода при последовательном соединении его элементов:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_n}.$$

15. Проводимость отверстия в молекулярном режиме:

$$U_o = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}}.$$

16. Проводимость трубопровода в молекулярном режиме течения газа:

$$U_{mp} = K_k \cdot U_o.$$

17. Средняя длина свободного пути молекул газа:

$$\bar{l} = \frac{b}{p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C}{T}}.$$

18. Термическое уравнение адсорбции Генри:

$$a = B \cdot p \cdot \exp\left(\frac{A}{T_{\text{ад}}}\right).$$

19. Быстрота действия идеального вакуумного насоса в вязкостном режиме течения газа:

$$S_{\text{ид.в.}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{R_o T}{M}}.$$

1. Элементы кинетической теории газов и газовые законы

Задача 1.1

Определить концентрацию молекул газа при давлении $p=10^{-2}$ Па и температуре $T=300$ К.

Ответ: $n=2,41 \cdot 10^{10}$ 1/м³.

Задача 1.2

Определить длину свободного пробега молекул воздуха при температуре $T=300$ К и давлении $p=10^{-1}$ Па.

Ответ: $\bar{l} = 6,7 \cdot 10^{-2}$ м.

Задача 1.3

Каков режим течения воздуха в трубе диаметром $d = 0,05$ м, если давление газа $p=10^{-2}$ Па, а температура $T=300$ К.

Ответ: режим течения молекулярный ($Kn = 13,4$).

Задача 1.4

В камеру, где давление $p=10^{-3}$ Па, поступает через микротечь 1 см³/с воздуха.

Какова должна быть скорость откачки камеры, чтобы поддерживать в ней указанное давление?

Ответ: $S_o = 100$ м³/с.

Задача 1.5

Какова средняя арифметическая скорость молекул азота при температуре $T=300$ К.

Ответ: $\bar{v}_{ар} = 476,4$ м/с.

Задача 1.6

Какова средняя арифметическая скорость молекул водорода при температуре $T=100$ К.

Ответ: $\bar{v}_{ар} = 1290,1$ м/с.

Задача 1.7

Сколько молекул воздуха набегает на 1 м^2 поверхности за 1 секунду, если давление газа $p=10^{-2}$ Па, а температура $T=300 \text{ К}$?

Ответ: $N = 2,83 \cdot 10^{20} \text{ 1/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

Задача 1.8

Определить величину критерия Кнудсена в изоляционном пространстве сосуда Дьюара, если давление воздуха $p=1$ Па, а температура $T=185 \text{ К}$. Расстояние между стенками сосуда Дьюара $d = 10 \text{ мм}$. Коэффициенты $b = 8,42 \cdot 10^{-3}$, $C = 113 \text{ К}$.

Ответ: $Kn = 0,52$.

Задача 1.9

В камере объемом $V= 0,02 \text{ м}^3$ давление газа $p=5 \cdot 10^{-4}$ Па и температура $T=290 \text{ К}$. Каким станет давление в камере, если с поверхности стенок десублимируется $N = 5 \cdot 10^{16}$ молекул воды?

Ответ: $p = 1,05 \cdot 10^{-2}$ Па.

Задача 1.10

Во сколько раз средняя скорость движения молекул водорода больше чем у молекул ртути ($M=201$) при температуре $T=290 \text{ К}$?

Ответ: в 10 раз.

Задача 1.11

В камере объемом $V= 2 \text{ м}^3$ находится $m=0,05$ кг воздуха при температуре $T=300 \text{ К}$. Каково давление в камере?

Ответ: $p = 2150$ Па.

Задача 1.12

Какова концентрация молекул воздуха при давлении $p=760$ мм рт.ст. и температуре $T=293 \text{ К}$.

Ответ: $n=2,5 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$.

Задача 1.13

В камере объемом $V= 2 \text{ м}^3$ находится $m=0,05$ кг водород при температуре $T=300 \text{ К}$.

Каково давление в камере?

Ответ: $p=31177$ Па.

Задача 1.14

В камере объемом $V = 5 \text{ м}^3$ находится азот при давлении $p = 0,1 \text{ Па}$ и температуре $T = 290 \text{ К}$.

Каково масса газа в камере?

Ответ: $m = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$.

Задача 1.15

В камере объемом $V = 0,5 \text{ м}^3$ давление $p_1 = 1000 \text{ Па}$ и температура $T_1 = 270 \text{ К}$.

Каким будет давление в камере, если её нагреть до $T_2 = 350 \text{ К}$.

Ответ: $p_2 = 1296 \text{ Па}$.

Задача 1.16

В «мокрое» газгольдере находится $V_1 = 5 \text{ м}^3$ гелия при давлении $p_1 = 770 \text{ Торр}$ и температура $T_1 = 298 \text{ К}$.

Каков будет объем газа V_2 , если температура снизится до $T_2 = 280 \text{ К}$, а давление повысится до $p_2 = 780 \text{ Торр}$?

Ответ: $V_2 = 4,64 \text{ м}^3$.

Задача 1.17

В камере объемом $V = 80 \text{ м}^3$ находится $m = 0,06415 \text{ кг}$ газа при давлении $p = 1000 \text{ Па}$ и температура $T = 300 \text{ К}$.

Какой это газ?

Ответ: водород.

Задача 1.18

Давления в камере $p = 10^{-6} \text{ Па}$ и температура $T = 290 \text{ К}$.

Какова концентрация молекул в камере?

Сравнить с концентрацией молекул в помещении при той же температуре.

Ответ: $n = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}^3$; $2,5 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$.

