

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

Вопрос по выбору для экзамена по термодинамике  
Измерение осмотического давления

Автор:  
Тихонов Дмитрий Романович,  
студент группы Б01-206

Долгопрудный, 2023

# 1 Введение

## Цель работы:

1. измерение осмотического давления при разной концентрации жёлтой кровяной соли;
2. проверка закона Вант-Гоффа.

**В работе используются:** осмометр; секундомер; пипетка; мерный стаканчик; химический стакан.

# 2 Теоретические сведения

В работе изучаются свойства *полупроницаемых перегородок*, т. е. таких перегородок, которые пропускают молекулы растворителя, но не пропускают молекулы растворённых в ней соединений. Прохождение растворителя через полупроницаемую перегородку называется *осмосом*.

Так, многие перепонки и мембраны животного и растительного происхождения свободно пропускают молекулы воды, но не пропускают молекулы растворённых в ней соединений, обладающих большей молекулярной массой.

Рассмотрим сосуд (рис. 1), разделённый на две части полупроницаемой перегородкой, по одну сторону которой находится вода, а по другую - водный раствор вещества, молекулы которого не могут проходить сквозь перегородку. Наполним обе части сосуда до одинакового уровня.

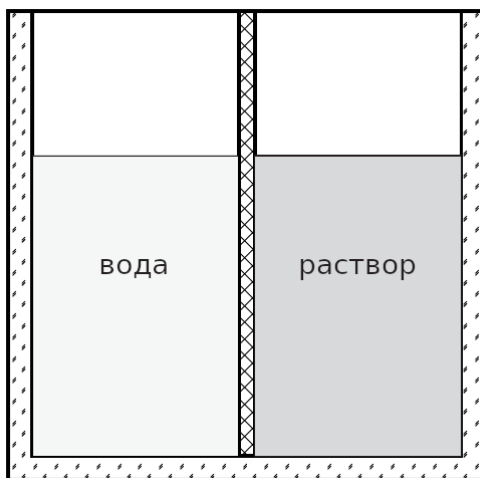


Рис. 1: Сосуд, разделенный на две части перегородкой

Опыт показывает, что вода начинает переходить в ту часть сосуда, где содержится раствор. Этот переход продолжается до тех пор, пока между водой и раствором не установится некоторая разность уровней (рис. 2), а следовательно, и разность давлений, которая носит название *осмотического давления раствора*.

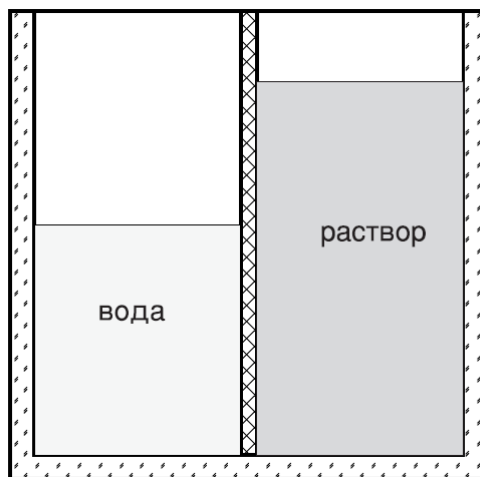


Рис. 2: Положение уровней жидкостей в момент окончания перехода

Осмотическое давление подчиняется закону Вант-Гоффа:

$$P_{\text{осм}} = nkT, \quad (1)$$

где  $n$  - число молекул растворенного вещества в единице объема,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура. Формула 1 позволяет по известной величине  $P_{\text{осм}}$  определить концентрацию молекул растворенного вещества.

### 3 Методика измерений и используемое оборудование

Приборы, служащие для измерения осмотического давления, называют *осмометрами*. Прохождение растворителя через полупроницаемые перегородки происходит медленно, так что равновесие раствора и растворителя устанавливается не скоро. Для ускорения измерений над раствором создают избыточное давление воздуха. Если избыточное давление равно осмотическому, то переход растворителя через перегородку прекращается. Если же оно превышает осмотическое давление, то растворитель переходит через перегородку в обратном направлении. Таким образом, измерение осмотического давления сводится к измерению равновесного давления газа. Схема используемого в работе осмометра приведена на рис. 3.

