

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной  
физики

# Лабораторная работа 2.3.1 ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Авторы:  
Идрисов Сергей  
Б04-306

Долгопрудный 2024

# 1 Экспериментальная установка

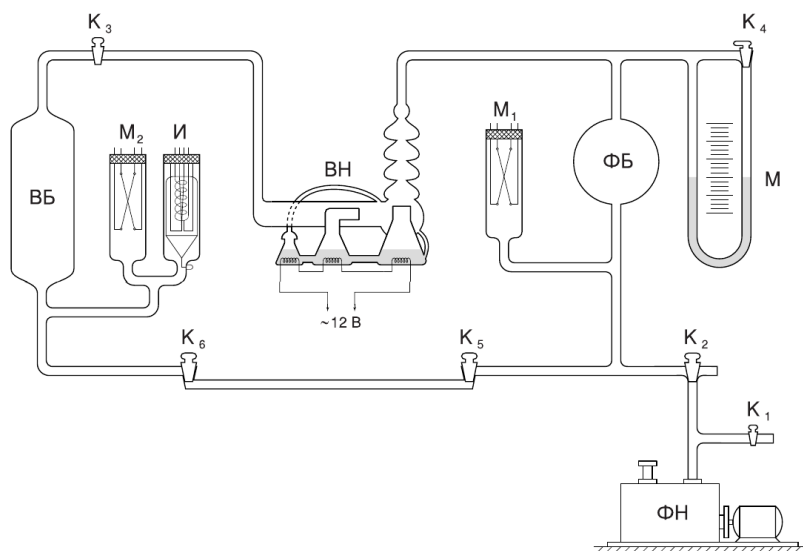


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термопарных манометров ( $M_1$  и  $M_2$ ), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов (Рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса.

**Маслянный манометр:** Представляет собой U-образную трубку, до половины наполненную вязким маслом, обладающим весьма низким давлением насыщенных паров. Так как плотность масла мала,  $\rho = 0,885 \text{ г/см}^3$ , то при помощи манометра можно измерить только небольшие разности давлений (до нескольких торр). Во время откачки и заполнения установки атмосферным воздухом кран  $K_4$  соединяющий оба колена манометра, должен быть открыт во избежание выброса масла и загрязнения установки. Кран  $K_4$  закрывается только при измерении давления U-образным манометром.

**Термопарный манометр:** Чувствительным элементом манометра является термопара, заключенная в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на (Рис. 2). По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла окружающее пространство. Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях  $>1$  торр теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает. При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити, теплоотвод падает и температура спая возрастает. При вакууме  $10^{-3}$  торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими видами потерь тепла и температура нити становится практически постоянной. Градуировочная кривая термопарного манометра приведена на (Рис. 3).

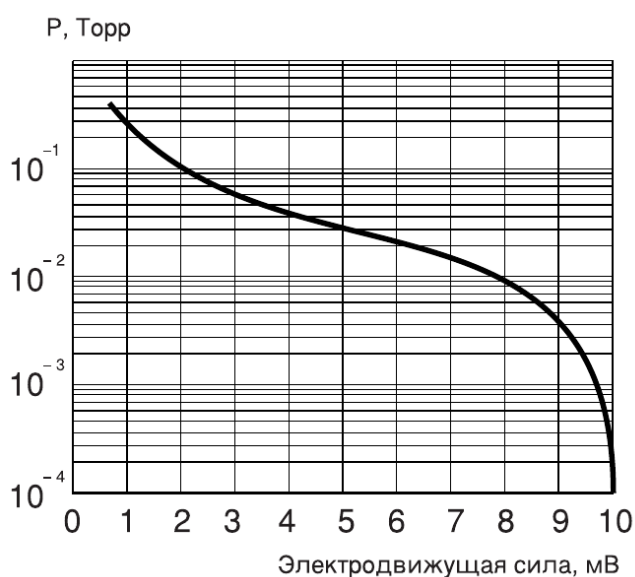
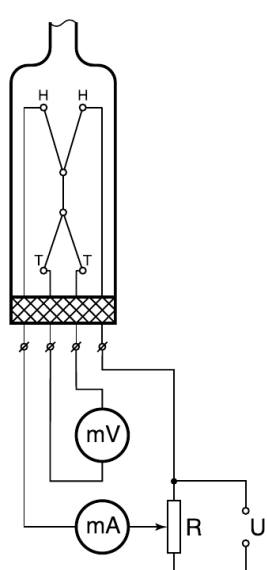


Рис. 2: Схема термопарного манометра. Рис. 3: Градуировочная кривая термопарного манометра.