Задача 1.19

Давления воздуха в камере $p = 1000 \text{ Па}$. Каково парциальное давление кислорода в камере?

Ответ: $p_{\text{кисл}} = 209 \text{ Па}$.

Задача 1.20

В камеру объемом $V=5\text{ м}^3$ с давлением $p_1=250\text{ Па}$ добавили 2 моль газа при температуре $T=293\text{ К}$.

Каким стало давление в камере?

Ответ: $p_2=1224\text{ Па}$.

Задача 1.21

Баллон, содержащийся при давлении $p_1=10^5\text{ Па}$, имеет объем $V_1=10\text{ л}$.

Как изменится давление газа в баллоне, если его сообщить с другим баллоном объемом $V_2=100\text{ л}$, в котором давление 5 Па.

Температуру считать постоянной.

Ответ: $p_3=9095\text{ Па}$.

Задача 1.22

Определить объем киломоля газа при давлении $p=1,012\cdot 10^5\text{ Па}$ и температуре $T_1=273\text{ К}$ и $T_2=373\text{ К}$,

Ответ: $v_{273}=22,4\text{ м}^3/\text{кмоль}$; $v_{373}=30,6\text{ м}^3/\text{кмоль}$.

Задача 1.23

Газ в баллоне находится при давлении $p_1=1,5\text{ МПа}$ и температуре $T_1=293\text{ К}$.

Как изменится давление в баллоне, если его нагреть до температуры $T_2=493\text{ К}$?

Ответ: $p_2=25,24\text{ МПа}$.

Задача 1.24

В камере объемом $V=0,5\text{ м}^3$ находится $N=10^{18}$ молекул газа при температуре $T=280\text{ К}$.

Каково давление газа в камере?

Ответ: $p=773\cdot 10^{-3}\text{ Па}$.

Задача 1.25

Быстрота действия вакуумного насоса по воздуху $S=2\text{ м}^3/\text{с}$ при давлении $p_1=10^{-2}\text{ Па}$ и температуре $T=300\text{ К}$.

Определить массовую производительность насоса.

Ответ: $G=2,33\cdot 10^{-7}\text{ кг/с}$.

Задача 1.26

На криопанели десублимируется (вымораживается) $G=2$ г/с азота, находящегося при давлении $p=8$ Па и температуре $T=110$ К.

Определить скорость откачки криопанелью азота.

Ответ: $S=8,16$ м³/с.

Задача 1.27

В камере объемом $V=12$ м³ находится водород под давлением $p=2000$ Па и температуре $T=290$ К.

Определить плотность газа.

Ответ: $\rho=1,66$ г/м³.

Задача 1.28

В камере объемом $V=0,2$ м³ находится $G=0,06$ кг кислорода под давлением $p=8000$ Па.

Какова температура газа в камере?

Ответ: $T=102,6$ К.

Задача 1.29

Сколько молекул содержится в объеме $V=1$ мм³ при давлении $p=10^{-2}$ Па и температуре $T=280$ К?

Ответ: $N=2,59 \cdot 10^9$ молекул.

Задача 1.30

Давление газа в электролампе $p_1=6 \cdot 10^4$ Па при температуре $T_1=300$ К. Определить давление в лампе после её включения, когда температура станет $T_2=450$ К.

Ответ: $p=0,9 \cdot 10^5$ Па.

Задача 1.31

Водяной пар при температуре $T=293$ К и давлении $p_1=500$ Па занимает объем $V_1=300$ см³. Каково будет давление пара при той же температуре, если объем уменьшить (сжать) до $V_2=200$ см³; $V_3=100$ см³; $V_4=10$ см³? Давление насыщенного пара $p_{H_2O}^*=17,5$ мм рт.ст. при $T=293$ К.

Ответ: $p_2=750$ Па; $p_3=1500$ Па; $p_4=2332,7$ Па.

Задача 1.32

Объем смеси азота (парциальное давление $p'_{N_2} = 70 \text{ Па}$) и паров воды (парциальное давление $p'_{H_2O} = 30 \text{ Па}$) уменьшен изотермически при температуре $T=293 \text{ К}$ в 1000 раз. Каково будет давление сжатой смеси?

Упругость паров воды при $T=293 \text{ К}$ $p_{H_2O}^* = 2332,7 \text{ Па}$.

Ответ: $p_{смеси} = 72332,7 \text{ Па}$.

Задача 1.33

Какова среднеарифметическая скорость молекул гелия при температуре $T=290 \text{ К}$?

Ответ: $\bar{w}_{ар} = 1239 \text{ м/с}$.

Задача 1.34

Во сколько раз скорость движения молекул водорода больше скорости движения молекул кислорода?

Ответ: в 4 раза.

Задача 1.35

Сколько молекул воздуха ударяется о поверхность стенки сосуда площадью $F=1 \text{ м}^2$ за время $\tau=1 \text{ с}$?

Давление воздуха $p=2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, температура $T=290 \text{ К}$.

Ответ: $N_{уд} = 575,3 \cdot 10^{17} \text{ 1/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

Задача 1.36

Определить среднюю длину свободного пути молекул воздуха ($\sigma = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $C=112 \text{ К}$) при давлении $p=10^{-1} \text{ Па}$ и температуре $T=293 \text{ К}$.

Ответ: $\bar{l} = 6,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Задача 1.37

Как изменится средняя длина свободного пути молекул воздуха ($C=112 \text{ К}$) при снижении температуры с $T_1=293 \text{ К}$ до $T_2=103 \text{ К}$, если давление не изменилось?

Ответ: уменьшится в 4,3 раза.

