

Московский Физико-Технический Институт

Работа 2.3.1:
"Получение и измерение вакуума"

Шлапак Мария, Б04-004
Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Цель работы:

1) измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки; 2) определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума.

В работе используются:

вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

Описание работы

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса: 1) низковакуумные — до 10^{-2} - 10^{-3} торр; 2) высоковакуумные — 10^{-4} - 10^{-7} торр; 3) установки сверхвысокого вакуума — 10^{-8} - 10^{-11} торр.

В данной работе изучаются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления 10^{-2} торр и диффузионным масляным насосом до давления 10^{-5} торр, а также методы измерения вакуума в этом диапазоне.

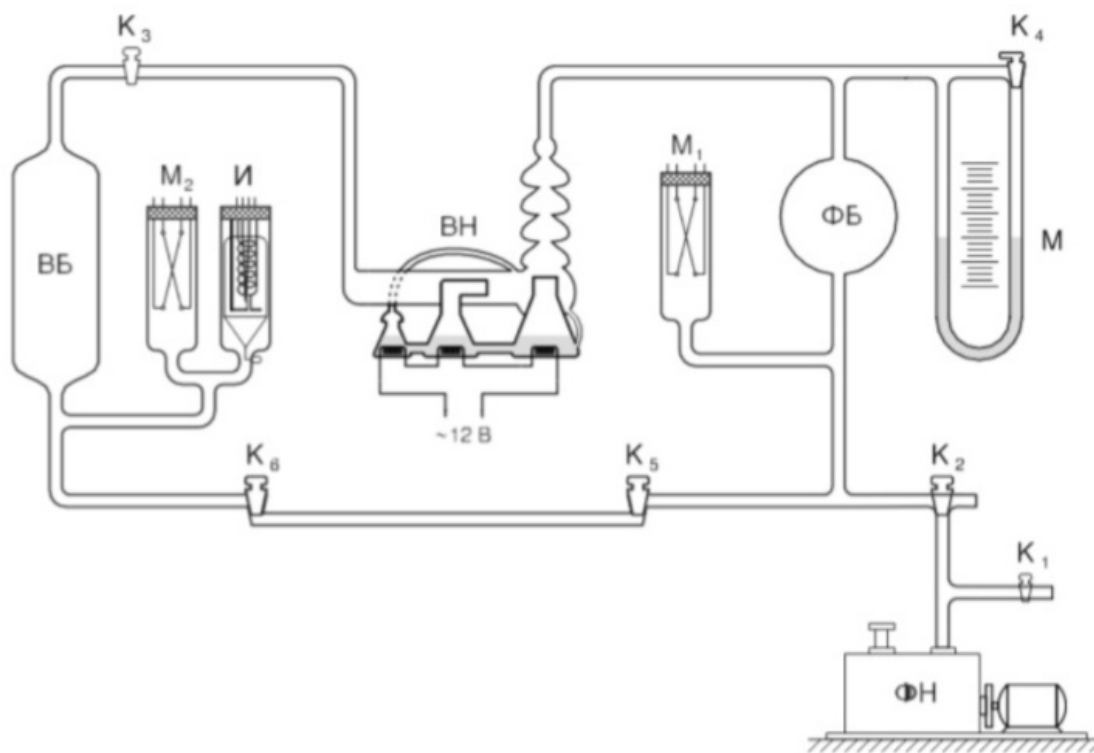
Экспериментальная установка:

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

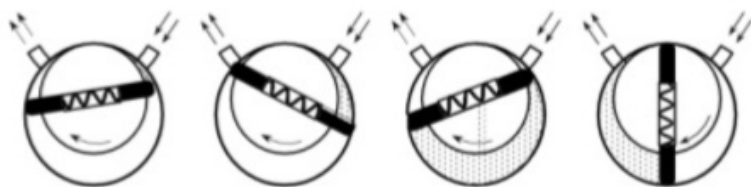


Рис. 2. Схема действия ротационного двухпластинчатого форвакуумного насоса. В положениях «а» и «б» пластина «А» засасывает разреженный воздух из откачиваемого объема, а пластина «Б» вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу. В положениях «в» и «г» пластины поменялись ролями

