

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСМОТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Маслов Артём

Брицко Владимир

Б01-104

18.05.2022

Цель работы:

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

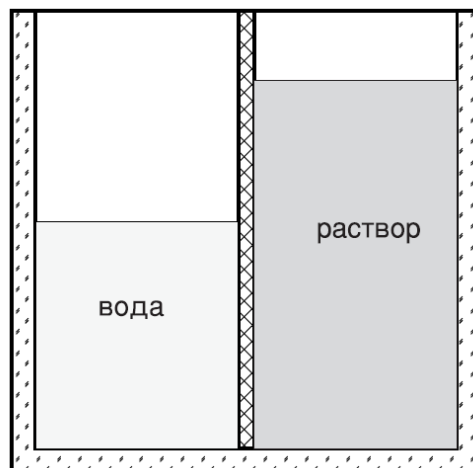
Оборудование:

Осмометр; секундомер; пипетка; мерный стаканчик; химический стакан.

Теория

Полупроницаемой перегородкой называется перегородка, которая пропускает молекулы растворителя, но не пропускает молекулы растворённых в ней соединений. Прохождение растворителя через полупроницаемую перегородку называется *осмосом*.

Рассмотрим сосуд, разделённый на две части полупроницаемой перегородкой. По одну сторону находится вода, по другую — водный раствор вещества, молекулы которого не могут проходить через перегородку. Наполним обе части сосуда до одинакового уровня. 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, а следовательно, и разность давлений, которая называется *осмотическим давлением*.



Опыт показывает, что осмотическое давление для весьма разбавленных растворов численно равно давлению, которое оказывало растворенное вещество, если бы оно при данной температуре находилось в состоянии идеального газа и занимало бы объём, равный объёму сосуда. Данное соотношение называется законом Вант-Гоффа:

$$P_{осм} = nkT$$

где n — концентрация растворенного вещества, k_B — постоянная Больцмана, T — температура.