Задача 1.38

Во сколько раз средняя длина свободного пути атомов гелия ($\sigma=1,94 \cdot 10^{-10}$ м; $C=80$ К) больше чем у молекул азота ($\sigma=2,74 \cdot 10^{-10}$ м; $C=116$ К) при температуре $T=298$ К, если давление одинаковое?

Ответ: в 2,18 раза.

Задача 1.39

Расстояние между стенками $d=0,5$ м. Газ – воздух при температуре $T=293$ К и давлении $p=10^{-2}$ Па. Чему равен критерий Кнудсена?

Ответ: $Kn=1,34$.

Задача 1.40

Расстояние между стенки термометрического вакуумметра и нитью накала $d=10^{-2}$ м. Какой режим движения молекул воздуха реализуется между ними, если давление в колбе $p=5$ Па, а температуру принять $T=293$ К.

Ответ: режим переходный.

Задача 1.41

В теплоизоляционном порошке (аэрогель), средняя величина зазора между зернами $d=6,5 \cdot 10^{-5}$ м. При каком давлении воздуха между зернами порошка наступит молекулярный режим движения молекул? Температуру принять $T=293$ К.

Ответ: $p < 100$ Па.

Задача 1.42

По трубе диаметров $d=0,2$ м течет воздух при давлении $p=15$ Па. Температура газа $T=293$ К. Какой режим течения в трубе?

Ответ: режим вязкостный.

Задача 1.43

В камере имитации космоса давление воздуха ($\sigma=3 \cdot 10^{-10}$ м; $C=112$ К) $p=4 \cdot 10^{-6}$ Па и температуре $T=80$ К.

Какой обеспечивается режим движения молекул для объекта с характерным размером $d=3$ м?

Ответ: режим молекулярный.

Задача 1.44

Определить примерное значение коэффициента теплопроводности воздуха при давлении $p=10^4$ Па и температуре $T=293$ К.

Ответ: $\lambda=8,8 \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; точное значение : $\lambda=25,6 \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Задача 1.45

Как изменится теплопроводность газа при снижении давления с $p_1=10^5$ Па до $p_2=10^4$ Па, если температура газа останется постоянной.

Ответ: не изменится.

Задача 1.46

Как изменится тепловой поток при высоком вакууме ($Kn \gg 1$) между параллельными стенками, если расстояние между ними увеличить в 15 раз?

Ответ: не изменится.

Задача 1.47

В колбе объемом $V = 0,02$ м³ давление газа $p_1=500$ Па.

Каким станет давление в колбе после её нагрева с $T_1 = 290$ К до $T_2 = 600$ К (сорбционные процессы не учитывать)?

Ответ: $p_2=1034,5$ Па.

Задача 1.48

Во сколько раз тепловой поток между параллельными пластинами меньше при высоком вакууме $p_в=10^{-2}$ Па по сравнению с потоком при низком вакууме $p_н=10^3$ Па (газ – воздух, $K_1=1,92$; $\alpha_{ак}=0,8$), $d=0,05$ м.

Ответ: примерно в 10 раз.

Задача 1.49

Резервуар для жидкого азота имеет высоковакуумную тепловую изоляцию. Средняя температура газа в изоляционном пространстве $T_n = 185$ К.

При измерении вакуума в изоляционной полости внешний датчик показал давление $p_{\text{п}} = 5 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура колбы датчика $T_{\text{д}} = 293$ К.

Какова концентрация молекул газа в изоляционной полости резервуара?

Ответ: $n_{\text{и}} = 1,55 \cdot 10^{22}$ 1/м³.

Задача 1.50

Определить режим течения воздуха по трубопроводу диаметром $d = 0,1$ м, если его среднее давление $p = 10^{-2}$ Па. Температура $T = 290$ К.

Ответ: режим молекулярный.

Задача 1.51

Баллон, содержащий газ при давлении $p_1 = 10^5$ Па, имеет объем $V_1 = 10^{-2}$ м³.

Какое станет давление газа в баллоне, если его сообщить с другим баллоном объемом $V_2 = 0,2$ м³, в котором давление $p_2 \approx 0$ Па. Температура постоянная.

Ответ: $p_3 = 4,76 \cdot 10^3$ Па.

Задача 1.52

Определить среднюю арифметическую скорость молекул водорода при температуре $T = 200$ К.

Ответ: $\bar{v}_{\text{ар}} = 1455$ м/с.

Задача 1.53

Определить число молекул воздуха при температуре $T = 300$ К и давлении $p = 10^{-5}$ Па, ударяющихся о поверхность площадью $F = 1$ м².

Ответ: $N = 2,823 \cdot 10^{17}$ 1/(м² · с).

Задача 1.54

Какова массовая производительность идеального насоса при $F = 0,2 \text{ м}^2$; $T = 300 \text{ К}$; откачиваемый газ – воздух; давлении $p = 10^{-2} \text{ Па}$.

Ответ: $G = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$.

2. Проводимость трубопровода (канала). Идеальный вакуумный насос

Задача 2.1

В камеру поступает поток газа $Q=3 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ и одновременно она откачивает со скоростью $S_o = 2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какое давление установится в камере?

Ответ: $p_{min} = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$.

Задача 2.2

В трубопровод, соединяющий камеру с насосом, поступает поток газа $Q=4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Чему равна проводимость трубопровода, если перепад давлений на его концах $\Delta p = 2 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$.

Ответ: $U = 2 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.3

Трубопровод состоит из двух участков труб проводимостью $U_1 = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ и $U_2 = 8 \text{ м}^3/\text{с}$ и вентиля между ними проводимостью $U_v = 10 \text{ м}^3/\text{с}$.

Определить общую проводимость трубопровода.