**Ионизационный манометр:** Схема ионизационного манометра изображена на (Рис. 4). Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются накалившимся катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид спирали. Проскакивая за ее витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к катоду, а от него вновь увлекаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и поэтому может служить мерой давления. Вероятность ионизации зависит от рода газа, заполняющего лампу (а значит, и откачиваемый объем). Калибровка манометра верна, если остаточным газом является воздух. Накалившийся катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает  $10^{-3}$  торр. Поэтому включать ионизационный манометр можно, только убедившись по термопарному манометру, что давление в системе не превышает  $10^{-3}$  торр. При измерении нить ионизационного манометра сильно греется. При этом она сама, окружающие ее электроды и стенки стеклянного баллона могут десорбировать поглощенные ранее газы. Выделяющиеся газы изменяют давление в лампе и приводят к неверным показаниям. Поэтому перед измерениями ионизационный манометр прогревается (обезгаживается) в течение 10–15 мин. Для прогрева пропускается ток через спиральный анод лампы.

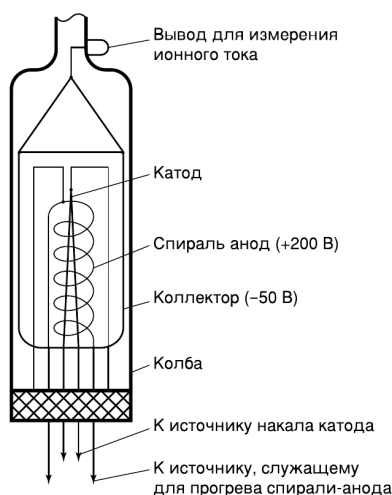


Рис. 4: Схема ионизационного манометра.

**Диффузионный насос:** Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии (внедрении) молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. Устройство одной ступени масляного диффузионного насоса схематически показано на (Рис. 5) (в лабораторной установке используется несколько откачивающих ступеней). Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом. Диффузионный насос работает наиболее эффективно при давлении, когда длина свободного пробега молекул воздуха примерно равна ширине кольцевого зазора между соплом В и стенками трубы ВВ. В этом случае пары масла увлекают молекулы воздуха из всего сечения зазора. Давление насыщенных паров масла при рабочей температуре, создаваемой обогревателем сосуда А, много больше  $5 \cdot 10^{-2}$  торр. Именно поэтому пары масла создают плотную струю, которая и увлекает собой молекулы газа. Если диффузионный насос включить при давлении, сравнимом с давлением насыщенного пара масла, то последнее никакой струи не создаст и масло будет просто окисляться и угорать.

Диффузионный насос, используемый в нашей установке, имеет две ступени и соответственно два сопла (Рис. 6). Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеется еще одна печь, но пар из этой печи поступает не в сопло, а по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Эта печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая ее легколетучей фракцией масла. По этой причине плотность струи первой ступени выше и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части установки. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров масла в этой ступени. Соответственно в откачиваемый объем поступает меньше паров масла и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем если бы мы работали только с одной ступенью.

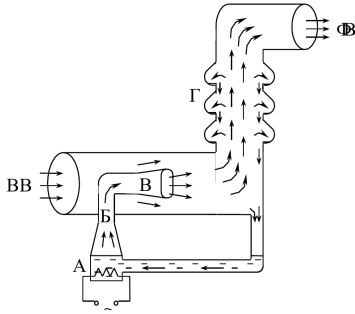


Рис. 5: Схема одной ступени диффузионного насоса.



Рис. 6: Диффузионный насос используемый в нашей работе.

## 2 Теоретическая часть

**Процесс откачки:** Производительность насоса определяется скоростью откачки  $W$  (л/с):  $W$  — это объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени. Скорость откачки форвакуумного насоса равна емкости воздухозаборной камеры, умноженной на число оборотов в секунду.