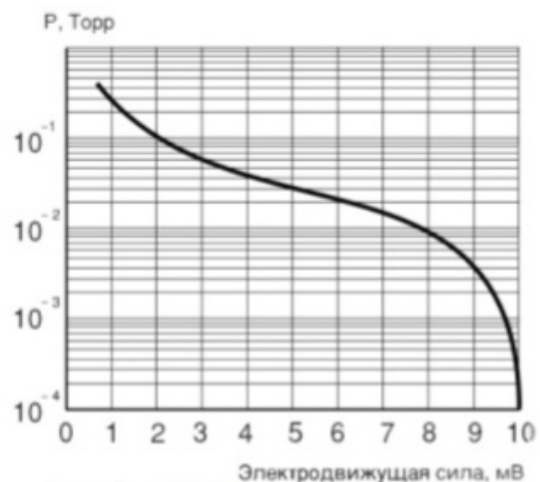


Рис. 5. Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

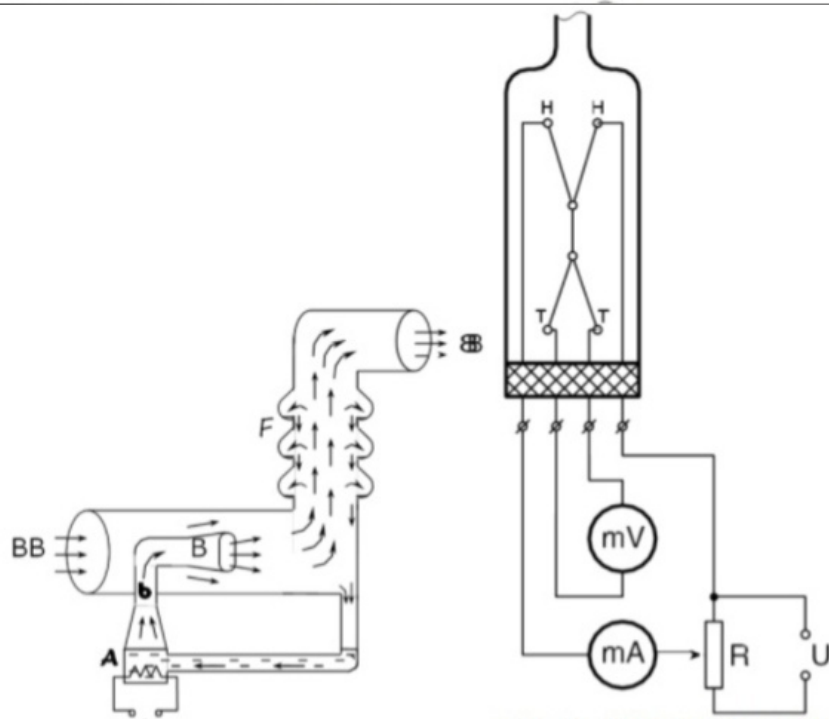


Рис. 3. Схема работы диффузионного насоса

Рис. 4. Схема термопарного манометра с лампой ЛТ-2

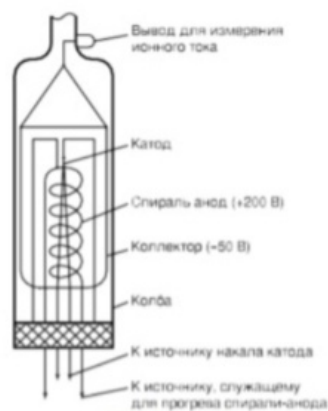


Рис. 6. Схема ионизационной лампы ЛМ-2

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. Рассмотрим обычную схему откачки. Разделим вакуумную систему на две части: «откачиваемый объем» (в состав которого включим используемые для работы части установки) и «насос», к которому, кроме самого насоса, отнесем трубопроводы и краны, через которые производится откачка нашего объема. Обозначим через Q_d количество газа, десорбирующегося с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, через Q_i — 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. Будем измерять количество газа Q_d , Q_i и Q_n в единицах PV (легко видеть, что это произведение с точностью до множителя RT/μ равно массе газа). Основное уравнение, описывающее процесс откачки, имеет вид