Ответ: $U = 2,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.4

Быстрота действия насоса $S_n = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$. Давление на входе в насос $p_n = 0,15 \text{ Па}$, а в объекте $p_o = 0,25 \text{ Па}$.

Чему равна проводимость трубопровода, соединяющего объект с насосом?

Ответ: $U = 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.5

Определить проводимость отверстия диаметром $d = 0,05 \text{ м}$.

Режим течения газа молекулярный, а газ – азот, температура $T=300 \text{ К}$.

Ответ: $U_o = 0,234 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.6

Определить поток гелия через отверстие в тонкой пластине. Диаметр отверстия $d = 0,2$ м. Температура и давление газа по одну сторону пластины $T_1 = 300$ К, $p_1 = 0,02$ Па, по другую $T_2 = 200$ К, $p_2 = 0,001$ Па.

Ответ: $Q = 0,19 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Задача 2.7

Определить быстроту действия идеального вакуумного насоса, имеющего входное отверстие $d = 0,4$ м при откачке водорода с температурой $T = 293$ К. Режим молекулярный.

Ответ: $S_n = 55,3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.8

Определить проводимость трубопровода диаметром $d = 0,3$ м и длиной $l = 0,21$ м. По трубопроводу течет воздух при давлении $p = 10^{-2}$ Па и температуре $T = 300$ К.

Ответ: $U_{тр} = 2,32 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.9

Трубопровод представляет собой последовательно соединенные три элемента: первый элемент – труба диаметром $d_1 = 0,1$ м и длиной $l_1 = 0,5$ м; второй элемент – вентиль проводимостью $U_e = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$; третий элемент – труба диаметром $d_3 = 0,16$ м и длиной $l_3 = 0,48$ м.

Определить проводимость всей системы, если режим течения воздуха молекулярный при температуре $T = 280$ К.

Ответ: $U = 0,117 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.10

Определить быстроту действия идеального вакуумного насоса в вязкостном режиме течения газа. Диаметр входного отверстия насоса $d = 0,1$ м. Температура откачиваемого воздуха $T_o = 280$ К.

Ответ: $S_n = 2,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.11

Быстрота действия насоса $S_n = 2 \text{ м}^3/\text{с}$. Проводимость трубопровода между насосом и объектом $U = 4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Каков коэффициент использования насоса?

Ответ: $\eta = 0,667$.

Задача 2.12

Какова быстрота действия идеального вакуумного насоса, имеющего площадь входного отверстия $F = 0,2 \text{ м}^2$ при откачке воздуха при температуре $T = 290 \text{ К}$?

Ответ: $S_n = 23 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2.13

Идеальный вакуумный насос с площадью входного отверстия $F = 0,1 \text{ м}^2$ имеет быстроту действия $S_n = 31,52 \text{ м}^3/\text{с}$. Какой газ откачивают, если его температура $T = 300 \text{ К}$?

Ответ: гелий.

Задача 2.14

Определить массовую быстроту действия идеального вакуумного насоса, откачивающего азот при давлении $p = 10^{-2} \text{ Па}$ и температуре $T = 300 \text{ К}$. Площадь входного отверстия $F = 0,2 \text{ м}^2$.

Ответ: $G_n = 2,67 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}$.

Задача 2.15

В камеру поступает поток воздуха $Q = 3 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Какова должна быть площадь входного отверстия идеального вакуумного насоса, чтобы поддерживать в камере давление $p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, если температура в камере $T = 290 \text{ К}$.

Ответ: $F = 0,521 \text{ м}^2$.

3. Основное уравнение вакуумной техники

Задача 3.1

Вакуумный насос с быстротой действия $S_n = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ подсоединен к откачиваемому объекту посредством трубопровода, имеющего проводимость $U = 1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какова скорость откачки объекта S_o ?

Ответ: $S_o = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.2

Натекание в камеру $Q = 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Проводимость трубопровода между камерой и насосом $U = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какова должна быть быстрота действия насоса S_n , чтобы поддерживать в камере давление $p = 10^{-1} \text{ Па}$?

Ответ: $S_n = 0,125 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.3

Быстрота действия вакуумного насоса $S_n = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$. На трубопроводе, соединяющем насос с объектом, установлен вентиль. Проводимость трубопровода $U_{mp} = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, проводимость вентиля $U_v = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Определить скорость откачки объекта S_o .

Ответ: $S_o = 0,08 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.4

Скорость откачки объекта должна быть $S_o = 5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какова должна быть проводимость трубопровода между объектом и насосом, чтобы коэффициент использования насоса был $\eta = 0,4$.

Ответ: $U = 8,33 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.5

Натекание в объект $Q = 7 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Проводимость трубопровода между объектом и насосом $U = 4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какова должна быть быстрота действия насоса S_n , чтобы обеспечить в объекте давление $p = 3 \cdot 10^{-1}$ Па.

Ответ: $S_n = 5,58 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.6

В объекте поддерживается давление $p = 4 \cdot 10^{-3}$ Па при величине натекания в него $Q = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Какова быстрота действия вакуумного насоса?

Ответ: $S_n = 13,9 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.7

Быстрота действия вакуумного насоса $S_n = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$. Проводимость трубопровода $U = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Определить скорость откачки объекта S_o .

Ответ: $S_o = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.8

Величина натекания газа в камеру составляет $Q = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

Определить минимальное давление, если скорость откачки камеры $S_o = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ответ: $p_{min} = 0,2 \text{ Па}$.

Задача 3.9

Натекание в камеру составляет $Q = 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Проводимость трубопровода между насосом и камерой $U = 5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какова должна быть быстрота действия вакуумного насоса S_n , чтобы поддерживать в камере давление $p = 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$?

