

Отчет по лабораторной работе 2.3.1(А)

«Современные средства получения и измерения вакуума»

Цель работы: 1) изучение принципов получения и измерения вакуума в экспериментальном стенде на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco, вакууметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine и вакуумных компонентов типов ISO-K, ISO-F, ISO-KF

В работе используются: компактный безмасляной высоковакуумный откачный пост Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco, вакууметр Pfeiffer Vacuum серии DigiLine и вакуумные компоненты типов ISO-K, ISO-F, ISO-KF

Теоретические сведения:

Экспериментальный стенд



Рис. 1: Схема экспериментального стенда

Вакуум

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 $\lambda \sim 10^{-5}$ см, откуда видно, что воздух в жилых помещениях не находится в состоянии вакуума, но, например, внутри пористых материалов, таких как древесина, уже может находиться.

В технике вакуумом называют состояние газа, при котором его давление меньше атмосферного. Различают следующие типы вакуума: низкий, когда средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера рассматриваемого объема, т. е. $\lambda < d$; средний, когда $\lambda \approx d$; высокий(или глубокий), когда λ много больше d . Иногда выделяют еще сверхвысокий вакуум, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для проведения эксперимента. Газ в состоянии высокого вакуума называется ультраразреженным.

Сфера применения вакуумной техники и технологий стремительно расширяется. Вакуум является идеально чистой технологической средой, в которой можно осуществить электрохимические и электрофизические процессы при изготовлении изделий, используемых

в различных отраслях промышленности. Новые типы полупроводниковых структур, особо чистые материалы, сплавы, специальные покрытия изготавливаются в вакууме.

Понятия для работы с вакуумной техникой

Предельное остаточное давление - наименьшее давление газа, которое формируется в процессе откачки в рассматриваемом сечении вакуумпровода. Обычно выделяют предельное давление в камере или на входе в насос.

Наибольшее выпускное давление — максимально допустимое давление газа на входе насоса.

Быстрота откачивающего действия — объем газа, проходящий через рассматриваемое сечение вакуумпровода в единицу времени при текущем давлении в данном сечении:

$$S_0 = \frac{dV_0}{dt}$$

Падение давления вдоль вакуумпровода $\delta P = P_1 - P_2$ определяется его *пропускной способностью*:

$$U = \frac{Q}{P_1 - P_2},$$

где Q – *поток газа* через вакуумпровод с соответствующими давлениями на концах.

Основное уравнение вакуумной техники — уравнение, связывающее основные параметры вакуумной системы:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}$$

Количественной характеристикой течи является натекание Q_n , измеряемое при отключенных средствах откачки:

$$Q_n = V \frac{P_1 - P_0}{\Delta t}$$

На пропускную способность вакуумпровода существенно влияет режим течения газа, который характеризуется *числом Кнудсена*, равным отношению длины свободного пробега молекул в газе к характерному линейному размеру течения:

$$K_n = \frac{\lambda}{d}$$

Время откачки

Рассмотрим случай, когда $S_0 = \text{const}$. Тогда зависимость давления от времени записывается в виде:

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

Постоянная времени откачки $\tau = \frac{V_0}{S_0}$ является мерой эффективности откачной системы.

Пластинчато-роторный насос

В цилиндрическом корпусе пластинчато-роторного насоса со смещением эксцентрично размещен ротор, касающийся корпуса с одной стороны. Ротор снабжен пластинами, которые прижимаются к стенкам и скользят по внутренней поверхности. Газ, попадающий на вход проталкивается пластинами и выталкивается из насоса через выпускной клапан.