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_n - Q_i)dt$$

Левая часть этого уравнения равна убыли газа в откачиваемом объеме V , а правая определяет количество газа, уносимого насосом, и количество прибывающего вследствие перечисленных выше причин за время dt . При достижении предельного вакуума (давление P_{pr})

$$\frac{dP}{dt} = 0$$

$$W = \frac{\sum Q_i}{P_{pr}}$$

Обычно Q_i постоянно, а Q_n и Q_d слабо зависят от времени, поэтому в наших условиях все эти члены можно считать постоянными. Считая также постоянной скорость откачки W , уравнение (1) можно проинтегрировать и, используя (2), получить

$$P = P_o \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{pr}$$

Течение газа через трубу. Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном давлении и даже при понижении давления до форвакуумного длина свободного пробега меньше диаметра трубок и течение откачиваемого газа определяется его вязкостью, т. е. взаимодействием его молекул. При переходе к высокому вакууму картина меняется. Столкновения молекул между собой начинают играть меньшую роль, чем соударения со стенками. Течение газа в трубе напоминает в этих условиях диффузию газа из области больших концентраций в области, где концентрация ниже, причем роль длины свободного пробега играет ширина трубы. Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула

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

Применим эту формулу к случаю, когда труба соединяет установку с насосом. Пренебрежем давлением P_1 у конца, обращенного к насосу. Будем измерять количество газа, покидающего установку при давлении $P = P_2$. Пропускная способность трубы

$$C_{tr} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{tr} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}$$

Мы видим, что пропускная способность зависит от радиуса трубы в третьей степени и обратно пропорциональна ее длине. В вакуумных установках следует поэтому применять широкие короткие трубы.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

При расчете вакуумных систем нужно принимать во внимание также пропускную способность отверстий, например, в кранах. Для них имеется формула

$$\eta = \frac{1}{4} S n < v >$$

где η — число молекул, вылетающих из отверстия в вакуум в единицу времени, S — площадь отверстия, n — концентрация молекул перед отверстием, $<v>$ — средняя скорость молекул газа. С другой стороны, $\eta = dN/dt$, $N = PV/kT$, $n = P/kT$, и аналогично формуле для количества газа, покидающего установку при давлении P , получается пропускная способность отверстия

$$C_{otv} = \left(\frac{dV}{dt}\right)_{otv} = S \frac{<v>}{4}$$

Для диффузионного насоса можно считать, что каждая молекула воздуха, попавшая в кольцевой зазор между соплом и стенками насоса, увлекается струей пара и не возвращается обратно в откачиваемый объем. Скорость откачки такого насоса можно считать равной пропускной способности отверстия с площадью, равной площади кольцевого зазора, т. е. насос качает как кольцевой зазор, с одной стороны которого расположен откачиваемый объем, а с другой — пустота.

Ход работы

1. Определим объемы форвакуумной и высоковакуумной частей установки. Сначала впуским атмосферу в установку. Запроем воздух при комнатных условиях в капилляре между кранами 5 и 6. После этого откачаем воздух из оставшейся части установки (сделав это в два этапа - сначала насос должен откачать сам себя, а только потом - установку). После этого мы сначала высвободим запертый воздух только в ФВ часть, а затем добавим к ней и ВВ. Тогда записав уравнение Менделеева-Клапейрона и зная объем капилляра, мы найдем объемы соответствующих частей установки.

Давление, достигнутое откачкой форвакуумом: $1,6 \times 10^{-2}$ мм.рт.ст

Для форвакуума:

$h_1 = 34$ см. масл.столба

$h_2 = 8,3$ см. масл.столба

$\delta h_{fv} = 25,7$ см. масл.столба

Для высоковакуума:

$h_3 = 29,6$ см. масл.столба

$h_4 = 13,3$ см. масл.столба

$\delta h_{vv} = 16,3$ см. масл.столба

$\rho_{maslo} = 0,885$ г/см³

$V_{k5+k6+k} = 50$ см³

$L_k = 10,8$ см

$d_k = 0,8$ мм

$P_{atm} = 100700$ Па

Рассчитаем объём:

$$P_{atm} \times V_{k5+k6+k} = P_{h1,h2} \times (V_{k5+k6+k} + V_{fv})$$

После подстановок получаем, что:

$V_{fv} \approx 2209$ см³

$V_{poln} \approx 3508$ см³

Тогда:

$V_{vv} \approx 3508 - 2209 = 1299$ см³

С учётом погрешностей:

$$V_{fv} = 2,2 \pm 0,25 \text{ л}$$

$$V_{vv} = 1,3 \pm 0,3 \text{ л}$$

1. Получим ВВ и измерим скорость откачки. Включим термопарные вакуумметры. Как только давление упадет ниже $3 \cdot 10^{-2}$ торр, закроем К6 и начнем ВВ откачку, включив диффузионный насос. Как только показатель М2 зашкалит, можно включать ионизационный манометр. Измерим P_{pr} в системе и запишем его. Далее будем портить ВВ, отключив ДН, а потом снова его восстанавливать. По зависимости $P(t)$ найдем W системы.

