

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Отчёт по лабораторной работы 2.3.1

Современные средства получения и измерения вакуума.

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

Аннотация

Цель работы:

Изучить свойства и особенности вакуума при помощи экспериментального стенда выполненного на основе компактного высоковакуумного откачного поста Edwards серии EXPT с пластинчатороторным и турбомолекулярным насосами. Определить полный объем установки, высоковакуумной части, форвакуумной магистрали и насоса ТМН. Оцените эффективную скорость откачки системы форвакуумным насосом в области, где она почти постоянна. Оцените эффективную скорость откачки системы турбомолекулярным насосом в области, где она почти постоянна. Определите уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН.

Теоретические сведения:

В физике вакуумом называют состояние газа, при котором характерная длина свободного пробега молекул в газе λ сравнима по порядку величины с характерным линейным размером сосуда d , в котором газ находится. Для воздуха при нормальных условиях $\lambda \approx 10^{-5}$ см, откуда видно, что воздух в жилых помещениях не находится в состоянии вакуума, но, например, внутри пористых материалов, таких как древесина, уже может находиться.

Скорость откачки:

$$S = \frac{dV}{dt}; \quad (1)$$

Падение давления:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}; \quad (2)$$

Пропускная способность:

$$U = \frac{Q}{\Delta P}; \quad (3)$$

Основное уравнение вакуумной механики:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{text}}} + \frac{1}{U}; \quad (4)$$

$$Q_{\text{н}} = V \frac{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}}{\Delta t} \quad (5)$$

Проводимость отверстия:

$$U_{\text{отв}} = \frac{1}{4} \pi R^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \sim R^2 \sqrt{T/m} \quad (6)$$

Проводимость длинного трубопровода

$$U_{\text{тр}} = \frac{4}{3} \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \sim \frac{R^3}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (7)$$

Уравнение откачки газа

$$P(t) = P_1 \exp\left(-\frac{S_0}{V_0} t\right) \quad (8)$$

Одна из основных характеристик систем, работающих при вакууме – число Кнудсена:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}, \quad (9)$$

λ – длина свободного пробега молекул газа, d – характерный размер системы.

В зависимости от значений числа Кнудсена определяют:

- 1) низкий вакуум – $Kn \ll 1$
- 2) средний вакуум – $Kn \sim 1$
- 3) высокий вакуум – $Kn \gg 1$

Методика измерений:



Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Экспериментальный стенд выполнен на основе компактного высоковакуумного откачного поста Edwards серии EXPT с пластинчатороторным и турбомолекулярным насосами, вакуумметров Edwards и вакуумных компонентов. Управление основными функциями откачного поста, контроль и запись параметров установки осуществляется блоком управления (БУ) через цифровой интерфейс RS-232 с помощью специального программного обеспечения TIC PC Monitor¹⁰. Вакуумный пост Edwards EXPT (TY1211601) выполнен на базе пластинчато-роторного форвакуумного насоса E2M1.5 (ПРН) и турбомолекулярного насоса EXPT 70H (ТМН). Откачка вакуумной камеры (К) может происходить как двумя насосами (ТМН и ДН) через шибберный затвор (ШЗ) и мембранные краны 1 и 4 (МК1, МК4), так и только форвакуумным насосом (ПРН) по схеме «байпас» (англ. bypass — обходной путь), выполненной на основе вакуумных компонентов: сильфонов (С), мембранных кранов 2 и 4 (МК2, МК4), тройников (Т), переходников. Для контроля и измерения давления в вакуумной камере используются цифровые вакуумметры ARG100-XM (В1) типа Пирани (терморезисторный), AIM-X (В2) инверсно-магнетронный и AIGX-S (В3) термоэлектронный (с накаливаемым катодом). Контролируемый напуск воздушной

атмосферы в камеру осуществляется через кран-натекатель LV10K (КН) с регулируемым потоком. Дополнительный выход с краном 3 (МКЗ) закрыт заглушкой (З) и служит для присоединения дополнительного объема в случае необходимости.

Используемое оборудование:

Высоковакуумный откачной пост Edwards серии EXPT с пластинчатороторным и турбомолекулярным насосами, ПК, программа для записи показаний.