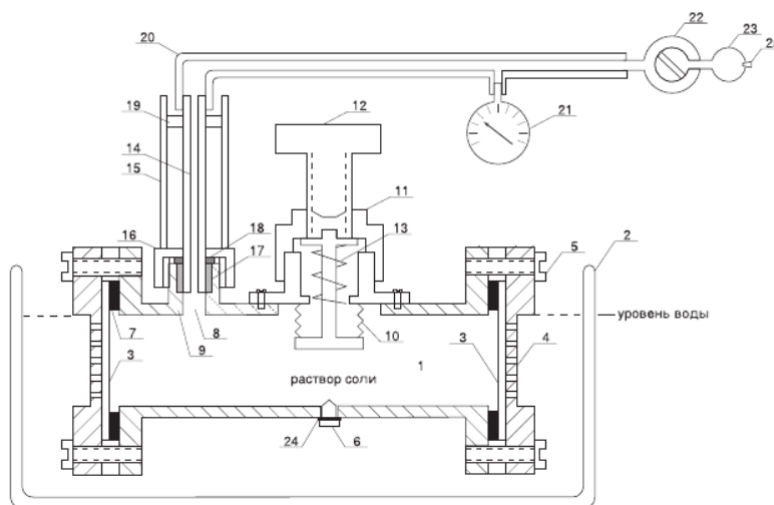


Рис. 3: Осмометр, используемый в данной работе

Раствор заливается в контейнер, который помещается в сосуд с растворителем. Контейнер представляет собой куб 1, закрытый с четырёх сторон полупроницаемыми целлофановыми мембранами 3 толщиной 0,2 мм. Мембраны зажимаются между стенками куба 1 и металлическими сетками 4. Между мембранами и стенками куба вставлены резиновые уплотнения 7. Защитные сетки 4 предохраняют мембраны от раздувания наружу. Сосуд заполняется раствором через отверстие в дне куба, плотно закрываемое металлической гайкой 6 с резиновой прокладкой 24. Через крышку куба вставлен стеклянный капилляр 14 (внутренний диаметр 0,5 мм). В процессе осмоса объём раствора увеличивается, и уровень раствора движется по капилляру вверх. Скорость подъёма уменьшается при избыточном давлении воздуха на верхнем конце капилляра; оно создаётся с помощью резиновой груши 23 со встроенным клапаном 25 и фиксируется краном 22. Давление измеряется манометром 21. Кран 22 позволяет сбросить избыточное давление. На крышке куба 1 смонтировано устройство, состоящее из гофра 10, накидной гайки 11, винта 12 и пружины 13, позволяющее менять объём внутреннего пространства в кубе. Это бывает необходимо, если в процессе опыта мембраны вытягиваются и уровень раствора в капилляре понижается. При закручивании винта 12 объём контейнера уменьшается и раствор вытесняется в капилляр. Таким образом, уровень раствора можно установить в капилляре на удобной для наблюдения высоте.

Для определения  $P_{\text{осм}}$  измеряют изменение скорости  $v$  движения уровня раствора в капилляре в зависимости от давления воздуха  $P$  и строят график зависимости  $v(P)$ . Чем больше разность давления  $P - P_{\text{осм}}$ , тем больше скорость  $v$  движения уровня в капилляре. При  $P \approx P_{\text{осм}}$  эта скорость равна нулю. Поэтому измерения следует проводить либо при  $P \gg P_{\text{осм}}$ , либо при  $P \ll P_{\text{осм}}$ . По графику легко определить значение  $P$ , при котором  $v = 0$ , т. е. осмотическое давление  $P_{\text{осм}}$ .