Ответ: $S_n = 0,102 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.10

Быстрота действия вакуумного насоса $S_n = 5 \text{ м}^3/\text{с}$, а проводимость затвора перед насосом $U = 8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Какова будет скорость откачки объекта S_o ?

Ответ: $S_o = 3,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 3.11

Оценить быстроту действия диффузионного вакуумного насоса, имеющего диаметр входного отверстия $D = 0,5$ м, а диаметр сопла первой ступени $d = 0,2$ м. Откачиваемый газ – воздух при температуре $T = 290$ К. КПД насоса – 0,35.

Ответ: $S_n = 6,6 \text{ м}^3/\text{с}$.

4. Вакуумные насосы и системы

Задача 4.1

Диаметр входного отверстия диффузионного насоса $D = 0,2$ м, диаметр сопла первой ступени $d = 0,07$ м.

Определить быстроту действия насоса по воздуху при давлении на входе в насос $p_{\text{вх}} = 10^{-2}$ Па, если предельный вакуум $p_{\text{min}} = 10^{-4}$ Па. Температура газа $T = 290$ К.

Ответ: $S_{\text{H}} = 1,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 4.2

Определить термодинамический КПД диффузионного насоса Н-0,5, у которого быстрота действия $S_{\text{H}} = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 10^{-2}$ Па, давление на выходе $p_{\text{вых}} = 20$ Па; мощность электронагревателя $W = 0,9$ кВт.

Ответ: $\eta_{\text{T}} = 0,000042$.

Задача 4.3

Определить термодинамический КПД диффузионного насоса Н-1С-2, у которого быстрота действия $S_{\text{H}} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 10^{-2}$ Па, давление на выходе $p_{\text{вых}} = 40$ Па; мощность электронагревателя $W = 0,5$ кВт.

Ответ: $\eta_{\text{T}} = 0,000017$.

Задача 4.4

Определить вакуум-фактор диффузионного насоса Н-0,5, у которого диаметр входного отверстия насоса $D = 0,16$ м, диаметр сопла первой ступени $d = 0,06$ м; быстрота действия по воздуху $S_{\text{H}} = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре газа $T = 293$ К.

Ответ: $\eta = 0,25$.

Задача 4.5

Быстрота действия диффузионного насоса Н-250/2500 $S_d = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении на входе $p_{\text{вх}} = 10^{-1} \text{ Па}$. Наибольшее давление на выходе $p_{\text{вых}} = 27 \text{ Па}$.

Определить требуемую быстроту действия форвакуумного насоса.

Ответ: $S_{\text{ф}} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 4.6

Определить термодинамический КПД диффузионного насоса Н-400/7000, у которого быстрота действия $S_n = 4,9 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении воздуха на входе $p_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ Па}$, давление на выходе $p_{\text{вых}} = 15 \text{ Па}$; мощность электронагревателя $W = 4 \text{ кВт}$.

Ответ: $\eta_t = 0,00009$.

Задача 4.7

Быстрота действия ротационного насоса $S_n = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$. Мощность привода $W = 0,9 \text{ кВт}$.

Определить изотермический КПД насоса при давлениях на входе $p_{\text{вх}} = 10^2; 10^3; 10^4; 2 \cdot 10^4; 4 \cdot 10^4; 6 \cdot 10^4; 8 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Ответ:

$\eta_{\text{из}} = 0,0038; 0,026; 0,1279; 0,1788; 0,2036; 0,1703; 0,0992$.

Задача 4.8

Вакуумный насос откачивает увлажненный воздух. Давление на входе в насос $p_{\text{вх}} = 20 \text{ Па}$, давление на выходе $p_{\text{вых}} = 1,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Температура насоса $t = 60^\circ \text{ С}$.

Каково допустимое давление паров воды на входе в насос, при котором не будет происходить их конденсация в процессе сжатия откачиваемого газа.

Ответ: $p_{\text{дон}} < 3,8 \text{ Па}$.

Задача 4.9

Определить расход воды на охлаждение диффузионного насоса Н-0,5. Термодинамический КПД насоса $\eta_m = 0,000042$. Мощность электронагревателя $W = 0,9$ кВт.

Температура воды на входе в насос $T_n = 15$ °С, температура на выходе $T_k = 25$ °С.

Ответ: $G_{H_2O} \approx 77$ л/ч.

Задача 4.10

Определить максимальную быстроту действия ротационного вакуумного насоса с масляным уплотнением, если объем рабочей полости $V_k = 0,01$ м³, частота вращения вала $n = 15$ с⁻¹, коэффициент откачки $\lambda = 0,8$.

Ответ: $S_n = 0,12$ м³/с.

Задача 4.11

Определить эффективную мощность на валу ротационного вакуумного насоса при давлении всасывания $p = 20$ кПа, если быстрота действия насоса $S_n = 10^{-2}$ м³/с, коэффициент откачки $\lambda = 0,8$, а условный полный изотермический КПД $\eta = 0,5$.

Ответ: $N_e = 500$ Вт.

Задача 4.12

Определить быстроту действия форвакуумного насоса, если диффузионный насос имеет быстроту действия $S_d = 5$ м³/с, давление на входе $p_{вх} = 10^{-2}$ Па, давление на выходе $p_{вых} = 0,5$ Па.

Ответ: $S_f \geq 0,1$ м³/с.

Задача 4.13

Определить проводимость цилиндрического трубопровода диаметром $d = 0,2$ м и длиной $L = 10$ м в молекулярном режиме течения воздуха при температуре $T = 300$ К.