Результаты измерений и обработка данных:

1. Определим объем камеры К по закону Бойля – Мариотта:

$$p_1(V_0 + V_k) = p_0V_0 + p_{lim}V_k$$

где p_0 – атмосферное давление, $p_1 = 2,49 \cdot 10^4$ Па, $V_0 = 252$ мл – объем сильфона, V_k – объем камеры, $p_{lim} = 3,47$ Па. Тогда $V_k = 760$ мл.

2. Определим объем форвакуумной магистрали:

$$p_2(V_0 + V_k + V_f) = p_1(V_0 + V_k) + p_{lim}V_f$$

V_f – объем форвакуумной магистрали, $p_2 = 1,72 \cdot 10^4$ Па. Получим: $V_f = 453$ мл.

3. Определим объем насоса:

$$p_3(V_0 + V_k + V_f + V_{pomp}) = p_2(V_0 + V_k + V_f) + p_{lim}V_{pomp}$$

$p_3 = 1,36 \cdot 10^4$ Па, Получим: $V_{pomp} = 387$ мл.

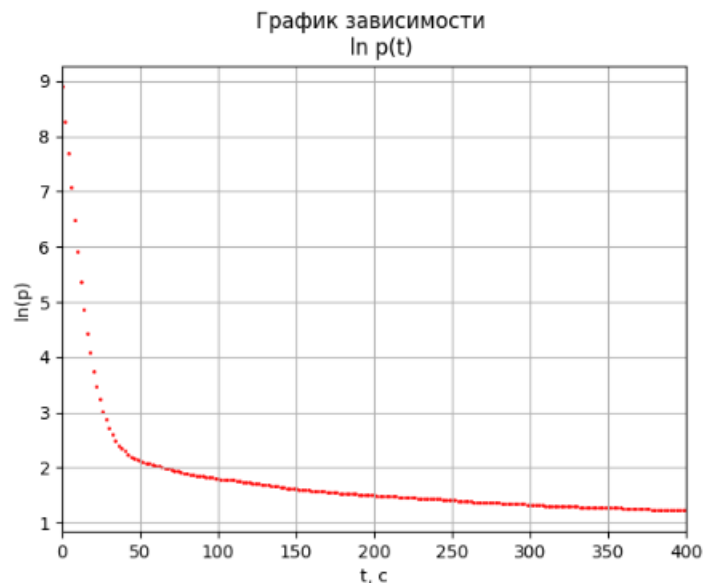
4. Тогда полный объем установки $V_{inst} = 1852$ мл.

5. Погрешность измерения объемов: $\sigma_{V_k} = V_k \varepsilon_1$, где $\varepsilon_1 = 15\%$ – точность измерения вакуумметра APG100-ХМ типа Пирани (В1), тогда $\sigma_{V_k} = \pm 114$ Па, $\sigma_{V_f} = \pm 68$ Па, $\sigma_{V_{pomp}} = \pm 58$ Па, $\sigma_{V_{inst}} = \pm 144$ Па.

6. **Оценим эффективную скорость откачки системы форвакуумным насосом в области, где она почти постоянна.**

Возьмем данные зависимости давления в камере К от времени откачки насосом. По зависимости $\ln p$ от t определим постоянную времени откачки τ в диапазоне давлений $p_1 = 10^0 - 10^2 = p_2$ мбар. Построим график зависимости $\ln p(t)$

$$\tau = -\frac{t}{\ln p_1/p_2} \Rightarrow \tau = (22 \pm 1)c$$



7. Рассчитаем эффективную скорость откачки S_0 и S_{pomp}

$$S_0 = \frac{V_k}{\tau} = (35 \pm 2) \text{ мл/с}$$

$$S_{pomp} = \frac{V_{pomp}}{\tau} = (81 \pm 2) \text{ мл/с}$$

8. Определим суммарную пропускную способность U

$$U = \frac{S_{pomp} S_k}{S_{pomp} - S_0} = (67 \pm 3) \text{ мл/с}$$

9. **Оценим эффективную скорость откачки системы турбомолекулярным насосом в области, где она почти постоянна.**