В работе измеряется осмотическое давление водного раствора жёлтой кровяной соли  $K_4Fe(CN)_6$ , при нескольких значениях концентрации и проверяется справедливость закона Вант-Гоффа. Молекулы жёлтой кровяной соли при растворении диссоциируют:  $K_4Fe(CN)_6 \rightarrow 4K^+ + [Fe(CN)_6]^{4-}$ . Ионы  $K^+$  свободно проникают через нашу перегородку и не создают осмотического давления.

## 4 Результаты измерений и обработка данных

В работе для каждой концентрации раствора сначала проводились измерения при давлениях  $P \gg P_{\text{осм}}$ . Начальное давление устанавливалось  $P = 200$  делений, затем оно понижалось до тех пор, пока давление достаточно больше осмотического, чтобы время эксперимента не было слишком большим.

После этого измерения проводились при давлениях  $P \ll P_{\text{осм}}$ , при этом можно было наблюдать повышение уровня жидкости в капилляре. Прямой осмос удалось наблюдать только при давлении  $P = 0$  делений.

Предел измерений манометра, используемого в работе равен  $P_{\text{пр}} = 400 \text{ дел} = 1 = 98066 \text{ Па}$ . Цена деления равна  $P_{\text{ц.д.}} = 1 \text{ дел} = 245 \text{ Па}$ . Инструментальная погрешность измерения  $\sigma_P = 1 \text{ дел}$ .

Приведём результаты измеренных значений для разных концентраций раствора.

## 4.1 Измерение осмотического давления для раствора концентрацией 0,3%

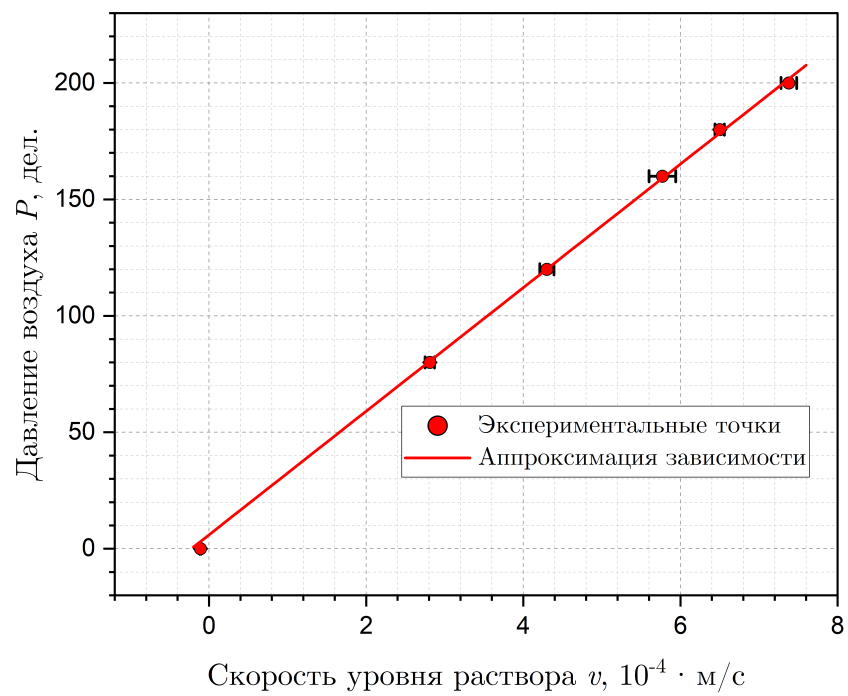
$P$ , дел.	$t$ , с	$l$ , см	$u$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$	$\bar{u}$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$	$\sigma_{\bar{u}}$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$
200	27,48	2	7,28	7,38	0,10
	27,51		7,27		
	26,81		7,46		
	26,44		7,56		
	27,27		7,33		
180	30,46	2	6,57	6,50	0,06
	30,32		6,60		
	30,76		6,50		
	31,20		6,41		
	31,07		6,44		
160	33,68	2	5,94	5,77	0,17
	33,14		6,04		
	36,10		5,54		
	35,30		5,67		
	35,30		5,67		
120	45,94	2	4,35	4,30	0,09
	44,85		4,46		
	46,79		4,27		
	47,41		4,22		
	47,76		4,19		
80	69,80	2	2,87	2,81	0,06
	69,81		2,86		
	70,35		2,84		
	72,71		2,75		
	74,01		2,70		
40	столб медленно опускается				
20	столб медленно понижается				
10	столб медленно поднимается				
0	87,07	0,1	0,11	-0,11	0,01
	85,28		0,12		
	87,94		0,11		
	89,98		0,11		
	86,23		0,12		