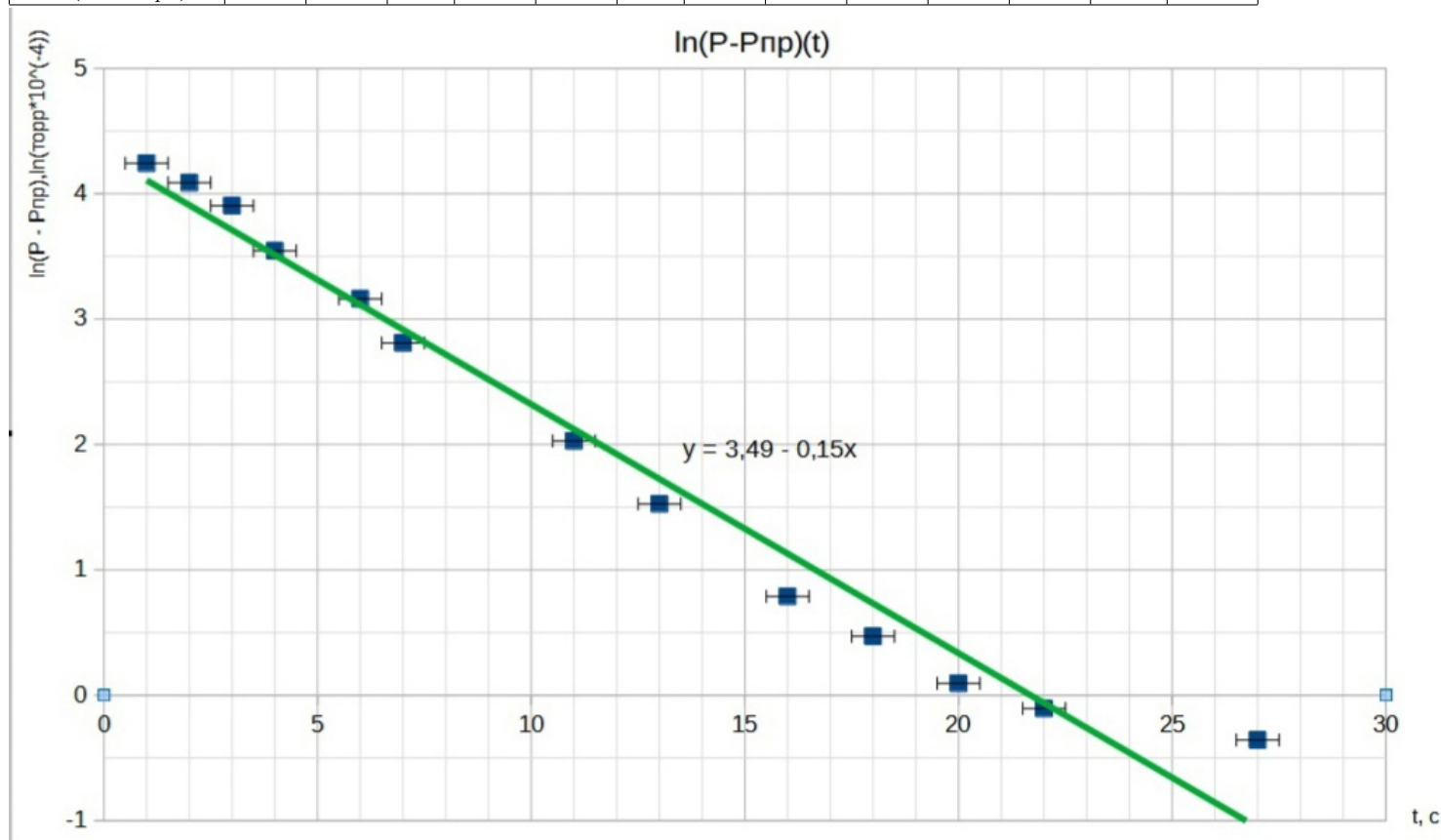
$$P_{pr} = 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ торр.}$$