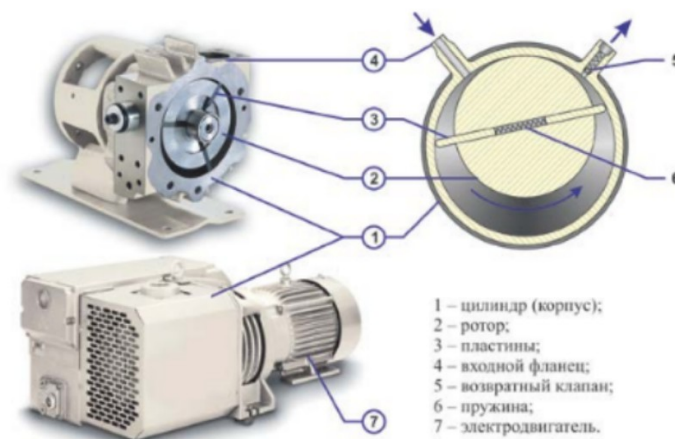


Рис. 2: Конструкция одноступенчатого ПРН

- *преимущества*: неприхотлив в работе (может откачивать загрязненную среду без ущерба для конструктивных элементов); используется для предварительной (форвакуумной откачки) в системах откачки с низкими требованиями по чистоте откачиваемого объема; используется до двух последовательных ступеней.

- *недостатки*: присутствие в рабочей камере масла, контактирующего с откачиваемой средой (возможно попадание паров в откачиваемый объем) и необходимость периодической его замены; низкий предельный вакуум за счет обработанного потока воздуха через выпускные клапаны; малоэффективен для откачки влажных сред.

- *тип вакуума*: средний

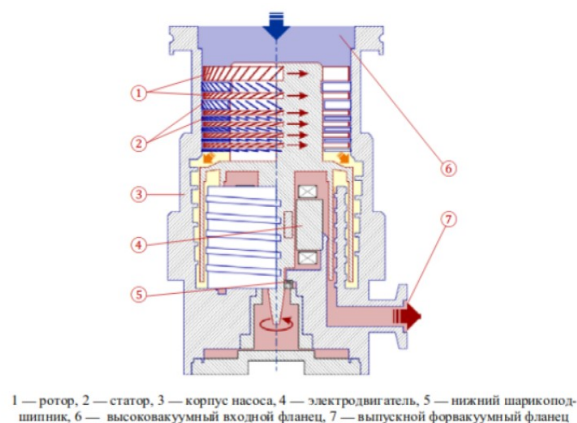


Рис. 3: Конструкция турбомолекулярного насоса

Турбомолекулярный насос

Откачка в турбомолекулярном насосе осуществляется за счет соударения частиц газа с быстро движущимися турбинными лопатками дисков ротора специальной геометрии, которые придают им дополнительный импульс в заданном направлении потока. Между дисками ротора находятся диски статора с обратно обращенными лопатками, направляющие поток молекул на следующие диски турбины по оптимальной траектории, минимизируя обратный поток. Каждая пара пластин ротора-статора образует одну ступень. Насос состоит из нескольких ступеней, расположенных последовательно, каждая последующая ступень имеет меньшие геометрические размеры, что при постоянном потоке газа приводит к постепенному повышению давления до выпускного форвакуумного. Скорость вращения ротора современных турбомолекулярных насосов достигает нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

- *преимущества*: постоянная готовность к работе; быстрый запуск (около 10 минут на раскручивание турбины); устойчивость к резкому повышению давления; широкий диапазон рабочих давлений; примерно одинаковая быстрота действия для большинства газов

- *недостатки*: требуется надежная защита вращающейся турбины от любых механических воздействий, приводящих к износу подвески ротора и разрушению лопаток турбины.

- *тип вакуума*: высокий

Ход работы

1. Определение откачиваемого объема и измерение скорости откачки форвакуумным насосом

Время	Показания B1(PPT ₁₀₀), mbar	Показания B2(MPT ₁₀₀), mbar	Б _р , mbar	Мощность ТМН, W	Комментарий
10:16:08	1000	1000	5	0	Включение форвакуумного насоса (далее ФН)
10:16:20	3,4	3,6		0	Открытие МКЗ
10:20:10	200	1000		0	Спустя(≈2 мин) после
10:20:14	200	1000		0	Отключение ФН
10:20:48	200	1000		0	Открытие МК2
10:22:08	180-190	1000		0	Установилось давление после открытия МК2
10:22:26	180-190	1000		0	Открытие МК1
10:23:32	140	450		0	Установилось давление после открытия МК1
11:27:30	1000	1000		0	Включение форвакуумного насоса (далее ФН)
11:33:58	2,8	3		0	Открытие МКЗ
11:35:00	180	1000		0	Спустя(≈2 мин) после
11:35:18	180	1000		0	Отключение ФН