Таблица 1: Результаты измерений для первой концентрации раствора

Построим график зависимости (рис. 4) давления воздуха  $P$  от изменения скорости  $v$  движения уровня раствора в капилляре для раствора с концентрацией 0,3%.

Аппроксимацию прямой произведем методом наименьших квадратов в компьютерной программе *Origin Pro 2023*, в которой определим координату пересечения графика  $P(v)$  с осью ординат. Получим:

$$P_{\text{осм}} = 6,0 \pm 2,3 \text{ дел} = 1470 \pm 564 \text{ Па}$$

Рис. 4: График зависимости  $P(v)$  для первой концентрации раствора

## 4.2 Измерение осмотического давления для раствора концентрацией 0,15%

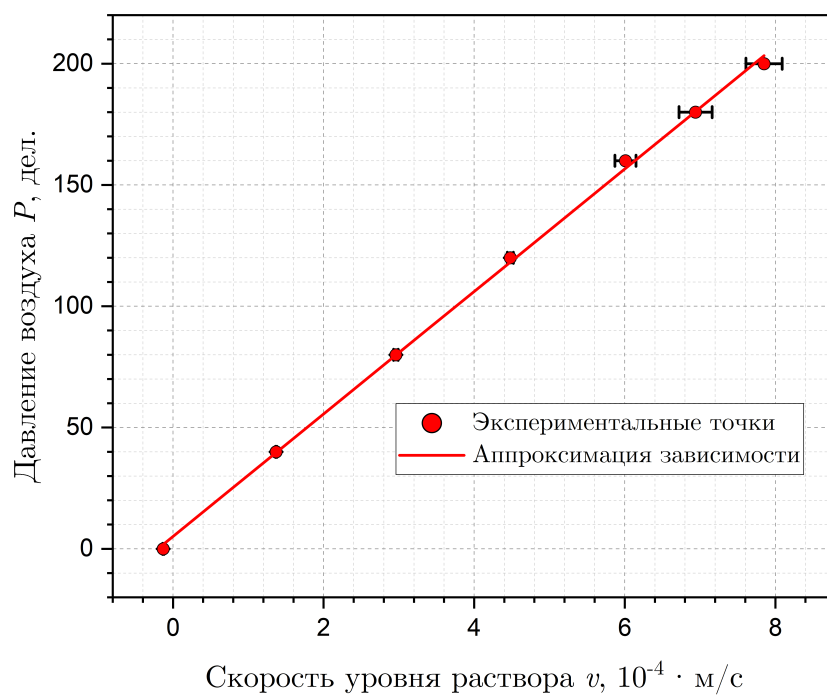
$P$ , дел.	$t$ , с	$l$ , см	$u$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$	$\bar{u}$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$	$\sigma_{\bar{u}}$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$
200	23,69	2	8,44	7,85	0,24
	25,47		7,85		
	25,60		7,81		
	26,34		7,59		
	26,50		7,55		
180	27,22	2	7,35	6,94	0,22
	29,16		6,86		
	28,22		7,09		
	29,67		6,74		
	30,04		6,66		
160	33,11	2	6,04	6,01	0,14
	32,47		6,16		
	32,42		6,17		
	33,76		5,92		
	34,89		5,73		
120	44,49	2	4,50	4,48	0,04
	44,23		4,52		
	44,78		4,47		
	44,23		4,52		
	45,68		4,38		
80	66,00	2	3,03	2,96	0,03
	67,49		2,96		
	67,70		2,95		
	68,54		2,92		
	68,29		2,93		
40	71,69	1	1,39	1,37	0,01
	74,76		1,34		
	73,59		1,36		
	73,18		1,37		
	72,98		1,37		
20	столб медленно понижается				
10	столб медленно поднимается				
0	79,77	0,1	0,13	-0,13	0,01
	73,12	0,1	0,14		
	77,01	0,1	0,13		
	80,59	0,1	0,12		
	81,70	0,1	0,12		

Таблица 2: Результаты измерений для второй концентрации раствора

Построим график зависимости (рис. 5) давления воздуха  $P$  от изменения скорости  $v$  движения уровня раствора в капилляре для раствора с концентрацией 0,15%.