$$P - P_{pr} = (P_0 - P_{pr}) \times \exp^{-\frac{W}{V} \times t}$$

Прологарифмируем:

$$\ln(P - P_{pr}) \approx -\frac{W}{V} \times t + \ln(P_0) + 5 \times \ln(10)$$

t, c, $\sigma_t = 0,5$ с	1	2	3	4	6	7	11	13	16	18	20	22	27
P, торр * 10^{-5}	77	67	57	42	31	24	15	12	9,6	9,0	8,5	8,3	8,1
$\ln(P - P_{pr})$	4,24	4,08	3,9	3,54	3,16	2,8	2,03	1,53	0,79	0,47	0,09	-0,1	-0,36



Для расчёта погрешностей при построении графиков применялся МНК:

$$y = a + bx$$

$$b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$$

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - b^2}$$

$$a = \langle y \rangle - b \langle x \rangle$$

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$$

Тогда:

$$b = -\frac{W}{V} = \frac{9,29 - 10,71 \times 1,87}{185,57 - 114,7} \approx -0,152 \approx -0,15c^{-1}$$

$$a = 1,87 + 0,152 \times 10,71 \approx 3,49$$

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{14}} * \sqrt{\frac{6,27 - 3,49}{185,57 - 114,7} - 0,152^2} \approx 0,04c^{-1}$$

Тогда:

$y = 3,49 - 0,15x$ То есть:

$W/V = 0,15c^{-1}$, тогда $W = 1,3 \times 0,15 = 0,195 \approx 0,2$ л/с

Итак, $W = 0,20 \pm 0,03$ л/с

2. Оценим величину потока Q_n

Запишем в таблицу, как ухудшается вакуум.

t, с $\sigma_t = 0,5$ с	6	15	18	31	35	39	43	47	50	53	54
P - P _{пр} , торр * 10^{-5}	0,6	1,2	2,2	15,6	18,6	22,6	25,6	29,6	31,6	34,6	36,6

Для расчёта погрешностей при построении графиков применялся МНК:

$$y = bx$$

$$b = \frac{\langle xy \rangle}{\langle x \rangle^2}$$

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle} - b^2}$$

Тогда:

$$b = \frac{905,4}{1506} \approx 0,6 \text{ gaza/l}$$

$$\sigma_b \approx \frac{1}{\sqrt{14}} * \sqrt{\frac{561,23}{1506} - 0,6^2} \approx 0,04$$