Ответ: $U = 0,013$ м³/с.

Задача 4.14

Определить проводимость цилиндрического трубопровода диаметром $d = 0,05$ м, имеющего колено (первое плечо $l_1 = 0,5$ м, второе плечо $l_2 = 0,8$ м) в молекулярном режиме течения гелия при температуре $T = 200$ К.

Ответ: $U = 0,023$ м³/с.

Задача 4.15

Определить проводимость диафрагмы диаметром $d = 0,03$ м в вязкостном режиме течения воздуха при отношении давлений более 2 и температуре $T_o = 290$ К.

Ответ: $U_o = 0,22$ м³/с.

Задача 4.16

Определить скорость откачки объекта, соединенного с насосом цилиндрическим трубопроводом ($d = 0,08$ м; $l = 0,64$ м), если быстрота действия насоса $S_n = 0,1$ м³/с. Откачиваемый газ – воздух при температуре $T = 290$ К.

Ответ: $S_o = 0,044$ м³/с.

Задача 4.17

Вакуумная камера объемом $V = 100$ м³ откачивается со скоростью $S_o = 0,5$ м³/с.

Сколько времени потребуется для того, чтобы давление в камере снизилось с $p_n = 10^5$ Па до $p = 10^2$ Па.

Ответ: $\tau = 1381$ с.

Задача 4.18

Вакуумная камера объемом $V = 100$ м³/с откачивается со скоростью $S_o = 0,5$ м³/с. Натекание в камеру $Q = 30$ м³ · Па/с.

Сколько времени потребуется для того, чтобы давление в камере снизилось с $p_n = 10^5$ Па до $p = 10^2$ Па.

Ответ: $\tau = 1565$ с.

Задача 4.19

Камеру объемом $V = 50 \text{ м}^3/\text{с}$ требуется откачать за время $\tau = 40 \text{ с}$ от начального давления $p_n = 10^4 \text{ Па}$ до конечного $p = 10^2 \text{ Па}$.

Какой должна быть скорость откачки камеры?

Ответ: $S_o = 5,76 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 4.20

Камера объемом $V = 20 \text{ м}^3$ откачивается насосом с быстротой действия $S_n = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Проводимость трубопровода между насосом и камерой $U = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Во сколько раз уменьшится продолжительность откачки, если поставить насос большей быстроты действия $S_n = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$?

Ответ: в $n = 1,33$ раза.

Задача 4.21

Камера объемом $V = 6 \text{ м}^3$ откачивается со скоростью $S_o = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$. Начальное давление $p_n = 10^5 \text{ Па}$, конечное $p = 10^0 \text{ Па}$. Натекание в камеру $Q = 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

На сколько сократится продолжительность откачки, если натекание уменьшить в два раза?

Ответ: $\Delta\tau = 122 \text{ с}$.

Задача 4.22

Определить продолжительность вакуумирования камеры от давления $p_1 = 10^5 \text{ Па}$ до давления $p_2 = 10^0 \text{ Па}$. Объем камеры $V = 100 \text{ м}^3$. Скорость откачки камеры $S_o = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ответ: $\tau = 11513 \text{ с}$.

Задача 4.23

Поток газа в трубе $Q = 400 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Давление на входе в трубу $p_n = 10^2 \text{ Па}$, а на выходе $p_k = 20 \text{ Па}$.

Каков объемный расход газа на входе в трубу и на выходе?

Ответ: $S_n = 4 \text{ м}^3/\text{с}$; $S_k = 20 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 4.24

Чему равны объемный и массовый расходы (см. задачу 4.23) воздуха в трубе, приведенный к условиям $p = 10^5 \text{ Па}$; $T = 273 \text{ К}$.

Ответ: $S = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $G = 5,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

Задача 4.25

Коэффициент использования насоса $K = 0,4$. Какова скорость откачки объекта, если быстрота действия насоса $S_{\text{н}} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$?

Ответ: $S_{\text{о}} = 4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 4.26

Скорость откачки объекта $S_{\text{о}} = 5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Чему равна быстрота действия насоса и проводимость трубопровода, если коэффициент использования насоса $K = 0,5$?

Ответ: $S_{\text{н}} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$; $U = 10 \text{ м}^3/\text{с}$.

5. Криогенные вакуумные насосы

Задача 5.1

Крионасос с криопанелью в форме стакана, внутренняя поверхность которого сорбирует откачиваемый газ. Коэффициент захвата криопанели $\gamma = 1,0$. Диаметр панели $d = 0,2$ м, глубина $l = 0,5$ м.

Какова быстрота действия насоса при откачке в молекулярном режиме азота с температурой $T = 300$ К?

Ответ: $S_n = 3,74$ м³/с.

Задача 5.2

Крионасос с криопанелью в форме стакана, внутренняя поверхность которого сорбирует откачиваемый газ. Коэффициент захвата криопанели $\gamma = 0,6$. Диаметр панели $d = 0,5$ м, глубина $l = 0,2$ м.

Перед криопанелью установлен тепловой экран типа жалюзи с вероятностью прохода $\beta = 0,25$.

Какова быстрота действия крионасоса при откачке воздуха с температурой $T = 290$ К? Режим молекулярный.

Ответ: $S_n = 3,39$ м³/с.

Задача 5.3

Крионасос с криопанелью в виде плоского диска диаметром $d = 0,4$ м откачивает азот в вязкостном режиме. Температура газа $T = 380$ К. Коэффициент прилипания $\alpha = 1,0$.

Какова быстрота действия крионасоса?

Ответ: $S_n = 45,57$ м³/с.