Аппроксимацию прямой произведем методом наименьших квадратов в компьютерной программе *Origin Pro 2023*, в которой определим координату пересечения графика  $P(v)$  с осью ординат. Получим:

$$P_{\text{осм}} = 5,1 \pm 1,6 \text{ дел} = 1250 \pm 392 \text{ Па}$$

Рис. 5: График зависимости  $P(v)$  для второй концентрации раствора



### 4.3 Измерение осмотического давления для раствора концентрацией 0,075%

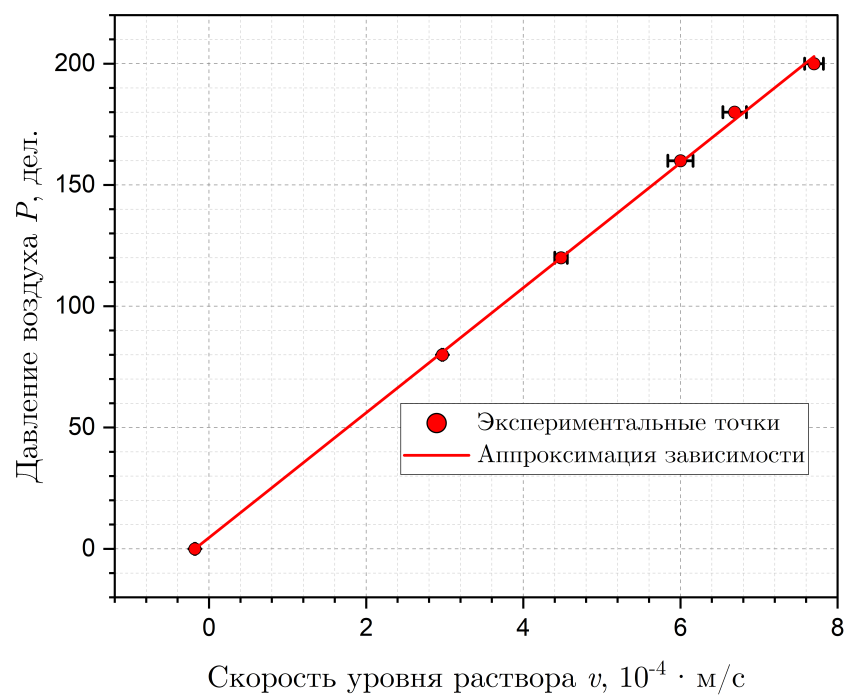
$P$ , дел.	$t$ , с	$l$ , см	$u$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$	$\bar{u}$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$	$\sigma_{\bar{u}}$ , $10^{-4} \cdot \text{м/с}$
200	26,29	2	7,61	7,70	0,12
	25,51		7,84		
	25,92		7,72		
	25,52		7,84		
	26,66		7,50		
180	30,41	2	6,58	6,69	0,15
	28,87		6,93		
	30,11		6,64		
	29,22		6,84		
	30,88		6,48		
160	34,16	2	5,85	6,00	0,16
	34,71		5,76		
	31,98		6,25		
	32,71		6,11		
	33,16		6,03		
120	44,95	2	4,45	4,48	0,08
	44,16		4,53		
	43,55		4,59		
	44,23		4,52		
	46,48		4,30		
80	33,66	1	2,97	2,97	0,01
	33,29		3,00		
	33,63		2,97		
	33,93		2,95		
	33,69		2,97		
40	столб медленно опускается				
20	столб медленно понижается				
10	столб медленно поднимается				
0	56,32	0,1	0,18	0,18	0,01
	57,28		0,17		
	56,69		0,18		
	56,98		0,18		
	57,91		0,17		

Таблица 3: Результаты измерений для третьей концентрации раствора

Построим график зависимости (рис. 6) давления воздуха  $P$  от изменения скорости  $v$  движения уровня раствора в капилляре для раствора с концентрацией 0,075%.