$b = \frac{Q_d + Q_i}{V} = 0,6$ торр/с

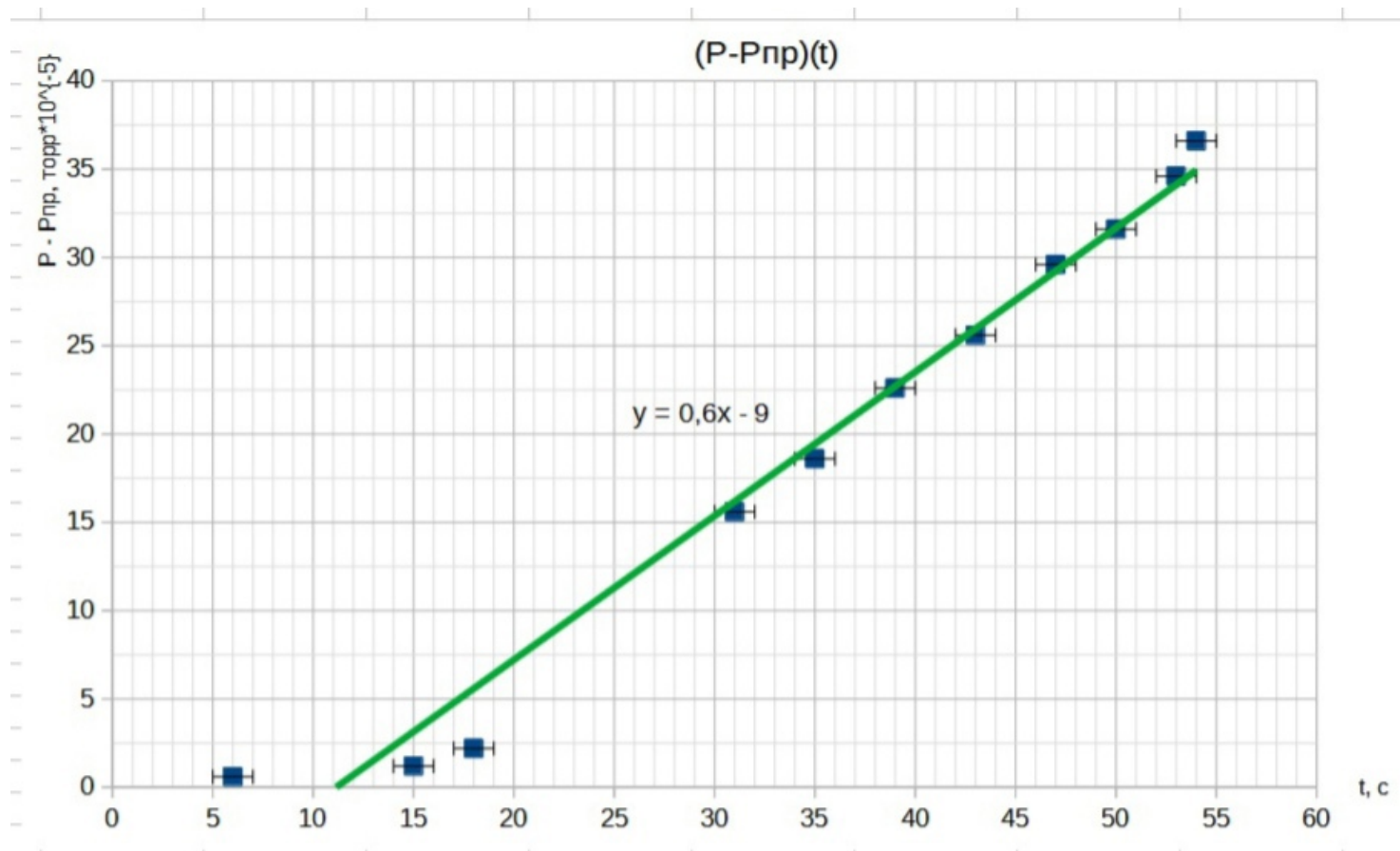
Тогда $Q_d + Q_i = 0,6 \times 1,3 = 0,78 * 10^{-5}$ торр*л/с

Так как $P - P_{pr} = \frac{Q_d + Q_i}{V} t$ и $W = \sum \frac{Q_i}{P_{pr}}$, то

$Q_n = P_{pr} W - (Q_d + Q_i) = 7,4 * 10^{-5} * 0,2 \text{ torr} * \text{l/s} - (0,78 * 10^{-5}) \text{ torr} * \text{l/s} \approx 0,7 * 10^{-5} \text{ torr} * \text{l/s} \approx 0,7 * 10^{-5}$
торр*л/с

$Q_n = (0,7 \pm 0,07) * 10^{-5}$ торр*л/с

$y = 0,6x + 9$



Теперь создадим искусственную течь. Тогда запишем установившееся давление в подпорченном ВВ, а также давление со стороны ФВ части.

$$P_{pr}W = \sum Q_i = Q_1 = (14,8 \pm 1,8) * 10^{-6} \text{ торр*л/с} \quad P_{ust}W = Q_1 + \frac{d(PV)_{kapp}}{dt}$$

То есть

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_{ust}}{L}$$

$P_{ust} = 1,7 * 10^{-4} \text{ торр}$ $P_f = 10^{-2} \text{ торр}$

Из вышеперечисленных выражений следует, что $\frac{d(PV)}{dt} = (1,8 \pm 0,2) * 10^{-6}$ торр*л/с и $W = (14,8 * 10^{-6} + 3 * 10^{-6}) / (1,7 * 10^{-4}) \approx 0,12 /$

$$W = (0,12 \pm 0,02) \text{ л/с}$$

Вывод:

Полученные значения W оказались одного порядка ($10^0 - 1$), однако различаются в два раза:

$$W_1 = 0,20 \pm 0,03 \text{ л/с}$$

$$W_2 = 0,12 \pm 0,02 \text{ л/с}$$

Несовпадение может быть обусловлено точностью измерений и неточностью протеканий через искусственную течь.

Литература

Лабораторный практикум по общей физике. Термодинамика/А.Д. Гладун - М, 2004 г