Задача 5.4

Криоконденсационный вакуумный насос имеет быстроту действия $S_n = 5$ м³/с при давлении $p = 10^{-3}$ Па. Температура откачиваемого газа $T = 290$ К.

Какое количество газа будет десублимировано на криопанели за время $\tau = 100$ часов.

Ответ: $G = 0,0216$ кг.

Задача 5.5

Криопанель насоса наливного типа воспринимает тепловую нагрузку $W = 20$ Вт. Ванна крионасоса объемом $V_H = 0,02$ м³ заполнена на 90%.

Через какое время в ванне останется $V_K = 4$ литра жидкого азота?

Ответ: $\tau = 31$ час.

Задача 5.6

Криопанель с температурой $T_K = 15$ К защищена тепловым экраном типа жалюзи, находящимся при температуре $T_Э = 80$ К. Площадь криопанели $F_K = 0,5$ м², а степень черноты $\epsilon_K = 0,3$. Степень черноты экрана $\epsilon_Э = 0,9$.

Определить лучистый тепловой поток от экрана к криопанели.

Ответ: $W = 0,336$ Вт.

Задача 5.7

Крионасос с криопанелью площадью $F_K = 0,6$ м² откачивает воздух при давлении $p = 10^{-3}$ Па. Коэффициент прилипания $\alpha = 0,8$. Температура откачиваемого газа $T_K = 290$ К. Плотность десублимата $\rho = 900$ кг/м³.

Какая толщина слоя десублимата образуется за время работы насоса в течение $\tau = 10$ суток.

Ответ: $\delta = 1$ мм.

Задача 5.8

Диаметр входного патрубка крионасоса $D = 0,6$ м. Быстрота действия $S_H = 80$ м³/с при откачке водорода с температурой $T = 290$ К.

Определить вакуум-фактор насоса (К.П.Д.).

Ответ: $\eta = 0,646$.

Задача 5.9

Сколько цеолита должно быть в криоконденсационном насоса, чтобы откачать камеру объемом $V_K = 0,2$ м³ от атмосферного

давления $p_n = 10^5$ Па до давления $p_k = 500$ Па, если сорбционная способность адсорбента при конечном давлении составляет $\alpha = 100$ нсм³/г?

Ответ: $G = 1,99$ кг.

Задача 5.10

Криоконденсационный насос за время $\tau = 10$ с должен откачать 5 молей азота. Теплота сорбции азота $r = 600$ кДж/кг. Начальная температура адсорбента $T_n = 80$ К. Допустимый разогрев адсорбента $T_k = 90$ К. Теплоемкость адсорбента $c_p = 400$ Дж/(кг · К).

Определить необходимое количество адсорбента.

Ответ: $G = 21$ кг.

Задача 5.11

Используя термическое уравнение адсорбции Генри ($A=1500$; $B=5 \cdot 10^{-3}$) определить адсорбционную способность 5 кг цеолита СаЕН-4В по азоту при давлении $p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре адсорбента $T_{ад} = 80$ К.

Ответ: $G = 0,347$ Нм³.

6. Вакуумметрия

Задача 6.1

Объем термобарокамеры несопоставимо больше объема колбы вакуумной лампы $V_k \gg V_l$.

В камере реализуется молекулярный режим.

Колба одной лампы находится снаружи камеры и ее температура $T_{1л} = 292 \text{ K} = \text{const}$.

Вторая лампа находится внутри камеры.

Как изменятся показания ламп и как изменится давление газа в камере и колбе наружной лампы после того как температуру в камере снизят с $T'_k = 292 \text{ K}$ до $T''_k = 73 \text{ K}$.

Процессами сорбции в камере пренебречь.

$$\text{Ответ: } n''_{1л} = 0,5 \cdot n'_{1л};$$

$$n'_{2л} = n''_{2л} = n_k = \text{const};$$

$$p''_{1л} = 0,5 \cdot p'_{1л};$$

$$p''_k = 0,25 \cdot p'_k.$$

Задача 6.2

Объем термобарокамеры несопоставимо больше объема колбы вакуумной лампы $V_k \gg V_l$.

В камере реализуется вязкостный режим.

Колба одной лампы находится снаружи камеры и ее температура $T_{1л} = 292 \text{ K} = \text{const}$.

Вторая лампа находится внутри камеры.

Как изменятся показания ламп и как изменится давление газа в камере и колбе наружной лампы после того как температуру в камере снизят с $T'_k = 292 \text{ K}$ до $T''_k = 73 \text{ K}$.

Процессами сорбции в камере пренебречь.

$$\text{Ответ: } n''_{1л} = \frac{n'_{1л}}{4};$$

$$n'_{2л} = n''_{2л} = n_k;$$

$$p''_{1л} = \frac{p'_{1л}}{4}; \quad p''_k = \frac{p'_k}{4}.$$

Задача 6.3

Вакуумная камера разделена пополам диафрагмой. У каждой части камеры есть вакуумная лампа 1л и 2л. Объем колб ламп несопоставимо мал по сравнению с объемом камер. Режим молекулярный. Начальная температура всей системы $T' = 292 \text{ K}$. Как изменятся показания ламп после того как камеру 2 охладят до температуры $T'' = 73 \text{ K}$.

Процессами сорбции в камере пренебречь.

Ответ: $n''_{1л} = 0,666n$; $n''_{2л} = 0,666n$; показания обеих ламп снизятся в 1,5 раза.

Задача 6.4

В камере объемом $V = 0,2 \text{ м}^3$ после прекращения откачки давление выросло за время $\tau = 600 \text{ сек.}$ с $p_1 = 10^{-1} \text{ Па}$ до $p_2 = 2 \cdot 10^2 \text{ Па}$. Определить величину натекания.