11:35:32	180	1000	5	0	Открытие МК2
11:36:06	170	1000		0	Установилось давление после открытия МК2
11:36:24	170	1000		0	Открытие МК1
11:37:00	120	380		0	Установилось давление после открытия МК1

Определим объемы вакуумных частей установки:

Объем запертого в сильфоне воздуха $V_s = 265$ мл. После присоединения сильфона мы закрываем МК2, изолируя высоковакуумную часть. Затем открываем МК3 и запускаем V_s в вакуумную камеру. По уравнению Бойля-Мариотта:

$$P_0 V_s = (V_k + V_s) P_1, \text{ где } P_1 - \text{давление после открытия МК3}$$

$$V_k = \frac{P_0 * V_s}{P_1} - V_s, \quad \sigma_{V_k} = \frac{P_0 * V_s}{P_1^2} \sigma_{P_1}$$

$$P_0 V_s = (V_s + V_k + V_v) P_2, \text{ где } P_2 - \text{давление после открытия МК2}$$

$$V_v = \frac{P_0 * V_s}{P_2} - V_s - V_k, \quad \sigma_{V_v} = \sqrt{\left(\frac{P_0 * V_s}{P_2^2} \sigma_{P_2}\right)^2 + \sigma_{V_s}^2 + \sigma_{V_k}^2}$$

$$P_0 V_s = P_3 V_{уст} \text{ где } P_3 - \text{давление после открытия МК1}$$

$$V_{уст} = \frac{P_0 * V_s}{P_3}, \quad \sigma_{V_{уст}} = \frac{P_0 * V_s}{P_3^2} \sigma_{P_3}$$

$$V_{тмн} = V_{уст} - V_k - V_s - V_v, \quad \sigma_{V_{тмн}} = \sqrt{\sigma_{V_{уст}}^2 + \sigma_{V_k}^2 + \sigma_{V_s}^2 + \sigma_{V_v}^2}$$

1-ое измерение:

$P_1 = 200$ мбар, $P_2 = 185$ мбар, $P_3 = 140$ мбар

$$V_k = (1060 \pm 33) \text{ мл}, \quad V_v = (107 \pm 33) \text{ мл}, \quad V_{уст} = (1893 \pm 68) \text{ мл}, \quad V_{тмн} = (461 \pm 82) \text{ мл}$$

2-ое измерение:

$P_1 = 180$ мбар, $P_2 = 170$ мбар, $P_3 = 120$ мбар

$$V_k = (1207 \pm 41) \text{ мл}, \quad V_v = (87 \pm 34) \text{ мл}, \quad V_{уст} = (2208 \pm 92) \text{ мл}, \quad V_{тмн} = (649 \pm 108) \text{ мл}$$

Как окончательный результат возьмем среднее значение:

$$V_k = (1133 \pm 41) \text{ мл}, \quad V_v = (97 \pm 34) \text{ мл}, \quad V_{уст} = (2050 \pm 92) \text{ мл}, \quad V_{тмн} = (555 \pm 75) \text{ мл}$$

Оценим эффективную скорость откачки системы ФН:

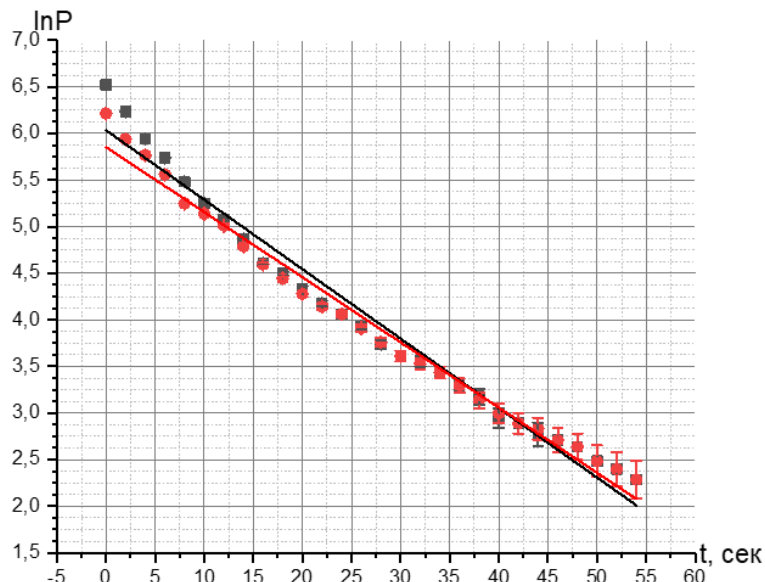
Построим $\ln P(t)$ для двух измерений, определим коэффициенты наклона графика

$$k = \frac{-S_0}{V_0} = \frac{-1}{\tau} \text{ и их погрешности. } (\tau - \text{постоянная времени откачки}). \text{ Из МНК:}$$

$$k = \frac{-1}{\tau} = \frac{\langle \ln P * t \rangle - \langle \ln P \rangle * \langle t \rangle}{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2} \text{ и } \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\frac{\langle (\ln P)^2 \rangle - \langle \ln P \rangle^2}{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2} - k^2 \right)} \approx 3,62 \text{ с}$$

$$k_{кр} = (-7,71 \pm 0,26) * 10^2 \text{ с}^{-1}$$

$$k_{черн} = (-7,70 \pm 0,12) * 10^2 \text{ с}^{-1}$$



Таким образом, $\tau = 12,98 \text{ с}$, $\sigma_\tau = \sigma_k / k^2 = 0,03 \text{ с}$

$$S_0 = V_0 / \tau, \quad \sigma_{S_0} = S_0 * \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_0}}{V_0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau} \right)^2}. \quad S_0 = (0,31 \pm 0,01) \frac{M^3}{ч}, \quad \varepsilon = 3,2\%$$

Тогда пропускная способность равна: $U = \frac{S_H S_0}{S_H - S_0}$ и $\sigma_U = \sigma_{S_0} * S_H * \left(\frac{1}{S_H - S_0} + \frac{S_0}{(S_H - S_0)^2} \right)$

$$U = (0,816 \pm 0,003) \frac{M^3}{ч}, \quad \varepsilon = 0,4\%$$

2. Измерение скорости откачки ТМН и определение предельного вакуума

Время	Показания B1(PPT ₁₀₀), mbar	Показания B2(MPT ₁₀₀), mbar	Б _р , mbar	Мощность ТМН, W	Комментарий
10:28:24	1000	1000	5	0	Включение ФН
10:31:10	3,1	3,3		0	Открытие ШЗ
10:31:18	3,1	3,3		0	Заккрытие МК2
10:38:56	3	3,2		27	Включение ТМН
10:42:10	$2 * 10^{-4}$	$3,7 * 10^{-5}$		13	Заккрытие ШЗ
10:42:26	$7,5 * 10^{-4}$	$1 * 10^{-3}$		13	Открытие ШЗ
10:44:44	$1 * 10^{-4}$	$1,7 * 10^{-5}$		13	Заккрытие ШЗ
10:45:26	$1 * 10^{-3}$	$8 * 10^{-4}$		13	Открытие ШЗ

10:47:18	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$		14	Заккрытие ШЗ
10:48:12	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$		13	Открытие ШЗ
10:57:20	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$		14	Заккрытие ШЗ
10:58:48	$7 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$		14	Открытие ШЗ

Аналогично оценим эффективную скорость откачки системы ТМН:

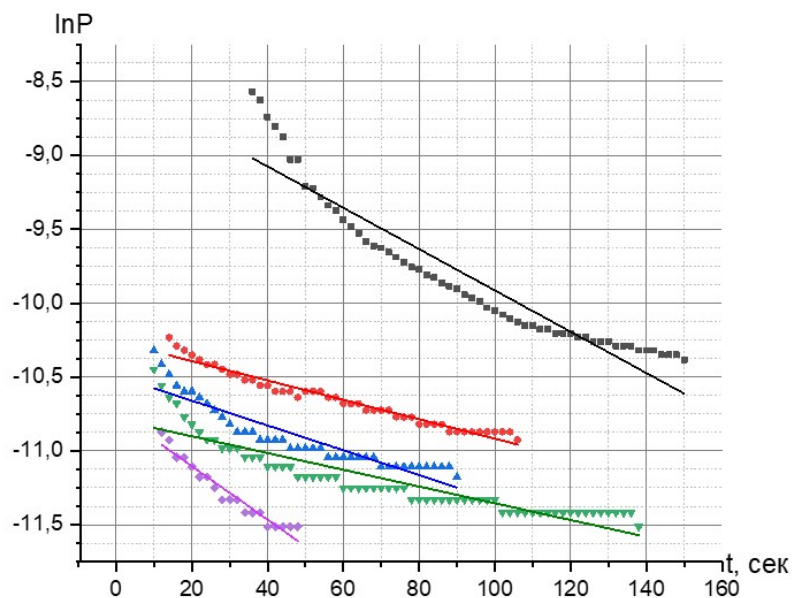
$$k_1 = (-13,6 \pm 0,6) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}, \quad \varepsilon = 4,4\%$$

$$k_2 = (-6,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}, \quad \varepsilon = 3,3\%$$

$$k_3 = (-9,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}, \quad \varepsilon = 7,8\%$$

$$k_4 = (-6,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}, \quad \varepsilon = 6,0\%$$

$$k_5 = (-18,1 \pm 1,1) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}, \quad \varepsilon = 6,0\%$$



$$k_{cp} = (-10,7 \pm 1,1) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}, \text{ отсюда } S_0 = 12,1 \text{ мл/с}, \quad \sigma_{S0} = 1,3 \text{ мл/с}.$$

$$\tau = (93,5 \pm 9,6) \text{ с}, \quad S_{0cp} = (12,1 \pm 1,3) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon = 10,5\%$$

$$U = 12,1 \text{ мл/с}, \quad \sigma_U = 1,3 \text{ мл/с}, \quad U = (12,1 \pm 1,3) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon = 10,5\%$$

3. Создание искусственной течи

Время	Показания B1(PPT ₁₀₀), mbar	Показания B2(MPT ₁₀₀), mbar	Б _р , mbar	Мощность ТМН, W	Комментарий
11:04:24	1000	1000	5	14	Предельное давление
11:06:06	10^{-4}	$6,1 \cdot 10^{-6}$		14	
11:07:34	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-5}$		15 (15-16)	
11:08:08	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$		16 (17-18)	
11:09:02	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$		19 (18-19)	
11:09:42	$4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$		20 (19-20)	
11:10:10	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$		20 (20-21)	
11:10:32	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-6}$		22 (21-22)	
11:10:48	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$		23 (22-23)	
11:11:10	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$		24 (23-24)	
11:11:44	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$		24 (24-25)	