Обозначим через  $Q_d$  количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через  $Q_{и}$  — количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне — через течи. Будем считать, что насос обладает скоростью откачки  $W$  и в то же время сам является источником газа; пусть  $Q_n$  — поток газа, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему.  $Q = Q_d + Q_{и} + Q_n$  измеряем в единицах (моль/с). Получаем формулу

$$-\frac{VdP}{RT} = \left( \frac{PW}{RT} - Q \right) dt$$

При предельном давлении  $dP = 0$  и поэтому получаем

$$Q = \frac{P_{пр}W}{RT}$$

Подставляя получаем

$$-VdP = W(P - P_{пр})dt$$

Интегрируем полученное ур-е и получаем

$$P - P_{пр} = (P_0 - P_{пр}) \exp \left( -\frac{W}{V}t \right) \quad (1)$$

Пренебрегая  $P_{пр}$  относительно  $P_0$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) \quad (2)$$

Как видим, величина  $\tau = V/W$  показывает характерное время откачки системы.

Теперь попробуем понять чем обусловлена скорость откачки. Очевидно, скорость  $W$  зависит от скорости откачки насоса  $W_n$ , но она так же зависит от трубопровода соединяющего насос к откачиваемой части, т.к. если трубопровод не сможет обеспечить достаточное количество газа к входу насоса то, производительность упадет.

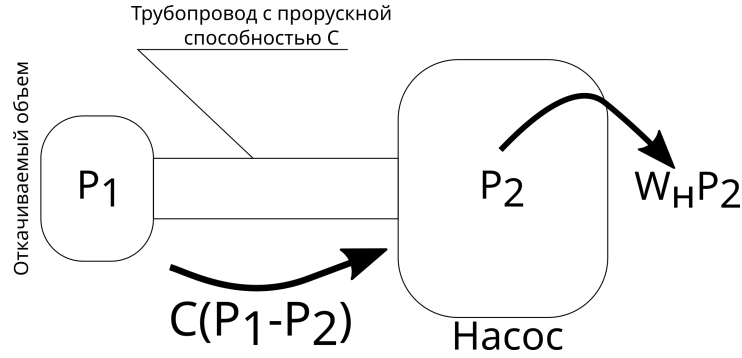


Рис. 7: Схема насоса с трубопроводом.

Попробуем описать систему математически. Пусть у нас есть насос со скоростью откачки  $W_n$  и трубопровод с пропускной способностью  $C$ . Давление в откачиваемом объеме –  $P_1$ . Исследовав схему 7 получаем

$$C(P_1 - P_2) = W_n P_2 \Rightarrow P_2 = \frac{CP_1}{C + W_n} \Rightarrow WP_1 = W_n P_2 = \frac{CW_n}{C + W_n} P_1$$

Как видим, для результирующей скорости  $W$  верно соотношение

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C}$$

Обобщая это выражение для последовательно соединенных труб получаем

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (3)$$

Заметим только что данные формулировки верны при молекулярном режиме течения, когда вязкое трение не имеет большого вклада в движение газа.

**Течение газа через трубу:** Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (4)$$

где  $r$  и  $L$  соответственно радиус и длина трубы. Если пренебречь давлением  $P_1$  у конца, обращенного к насосу, получаем формулу для пропускной способности трубы

$$C_{\text{тр}} = \frac{dV}{dt} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (5)$$

Для пропускной способности отверстия (например в кранах) имеем формулу

$$C_{\text{отв}} = S \frac{\bar{v}}{4} \quad (6)$$

### 3 Ход работы

1. Длина свободного пробега молекул азота при комнатной температуре:

P, торр	760	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$\lambda$ , см	$6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	5	50	500

2. Давление насыщенных паров вакуумного масла, применяемого в диффузионных насосах,  $\sim 10^{-7} - 10^{-10}$  торр (при комнатной температуре).