Ответ: $Q = 6,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ (ВТ).

Задача 6.5

Какова должна быть разрешающая способность масс-спектрометра, чтобы получить отдельные пики ионных токов CO_2 ($M_1=44$) и Ar ($M_2=40$)?

Ответ: $\rho > 10,5$.

Задача 6.6

U-образный вакуумметр с открытым коленом заполнен ртутью. Каково давление в объекте, если перепад уровней ртути в коленях $\Delta h = 0,1 \text{ м}$, если барометрическое давление $p_6 = 750 \text{ мм рт.ст.}$

Ответ: $p = 650 \text{ мм рт.ст.}$

Задача 6.7

U-образный вакуумметр с закрытым коленом заполнен ртутью. Каково давление в объекте, если перепад уровней ртути в коленях $\Delta h = 0,1 \text{ м}$, если барометрическое давление $p_6 = 760 \text{ мм рт.ст.}$

Ответ: $p = 100 \text{ мм рт.ст.}$

Задача 6.8

В компрессионном вакуумметре ртуть поднимается в сравнительном капилляре до уровня конца запаянного капилляра.

Каково давление в объекте, если объем мерной колбы $V = 400 \text{ см}^3$, внутренний диаметр капилляра $d = 1 \text{ мм}$, перепад уровней ртути в капиллярах $\Delta h = 7 \text{ мм}$?

Ответ: $p = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$

Задача 6.9

Образцовый деформационный вакуумметр типа ВО имеет шкалу

$0 \div -1 \text{ кг/см}^2$, разделенную на 250 делений.

Чему равно давление в объекте, если стрелка прибора показывает 190 делений?

Ответ: $p = 176 \text{ мм рт.ст.}$

Задача 6.10

Какой допустим поток натекания в систему, чтобы поддерживать в ней равновесное давление $p = 10^{-2} \text{ Па}$ при скорости откачки системы $S_o = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$?

Коэффициент запаса принять $k = 2$.

Ответ: $Q \leq 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Задача 6.11

Какой допустим поток натекания в систему объемом $V = 2 \text{ м}^3$, чтобы давление в ней за время $\Delta t = 5$ часов повысилось не более чем на $\Delta p = 2 \text{ Па}$?

Коэффициент запаса принять $k = 1,5$.

Ответ: $Q \leq 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Задача 6.12

В вакуумной системе объемом $V = 10 \text{ м}^3$ за 24 часа давление выросло с $p_n = 10^{-2} \text{ Па}$ до $p_k = 5 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$.

Определить величину натекания.

Ответ: $Q = 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Задача 6.13

Какое предельное остаточное давление может быть достигнуто в камере, откачиваемой выносным криоконденсационным насосом, если температура стенок камеры $T_c = 290$ К, температура криопанели насоса $T_k = 21,1$ К, а откачиваемый газ – азот?

Давление насыщенного пара азота при $T_k = 21,1$ К принять $p_{нас} = 10^{-8}$ Па.

Ответ: $p_{пред} = 3,7 \cdot 10^{-8}$ Па.

Задача 6.14

В вакуумной камере 1 объемом $V_1 = 0,5$ м³ давление $p_1 = 10^{-2}$ Па и температура $T_1 = 290$ К. В вакуумной камере 2 объемом $V_2 = 1,5$ м³ давление $p_2 = 10^{-5}$ Па и температура $T_2 = 20$ К.

Каким станет давление в камерах после того, как открыли затвор между ними?

Ответ: $p'_1 = 8,39 \cdot 10^{-4}$ Па; $p'_2 = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Па.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демихов К.Е. Вакуумные системы: Учеб. пособие. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 76 с.
2. Вакуумная техника: Справ. / Под.ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2007. – 340 с.
4. Иванов В.И. Криовакуумные системы. – СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2012. – 46 с.
5. Нестеров С.Б. и др. Низкотемпературные системы откачки: Учеб. пособие. – М.: Изд. «Дом МЭИ», 2007. – 30 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Коэффициент Клаузинга для цилиндрических труб в зависимости от их относительной длины

L/r	k	L/r	k	L/r	k
0	1,000	1,8	0,5384	10,0	0,1973
0,1	0,9524	1,9	0,5256	12,0	0,1719
0,2	0,9092	2,0	0,5136	14,0	0,1523
0,3	0,8699	2,2	0,4914	16,0	0,1367
0,4	0,8341	2,4	0,4711	18,0	0,1240
0,5	0,8013	2,6	0,4527	20,0	0,1135
0,6	0,7711	2,8	0,4359	30,0	0,0797
0,7	0,7434	3,0	0,4205	40,0	0,0613
0,8	0,7177	3,2	0,4062	50,0	0,0499
0,9	0,6940	3,4	0,3931	60,0	0,0420
1,0	0,9720	3,6	0,3809	70,0	0,0363
1,1	0,6514	3,8	0,3695	80,0	0,0319
1,2	0,6320	4,0	0,3589	90,0	0,0285
1,3	0,6139	5,0	0,3146	100,0	0,0258
1,4	0,5970	6,0	0,2807	1000,0	0,00266
1,5	0,5810	7,0	0,2537	∞	$8r/3L$
1,6	0,5659	8,0	0,2316		
1,7	0,5518	9,0	0,2131		

* L - длина трубы; r - внутренний радиус трубы.

Логвиненко Екатерина Владимировна
Иванов Владислав Иванович

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
И.В. Гришко

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

*Печатается
в авторской редакции*

Подписано в печать 23.12.2015. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,25
Тираж 50 экз. Заказ № С 101

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9