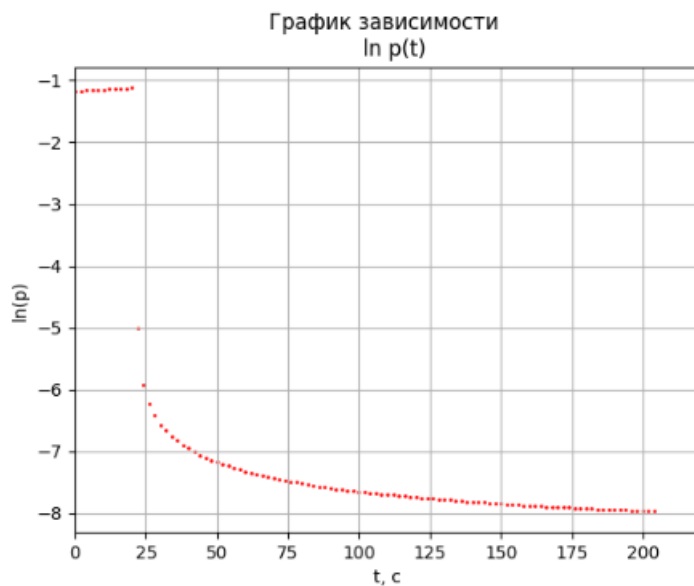
Аналогично п.6-8 определим те же параметры для ТМН.

10. $\tau = (45 \pm 1) \text{ с}$

11. $S_0 = (17 \pm 2) \text{ мл/с}$

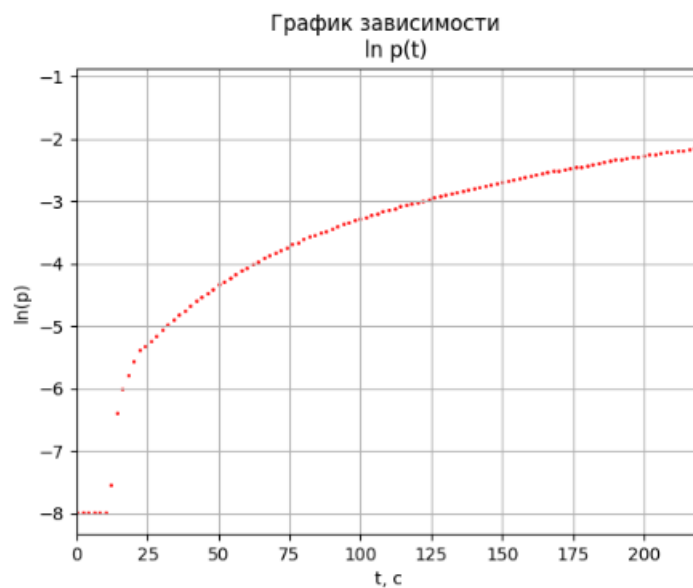
12. $S_{pomp} = (40 \pm 2) \text{ мл/с}$

13. $U = (30 \pm 3) \text{ мл/с}$



14. Определим уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН.

$$Q_n = V_k \frac{P' - P''}{\Delta t} = (7 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ л мбар/с, где } P' = 10^{-3} \text{ мбар, } P'' = 10^{-5} \text{ мбар}$$



15. Оценим число Кнудсена для предельных давлений при форвакуумной и высоковакуумной откачке.

$$Kn = \frac{\lambda}{d} = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 P V_k^{1/3}}, \text{ где } \sigma = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ — характерный диаметр молекулы воздуха}$$

$$Kn_{\text{ФН}} = 0,11$$

$$Kn_{\text{ТМН}} = 1143$$

Обсуждение результатов:

Проведя работу, мы определили с неплохой погрешностью объемы всех частей установки, построив графики зависимости $\ln p(t)$ мы смогли достаточно точно определить эффективные скорости откачки различными насосами. Полученное нами число Кнудсена для ФН и ТМН соответствуют теоретическому предположению.

Выводы:

В ходе работы мы научились пользоваться экспериментальным стендом выполненным на основе компактного высоковакуумного откачного поста Edwards серии EXPT с пластинчатороторным и турбомолекулярным насосами. Оценили эффективную скорость откачки системы форвакуумным и турбомолекулярным насосами в области, где она почти постоянна. Определили уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН. Оценили число Кнудсена для предельных давлений при форвакуумной и высоковакуумной откачке.