Аппроксимацию прямой произведем методом наименьших квадратов в компьютерной программе *Origin Pro 2023*, в которой определим координату пересечения графика  $P(v)$  с осью ординат. Получим:

$$P_{\text{осм}} = 4,6 \pm 1,8 \text{ дел} = 1127 \pm 441 \text{ Па}$$

Рис. 6: График зависимости  $P(v)$  для третьей концентрации раствора

#### 4.4 Измерение зависимости осмотического давления от концентрации раствора

По результатам предыдущих пунктов заполним таблицу 4. По данной таблице построим график зависимости (рис. 7) осмотического давления  $P_{\text{осм}}$  от концентрации раствора  $n$ . Аппроксимацию прямой произведем методом наименьших квадратов в компьютерной программе *Origin Pro 2023*.

$n, \%$	$P_{\text{осм}}, \text{ дел.}$	$\sigma_{P_{\text{осм}}}, \text{ дел.}$	$P_{\text{осм}}, \text{ Па}$	$\sigma_{P_{\text{осм}}}, \text{ Па}$	$P_{\text{В.-Г.}}, \text{ Па}$
0,300	6,0	2,3	1470	564	19998
0,150	5,1	1,6	1250	392	9999
0,075	4,6	1,8	1127	441	5000

Таблица 4: Зависимость осмотического давления от концентрации

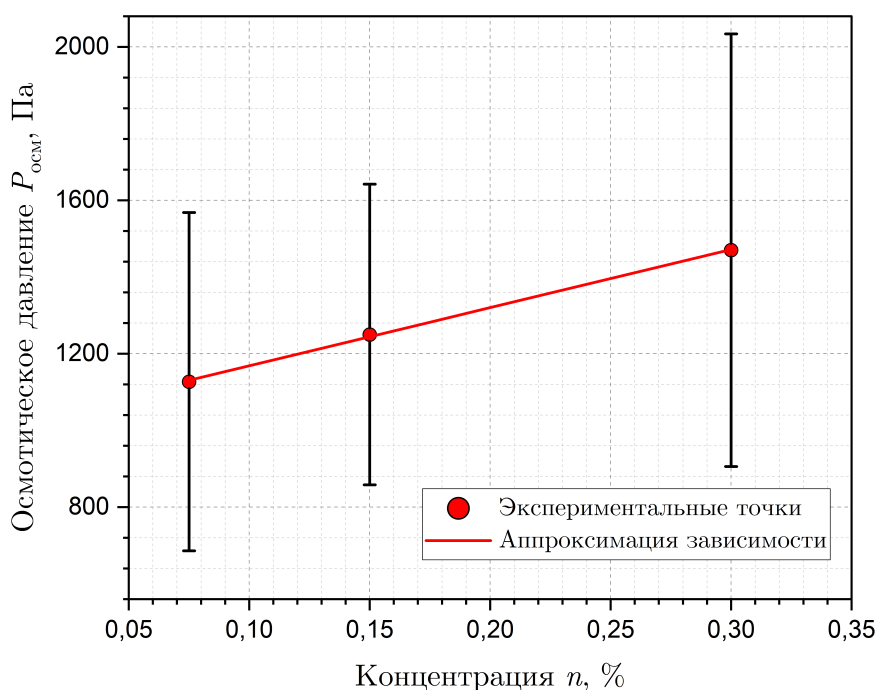


Рис. 7: График зависимости  $P_{\text{осм}}(n)$

Теперь сравним полученные экспериментальные данные с теоретическими, для этого преобразуем закон Вант-Гоффа:

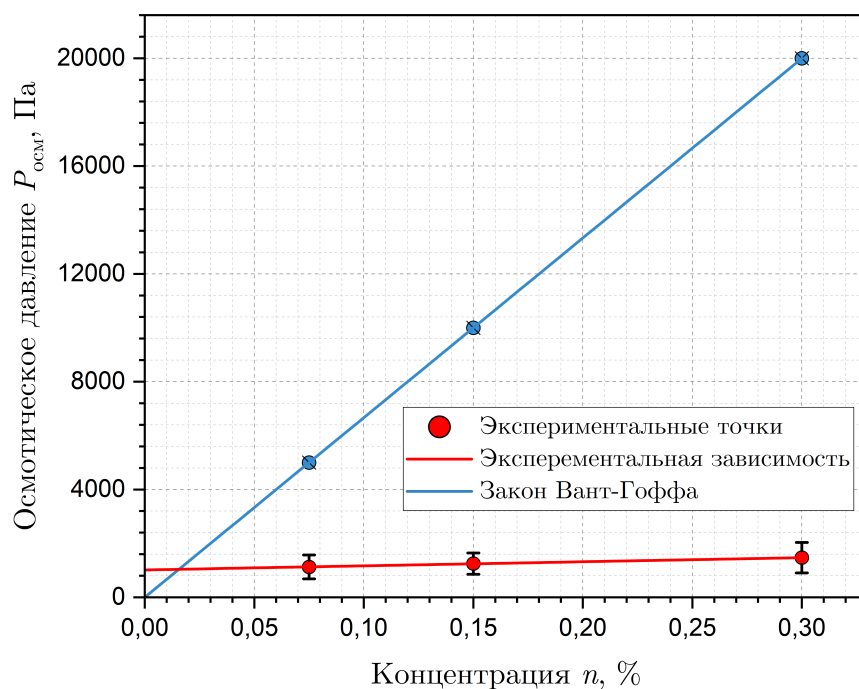
$$P_{\text{В.-Г.}} = nkT = \frac{N_{\text{соли}} \cdot kT}{V_{\text{воды}}} = \frac{N_{\text{соли}} \cdot kT \cdot \rho_{\text{воды}}}{M_{\text{воды}}} = \frac{N_A \nu_{\text{соли}} \cdot kT \cdot \rho_{\text{воды}}}{M_{\text{воды}}}$$

Отсюда, получим:

$$P_{\text{В.-Г.}} = \frac{RT \cdot m_{\text{соли}} \cdot \rho_{\text{воды}}}{M_{\text{воды}} \cdot \mu_{\text{соли}}} = \frac{RT \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot n[\%]}{\mu_{\text{соли}} \cdot 100\%} \quad (2)$$

По формуле 2 вычислим значения осмотических давлений  $P_{\text{В.-Г.}}$  для трёх разных концентраций, указанных в таблице 4 и занесём в неё полученные результаты.

Построим график зависимости (рис. 8) осмотического давления  $P_{\text{В.-Г.}}$  от концентрации  $n$  по закону Вант-Гоффа.

Рис. 8: Объединённый график зависимости  $P_{осм}(n)$ 

## 5 Заключение

В работе наблюдался прямой и обратный осмос, было измерено осмотическое давление при разной концентрации раствора. Проверить закон Вант-Гоффа не удалось, измеренное осмотическое давление не совпадает с вычисленным. Сложно определить, является ли зависимость  $P_{осм}$  линейной, так как для этого нужно проводить измерения при большем числе концентраций.

На результат эксперимента могли повлиять следующие факторы:

- во время измерений было обнаружено падение давления в системе на  $\approx 3$  деления манометра. Течь устранить не удалось. Негерметичность системы могла повлиять на итоговые значения;
- ошибки в приготовлении и разбавлении раствора;
- полупроницаемые перегородки давно не менялись и со временем могли засориться, что приводит к уменьшению скорости протекания осмоса и понижению измеренного давления от вычисленного по формуле Вант-Гоффа, из-за этого точки при  $P = 0$  дел. на графиках 4, 5 и 6 отклоняются от прямой.