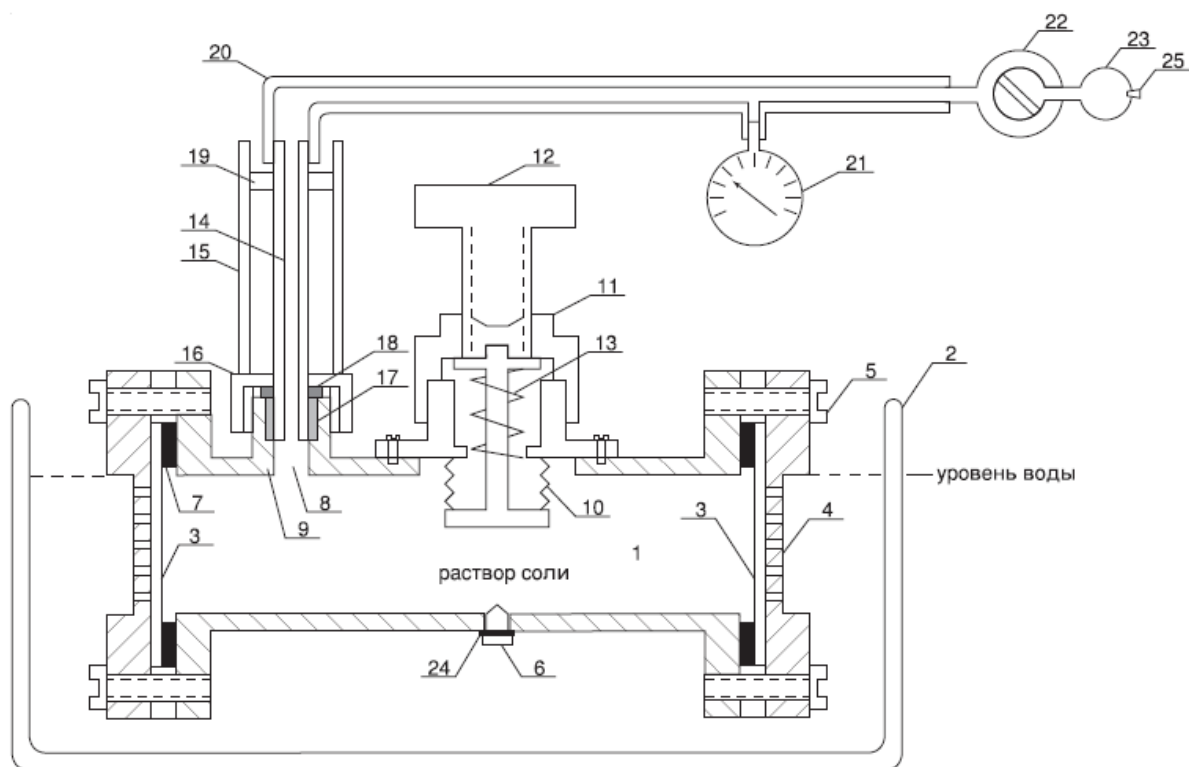
Методика измерения

Приборы, служащие для измерения осмотического давления, называются *осмометрами*. Прохождение растворителя через полупроницаемую перегородку происходит медленно, так что равновесие 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.

Для определения $P_{осм}$ измеряется изменение скорости v движения уровня раствора в капилляре в зависимости от давления P и строится график зависимости $v(P)$. Чем больше разность давлений $P - P_{осм}$, тем больше скорость v движения уровня в капилляре. При $P \approx P_{осм}$ эта скорость равна 0. Поэтому измерения следует проводить либо при $P \gg P_{осм}$, либо при $P \ll P_{осм}$. По графику определяется значение P , при котором $v = 0$, то есть осмотическое давление.

Схема экспериментальной установки

Схема используемого в работе осмометра приведена на рисунке:



- | | |
|--|---|
| 1. Контейнер для раствора соли. | 13. Пружина. |
| 2. Сосуд с дистиллированной водой. | 14. Стекланный капилляр. |
| 3. Целлофановая плёнка. | 15. Металлический кожух капилляра. |
| 4. Защитная сетка. | 16. Накладная гайка кожуха. |
| 5. Прижимной винт. | 17. Резиновая трубка, герметизирующая прокладку. |
| 6. Пробка-отверстие для заполнения сосуда раствором; | 18. Металлическая шайба. |
| 7. Резиновая прокладка. | 19. Подвижная резиновая втулка для крепления капилляра. |
| 8. Отверстие, через которое раствор поступает в капилляр. | 20. Резиновый шланг. |
| 9. Металлическая втулка, запрессованная в корпус контейнера. | 21. Манометр. |
| 10. Гофрированная поверхность. | 22. Стекланный кран. |
| 11. Накладная гайка для грубой регулировки объёма сосуда. | 23. Резиновая груша для создания повышенного внешнего давления. |
| 12. Винт тонкой регулировки объёма. | 24. Клапан. |

Раствор заливается в контейнер 1, который помещается в сосуд с растворителем 2. Контейнер представляет собой куб, закрытый с четырёх сторон полупроницаемыми целлофановыми мембранами 3 толщиной 0,2 мм. Мембраны зажимаются между стенками куба и металлическими сетками 4, которые предохраняют мембраны от раздувания наружу. Между мембранами и стенками вставлены резиновые уплотнения 7. Сосуд заполняется раствором через отверстие в дне куба, плотно закрываемое металлической гайкой 6 с резиновой прокладкой 21. 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. Избыточное давление создаётся с помощью груши 23 со встроенным клапаном 25 и фиксируется краном 22. Давление измеряется манометром 21. Кран 22 также позволяет сбросить избыточное давление.

На крышке куба смонтировано устройство, состоящее из гофра 10, накидной гайки 11, винта 12 и пружины 13, позволяющие 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 на удобной для наблюдения высоте.

Описание эксперимента

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:



Ионы K^+ свободно проникают через используемую в работе перегородку и не создают осмотическое давление.

В работе для каждой концентрации раствора сначала проводились измерения при давлениях $P \ll P_{осм}$, при этом наблюдается повышение уровня жидкости в капилляре. Прямой осмос удалось наблюдать только при давлении $P = 0$ делений для концентраций 0,3% и 0,15%. При концентрации 0,075% прямой осмос наблюдать не удалось.