3. Скорость выделения газов при комнатной температуре (в основном CO и H<sub>2</sub>O) после нескольких часов откачки (в торр · л/(см<sup>2</sup>·с)):

Стекло	Металл	Нейлон
$10^{-9} - 10^{-8}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8}$

4. Обратная диффузия газов из диффузионных насосов. Максимальное отношение выходного давления к входному:

H <sub>2</sub>	He	N <sub>2</sub>
$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$	$10^7$



$V_{кр}, \text{см}^3$	$V_{фв}, \text{см}^3$	$V_{вв}, \text{см}^3$	$\rho_M, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\Delta h_1, \text{мм}$	$\Delta h_2, \text{мм}$	$P_{пр} \cdot 10^{-2}, \text{Па}$
50	2095	1220	885	16,9	26,6	1,8

Таблица 1: Измерение объёмов насосов

## Измерение скорости по ухудшению и улучшению вакуума

$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$	$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$	$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$	$t_{vid}, c$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$
7	0	9	70	0	80	136	0	10	190	0	79
11	4	9,1	71	1	76	137	1	10	191	1	76
12	5	9,2	72	2	74	138	2	10	192	2	70
13	6	9,4	73	3	70	139	3	10	193	3	61
14	7	9,6	74	4	61	140	4	10	194	4	48
15	8	9,6	75	5	43	141	5	10	195	5	46
16	9	9,7	76	6	40	142	6	10	196	6	37
17	10	9,7	77	7	31	143	7	10	197	7	31
18	11	9,8	78	8	29	144	8	10	198	8	24
19	12	9,8	79	9	26	145	9	11	199	9	23
20	13	9,8	80	10	23	146	10	11	200	10	20
21	14	9,8	81	11	20	147	11	12	201	11	18
22	15	9,9	82	12	19	148	12	13	202	12	17
23	16	10	83	13	18	149	13	15	203	13	16
24	17	11	84	14	16	150	14	17	204	14	15
25	18	13	85	15	15	151	15	19	205	15	14
26	19	14	86	16	14	152	16	20	206	16	13
27	20	15	87	17	13	153	17	22	207	17	13
28	21	16	88	18	13	154	18	24	208	18	12
29	22	19	89	19	12	155	19	25	209	19	12
30	23	20	90	20	12	156	20	27	210	20	12
31	24	21	91	21	12	157	21	29	211	21	12
32	25	22	92	22	12	158	22	31	212	22	11
33	26	24	93	23	11	159	23	32	213	23	11
34	27	24	94	24	11	160	24	33	214	24	11
35	28	27	95	25	11	161	25	35	215	25	11
36	29	29	96	26	11	162	26	36	216	26	11
37	30	30	97	27	11	163	27	38	217	27	11
38	31	31	98	28	11	164	28	38	218	28	11

$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$	$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$	$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$	$t_{vid}$	$t_{ist}$	$P \cdot 10^{-5}$
39	32	32	99	29	11	165	29	41	219	29	11
40	33	34	100	30	11	166	30	42	220	30	11
41	34	36	101	31	11	167	31	43	221	31	11
42	35	38	102	32	11	168	32	45	222	32	11
43	36	39	103	33	11	169	33	47	223	33	11
44	37	40	104	34	11	170	34	50	224	34	11
45	38	41	105	35	11	171	35	51	225	35	11
46	39	42	106	36	11	172	36	52	226	36	11
47	40	45	107	37	11	173	37	54	227	37	11
48	41	46	108	38	11	174	38	55	228	38	11
49	42	48	109	39	10	175	39	57	229	39	11
50	43	49	110	40	10	176	40	59	230	40	10
51	44	50	111	41	10	177	41	60	231	41	10
52	45	53	112	42	10	178	42	61	232	42	10
53	46	54	113	43	10	179	43	63	233	43	10
54	47	55	114	44	10	180	44	66	234	44	10
55	48	57	115	45	10	181	45	67	235	45	10
56	49	58	116	46	10	182	46	69	236	46	10
57	50	60	117	47	10	183	47	71	237	47	10
58	51	61	118	48	10	184	48	71			
59	52	64	119	49	10	185	49	73			
60	53	64	120	50	10	186	50	75			
61	54	66	121	51	10	187	51	77			
62	55	67	122	52	10						
63	56	70	123	53	10						
64	57	71	124	54	10						
65	58	73	125	55	10						
66	59	74	126	56	10						
67	60	76	127	57	10						