11:12:12	1,5*10 ⁻³	1,5*10 ⁻³		26 (25-26-27)	
11:12:56	1,8*10 ⁻³	1,8*10 ⁻³		28 (27-28)	
11:13:14	2*10 ⁻³	2*10 ⁻³		29 (28-29)	
11:13:32	2,3*10 ⁻³	2,4*10 ⁻³		29 (29-30-31)	
11:14:06	2,7*10 ⁻³	2,8*10 ⁻³		32 (31-32)	
11:15:06	2,5*10 ⁻³	2,6*10 ⁻³	5	30 (29-30-31)	
11:15:34	2,3*10 ⁻³	2,4*10 ⁻³		28 (28-29)	
11:16:02	2*10 ⁻³	2,1*10 ⁻³		27 (26-27-28)	
11:16:26	1,7*10 ⁻³	1,8*10 ⁻³		25 (25-26)	
11:16:44	1,5*10 ⁻³	1,5*10 ⁻³		24 (24-25)	
11:17:06	1,4*10 ⁻³	1,5*10 ⁻³		24 (23-24)	
11:17:36	1,2*10 ⁻³	1,2*10 ⁻³		22 (22-23)	
11:18:06	1,1*10 ⁻³	1,1*10 ⁻³		21 (21-22)	
11:18:34	8*10 ⁻⁴	1*10 ⁻³		21 (20-21)	
11:19:48	7*10 ⁻⁴	7,8*10 ⁻⁴		19 (19-20)	
11:20:32	5,5*10 ⁻⁴	6*10 ⁻⁴		18 (18-19)	
11:21:04	4*10 ⁻⁴	3,8*10 ⁻⁴		17 (17-18)	
11:21:34	3*10 ⁻⁴	2,6*10 ⁻⁴		16 (16-17-18)	
11:22:12	1,5*10 ⁻⁴	3,9*10 ⁻⁵		16 (15-16)	
11:23:06	1*10 ⁻⁴	5,3*10 ⁻⁶		15	

Определим уровень течей по ухудшению вакуума после перекрытия откачки насосом ТМН:

$$Q_n = V_k \frac{(P_k - P_n)}{\Delta t}, \quad V_k = 1133 \text{ мл}$$

$$Q_{1н} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ мл*мбар/с};$$

$$Q_{2н} = 2,78 \cdot 10^{-2} \text{ мл*мбар/с};$$

$$Q_{3н} = 2,07 \cdot 10^{-2} \text{ мл*мбар/с};$$

$$Q_{4н} = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ мл*мбар/с};$$

$$Q_{ср} = 2,28 \cdot 10^{-2} \text{ мл*мбар/с}; \quad \epsilon_{Qср} = 8,21 \cdot 10^{-4} \text{ мл*мбар/с}$$

$$\epsilon \approx 3,6\%$$

Возьмем среднее значение $P_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ мбар, тогда $Q = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ мл*мбар/с} < Q_n$

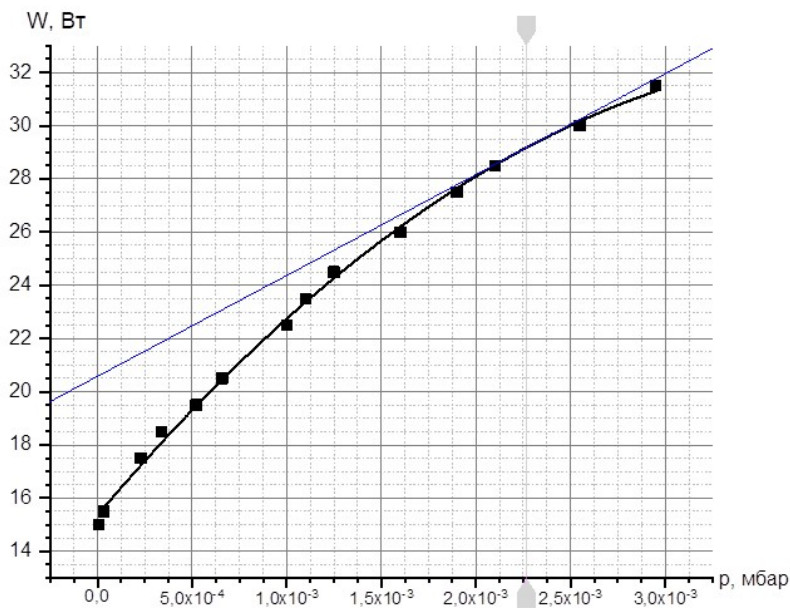
Исследуем зависимость мощности турбины ТМН от давления в камере К при создании искусственной течи:

Построим график $W(P)$ для повышения и понижения давления, затем найдем коэффициент наклона линейного участка прямой.