После этого измерения проводились при давлениях $P \gg P_{осм}$. Начальное давление устанавливалось $P = 200$ делений, затем оно понижалось до тех пор, пока давление достаточно больше осмотического, чтобы время эксперимента не было слишком большим.

Предел измерений манометра, используемого в работе, $400 \text{ дел} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 98066 \text{ Па}$. Цена деления $1 \text{ дел} = 245 \text{ Па}$. Инструментальная погрешность измерения $\sigma_P = 1 \text{ дел}$.

В процессе измерения уровня жидкости в капилляре от времени давление в системе понижалось на ≈ 7 делений. Устранить течь не удалось, поэтому примем систематическую ошибку измерения давления равной $\sigma_P = 7$ дел.

Погрешность измерения времени $\sigma_t = 1 \text{ с}$. Погрешность измерения уровня жидкости $\sigma_h = 0,5 \text{ мм}$. Измерения проводились при $25^\circ\text{C} = 298\text{K}$.

Приведём таблицы измеренных значений скорости движения уровня жидкости в капилляре от времени.

Концентрация $n = 0,3\%$

P , дел	0
t_{abc} , с	h , мм
0,0	100,0
85,0	105,0
205,0	110,0
335,0	115,0
506,0	120,0

P , дел	200
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
7,0	195,0
14,0	190,0
21,0	185,0
28,0	180,0
35,0	175,0

P , дел	180
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
10,0	195,0
20,0	190,0
31,0	185,0
42,0	180,0
53,0	175,0

P , дел	160
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
12,0	195,0
24,0	190,0
37,0	185,0
50,0	180,0
63,0	175,0

P , дел	140
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
17,0	195,0
29,0	190,0
47,0	185,0
62,0	180,0
78,0	175,0

P , дел	120
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
18,0	195,0
34,0	190,0
53,0	185,0
76,0	180,0
94,0	175,0

P , дел	100
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
27,0	195,0
47,0	190,0
75,0	185,0
101,0	180,0
126,0	175,0

P , дел	80
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
38,0	195,0
67,0	190,0
106,0	185,0
140,0	180,0
179,0	175,0

Концентрация $n = 0,15\%$

P , дел	0
t_{abc} , с	h , мм
0,0	101,0
104,0	105,0
270,0	110,0
525,0	115,0

P , дел	200
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
7,0	195,0
14,0	190,0
21,0	185,0
28,0	180,0
36,0	175,0

P , дел	178
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
8,0	195,0
17,0	190,0
26,0	185,0
34,0	180,0
42,0	175,0

P , дел	160
t_{abc} , с	h , мм
0,0	200,0
9,0	195,0
20,0	190,0
29,0	185,0
39,0	180,0
49,0	175,0

P , дел	140	P , дел	120	P , дел	70
$t_{абс}$, с	h , мм	$t_{абс}$, с	h , мм	$t_{абс}$, с	h , мм
0,0	200,0	0,0	200,0	0,0	200,0
15,0	195,0	19,0	195,0	33,0	195,0
30,0	190,0	37,0	190,0	72,0	190,0
46,0	185,0	55,0	185,0	104,0	185,0
60,0	180,0	73,0	180,0	149,0	180,0
75,0	175,0	91,0	175,0	186,0	175,0