## Данные для МНК на улучшение

t	ln(P)	ln(P)*t	t	ln(P)	ln(P)*t
0	4.382026635	0	0	4.369447852	0
1	4.33073334	4.33073334	1	4.33073334	4.33073334
2	4.304065093	8.608130186	2	4.248495242	8.496990484
3	4.248495242	12.74548573	3	4.110873864	12.33262159
4	4.110873864	16.44349546	4	3.871201011	15.48480404
5	3.761200116	18.80600058	5	3.828641396	19.14320698
6	3.688879454	22.13327672	6	3.610917913	21.66550748
7	3.433987204	24.03791043	7	3.433987204	24.03791043
8	3.36729583	26.93836664	8	3.17805383	25.42443064
9	3.258096538	29.32286884	9	3.135494216	28.21944794
10	3.135494216	31.35494216	10	2.995732274	29.95732274
11	2.995732274	32.95305501	11	2.890371758	31.79408934
12	2.944438979	35.33326775	12	2.833213344	33.99856013
13	2.890371758	37.57483285	13	2.772588722	36.04365339
14	2.772588722	38.81624211	14	2.708050201	37.91270282
15	2.708050201	40.62075302	15	2.63905733	39.58585994
16	2.63905733	42.22491727	16	2.564949357	41.03918972
17	2.564949357	43.60413908	17	2.564949357	43.60413908
18	2.564949357	46.16908843	18	2.48490665	44.7283197
19	2.48490665	47.21322635	19	2.48490665	47.21322635
20	2.48490665	49.698133	20	2.48490665	49.698133
21	2.48490665	52.18303965	21	2.48490665	52.18303965
22	2.48490665	54.6679463	22	2.397895273	52.753696
23	2.397895273	55.15159127	23	2.397895273	55.15159127
24	2.397895273	57.54948655	24	2.397895273	57.54948655
25	2.397895273	59.94738182	25	2.397895273	59.94738182
26	2.397895273	62.34527709	26	2.397895273	62.34527709
27	2.397895273	64.74317237	27	2.397895273	64.74317237
28	2.397895273	67.14106764	28	2.397895273	67.14106764
29	2.397895273	69.53896291	29	2.397895273	69.53896291
30	2.397895273	71.93685818	30	2.397895273	71.93685818
31	2.397895273	74.33475346	31	2.397895273	74.33475346
32	2.397895273	76.73264873	32	2.397895273	76.73264873
33	2.397895273	79.130544	33	2.397895273	79.130544
34	2.397895273	81.52843928	34	2.397895273	81.52843928
35	2.397895273	83.92633455	35	2.397895273	83.92633455
36	2.397895273	86.32422982	36	2.397895273	86.32422982
37	2.397895273	88.72212509	37	2.397895273	88.72212509
38	2.397895273	91.12002037	38	2.397895273	91.12002037

39	2.302585093	89.80081863	39	2.397895273	93.51791564
40	2.302585093	92.10340372	40	2.302585093	92.10340372
41	2.302585093	94.40598881	41	2.302585093	94.40598881
42	2.302585093	96.70857391	42	2.302585093	96.70857391
43	2.302585093	99.011159	43	2.302585093	99.011159
44	2.302585093	101.3137441	44	2.302585093	101.3137441
45	2.302585093	103.6163292	45	2.302585093	103.6163292
46	2.302585093	105.9189143	46	2.302585093	105.9189143
47	2.302585093	108.2214994	47	2.302585093	108.2214994
48	2.302585093	110.5240845			
49	2.302585093	112.8266696			
50	2.302585093	115.1292546			
51	2.302585093	117.4318397			
52	2.302585093	119.7344248			
53	2.302585093	122.0370099			
54	2.302585093	124.339595			
55	2.302585093	126.6421801			
56	2.302585093	128.9447652			
57	2.302585093	131.2473503			
58	2.302585093	133.5499354			
29	2.685744718	69.82136075	23.5	2.741857926	57.59662512

$$k_1 = \frac{77.886596822 - 69.82136075}{1131 - 841} = -0.03 \pm 0.01$$

$$\sigma_{k_1} = \frac{1}{47} \sqrt{\frac{7.570177273 - 7.21322083}{1131 - 841}} + 0.03 = 0.01$$

$$k_2 = \frac{64,433646315 - 57.59662512}{605.4237288 - 552.25} = -0.1 \pm 0.06$$

$$\sigma_{k_2} = \frac{1}{57} \sqrt{\frac{7,507654894 - 6.412117243}{605.4237288 - 552.25}} + 0.1 = 0.06$$