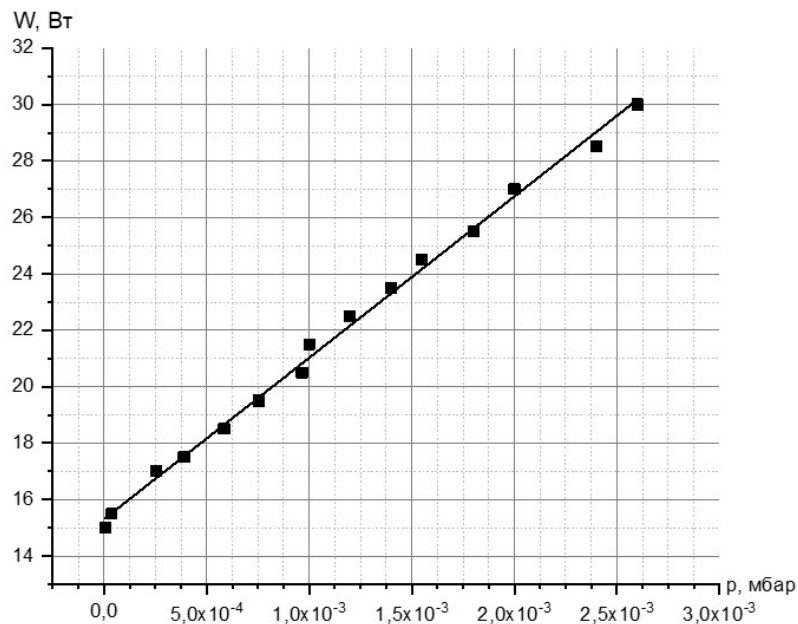
$$k_{\text{повышение}} = 5349,8 \text{ Вт/мбар}; \quad k_{\text{понижение}} = 3797,5 \text{ Вт/мбар}$$

Предельное давление $P_{пр} = 10^{-3}$ мбар — ниже нелинейно

Понижение:



Повышение:



Вывод

- Мы изучили принципы получения и измерения вакуума в экспериментом стенде на основе компактного безмасляного высоковакуумного откачного поста Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco, вакууметров Pfeiffer Vacuum серии DigiLine и вакуумных компонентов типов ISO-K, ISO-F, ISO-KF.
- Также были получены объемы частей установки и самой установки:
 - $V_k = (1133 \pm 41) \text{ мл}$ - объем камеры
 - $V_v = (97 \pm 34) \text{ мл}$ - объем форвакуумной магистрали
 - $V_{\text{тмн}} = (555 \pm 75) \text{ мл}$ - объем насоса ТМН
 - $V_{\text{уст}} = (2050 \pm 92) \text{ мл}$ - объем установки

- Была оценена эффективная скорость откачки системы форвакуумным насосом S_0 и пропускная способность U : $S_0 = (0,31 \pm 0,01) \frac{M^3}{ч}$, $\varepsilon = 3,2\%$ $U = (0,816 \pm 0,003) \frac{M^3}{ч}$, $\varepsilon = 0,4\%$ - совпадает с реальными значениями.
- Была оценена эффективная скорость откачки системы турбомолекулярным насосом S_0 и пропускная способность U : $S_0 = (12,1 \pm 1,3) \frac{мл}{с}$, $\varepsilon = 10,5\%$ $U = (12,1 \pm 1,3) \frac{мл}{с}$, $\varepsilon = 10,5\%$ - совпадает с реальными значениями. Возможные причины: небольшое натекание из-за небольшой разгерметизации после опыта с сильфоном.
- Был оценен уровень течи после перекрытия откачки ТМН насосом:
 $Q_{ср} = 2,28 \cdot 10^{-2}$ мл*мбар/с, что меньше $Q = 6,1 \cdot 10^{-3}$ мл*мбар/с
- Была найдена зависимость мощности ТМН от давления