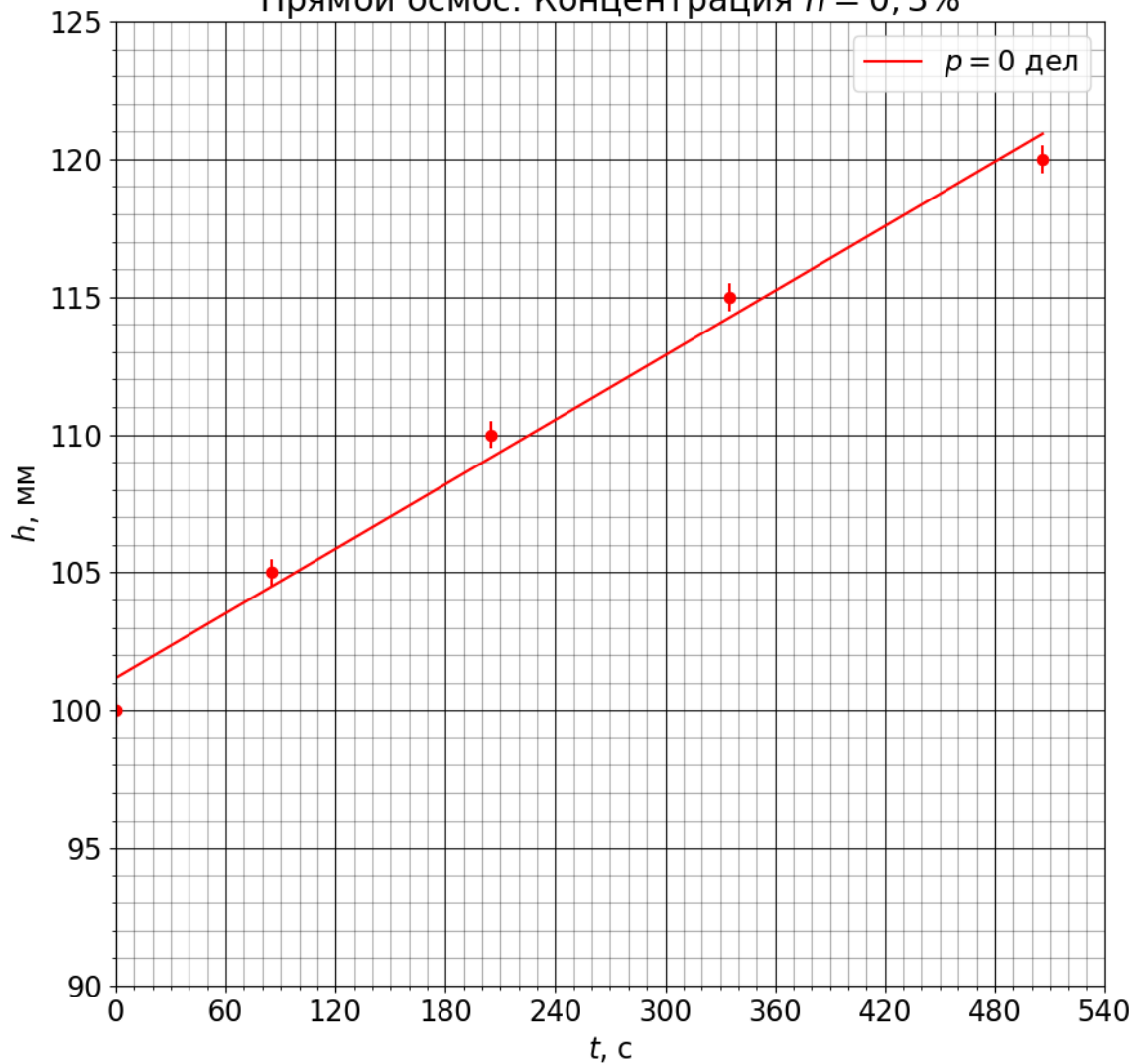
Концентрация $n = 0,075\%$

P , дел	200	P , дел	160	P , дел	100	P , дел	60
$t_{абс}$, с	h , мм	$t_{абс}$, с	h , мм	$t_{абс}$, с	h , мм	$t_{абс}$, с	h , мм
0,0	200,0	0,0	200,0	0,0	200,0	0,0	200,0
8,0	195,0	17,0	195,0	33,0	195,0	65,0	195,0
16,0	190,0	32,0	190,0	61,0	190,0	130,0	190,0
23,0	185,0	50,0	185,0	99,0	185,0		
32,0	180,0	69,0	180,0	124,0	180,0		
39,0	175,0	86,0	175,0				

По измеренным данным построим графики зависимости $h(t)$.
По углу наклона прямой определим скорость движения уровня
жидкости в капилляре.

График зависимости уровня в капилляре от времени $h(t)$.