Считаем

$$W = -\bar{a} \cdot V, \quad \varepsilon_W^2 = \varepsilon_{\bar{a}}^2 + \varepsilon_V^2$$

где  $\bar{a}$  — среднее коэффициентов наклона. Имеем:

$$W = (0, 14 \pm 0, 02) \text{ л/с}$$

## Данные для МНК на ухудшение

t_ist	t*P	t_ist	t*P
0	0	0	0
4	8.833097654	1	2.208274414
5	11.09601742	2	4.438406968
6	13.44425814	3	6.722129068
7	15.83234169	4	9.047052394
8	18.09410479	5	11.30881549
9	20.44913297	6	13.63275531
10	22.72125886	7	15.9048812
11	25.10620624	8	18.25905909
12	27.38858863	9	20.54144147
13	29.67097101	10	22.82382386
14	31.9533534	11	25.10620624
15	34.38802136	12	27.51041709
16	36.84136149	13	29.93360621
17	40.76421964	14	33.57053382
18	46.16908843	15	38.47424036
19	50.14208926	16	42.22491727
20	54.16100402	17	46.03685342
21	58.22436317	18	49.906597
22	64.77765754	19	55.9443406
23	68.90184229	20	59.91464547
24	73.06853851	21	63.93497119
25	77.27606133	22	68.00293397
26	82.62939959	23	73.0952381
27	85.80745342	24	76.27329193
28	92.28343225	25	82.39592165
29	97.65157907	26	87.54969158
30	102.0359214	27	91.8323293
31	106.4536033	28	96.15164173
32	110.9035489	29	100.5063412
33	116.3698973	30	105.7908157
34	121.8396439	31	111.0890871
35	127.3155156	32	116.4027571
36	131.8882193	33	120.8975343
37	136.4885398	34	125.4219014
38	141.1157385	35	129.9750223
39	145.7691151	36	134.5561063
40	152.2664996	37	140.8465121
41	156.9742973	38	145.4883731

42	162.5904425	39	150.9768394
43	167.3482728	40	155.6728119
44	172.1290122	41	160.3929432
45	178.6631361	42	166.7522604
46	183.4932661	43	171.526314
47	188.3446597	44	176.3226602
48	194.0664609	45	181.9373071
49	198.9617075	46	186.7803785
50	204.7172281	47	192.4341944
51	209.6545671	48	197.3219455
52	216.2619203	49	203.7852711
53	220.4208034	50	207.9441542
54	226.2413561	51	213.6723918
55	231.2580941		
56	237.9157336		
57	242.972753		
58	248.8466476		
59	253.9398405		
60	259.8440004		
61	264.9721307		
31.94915254	118.6396274	28.44230769	91.71613343

$$k_1 = \left( \frac{118.6396274 - 106.00915514034}{1754.7708474576273 - 1412,87277924} \right) = 1.3 \pm 0.1$$

$$\sigma_{k_1} = \frac{1}{58} \sqrt{\left( \frac{1754.7708474576273 - 1412,87277924}{1313.8474576271187 - 1020.74834802418} \right) - 1.3} = 0.1$$

$$k_2 = \left( \frac{91.71613343 - 87.33452342}{1852.5576923076924 - 1412,87277924} \right) = 1.4 \pm 0.2$$

$$\sigma_{k_2} = \frac{1}{51} \sqrt{\left( \frac{1852.5576923076924 - 1412,87277924}{875.5 - 808.96442929} \right) - 1.4} = 0.2$$

Имея в виду соотношения (1) для случая ухудшения вакуума (без откачки), оценим  $Q_{\text{н}}$  с помощью полученных зависимостей. Считаем

$$\frac{dP}{dt} = \bar{a}$$

где  $\bar{a}$  — среднее коэффициентов наклона. Имеем:

$$Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} = (1,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

$Q_{\text{д}}$  обычно порядка  $10^{-8}$ , поэтому можно считать  $Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} \approx Q_{\text{н}}$ . Таким образом,

$$Q_{\text{н}} \approx 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ торр} \cdot \text{л/с}$$

## 4 Выводы

В ходе данной работы было проверено несколько методик по измерению производительности высоковакуумного насоса. Проверены теоретические зависимости, связанные с течением газа. Измерено значение производительности насоса с точностью  $\varepsilon = 0,03$