Прямой осмос. Концентрация $n = 0,3\%$

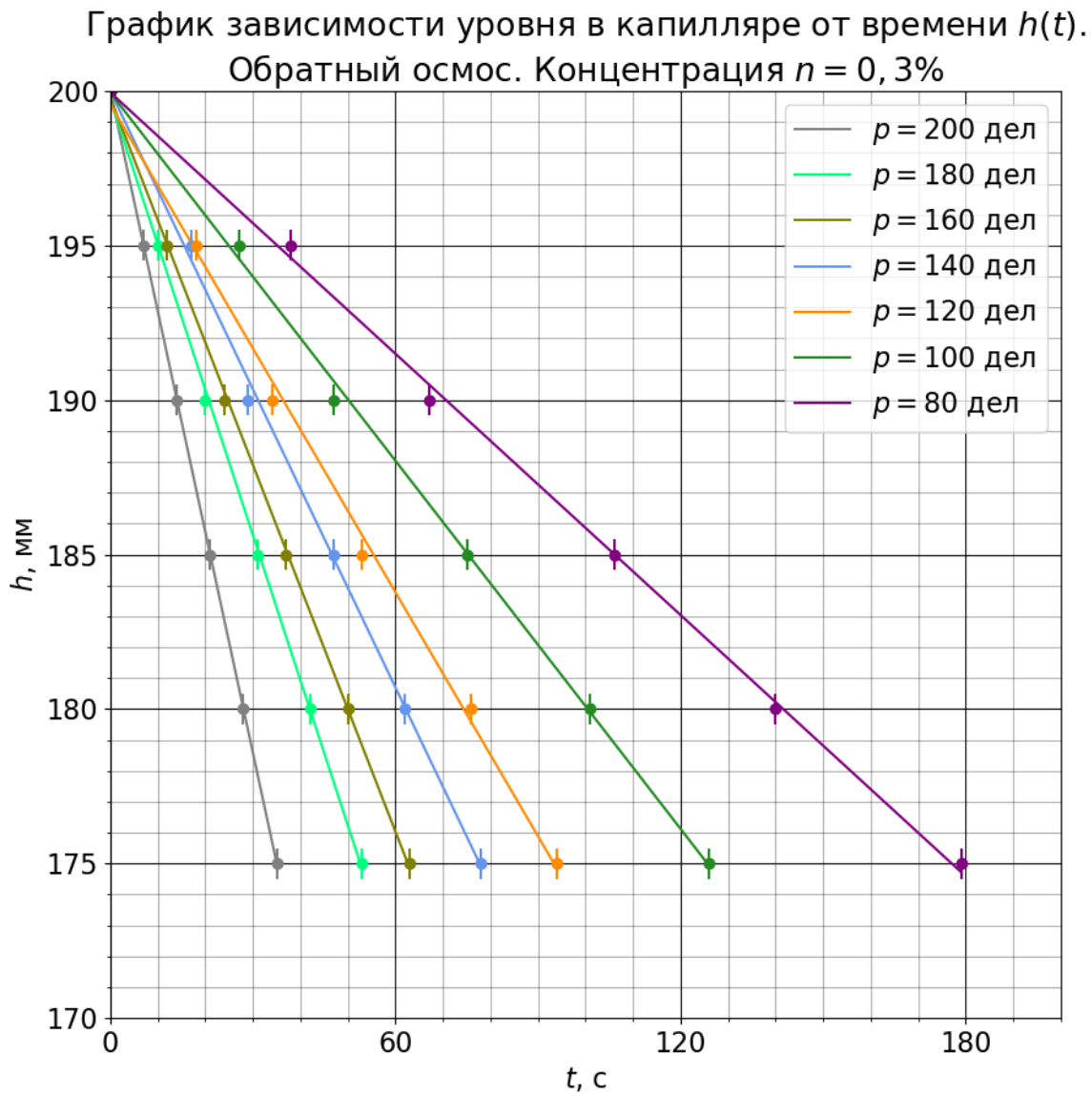


С помощью метода наименьших квадратов проведём наилучшую прямую $h = vt + h_0$.

$P = 0$ дел.

$$v = 0,039 \pm 0,003 \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

$$h_0 = 101,2 \pm 0,8 \text{ мм}.$$

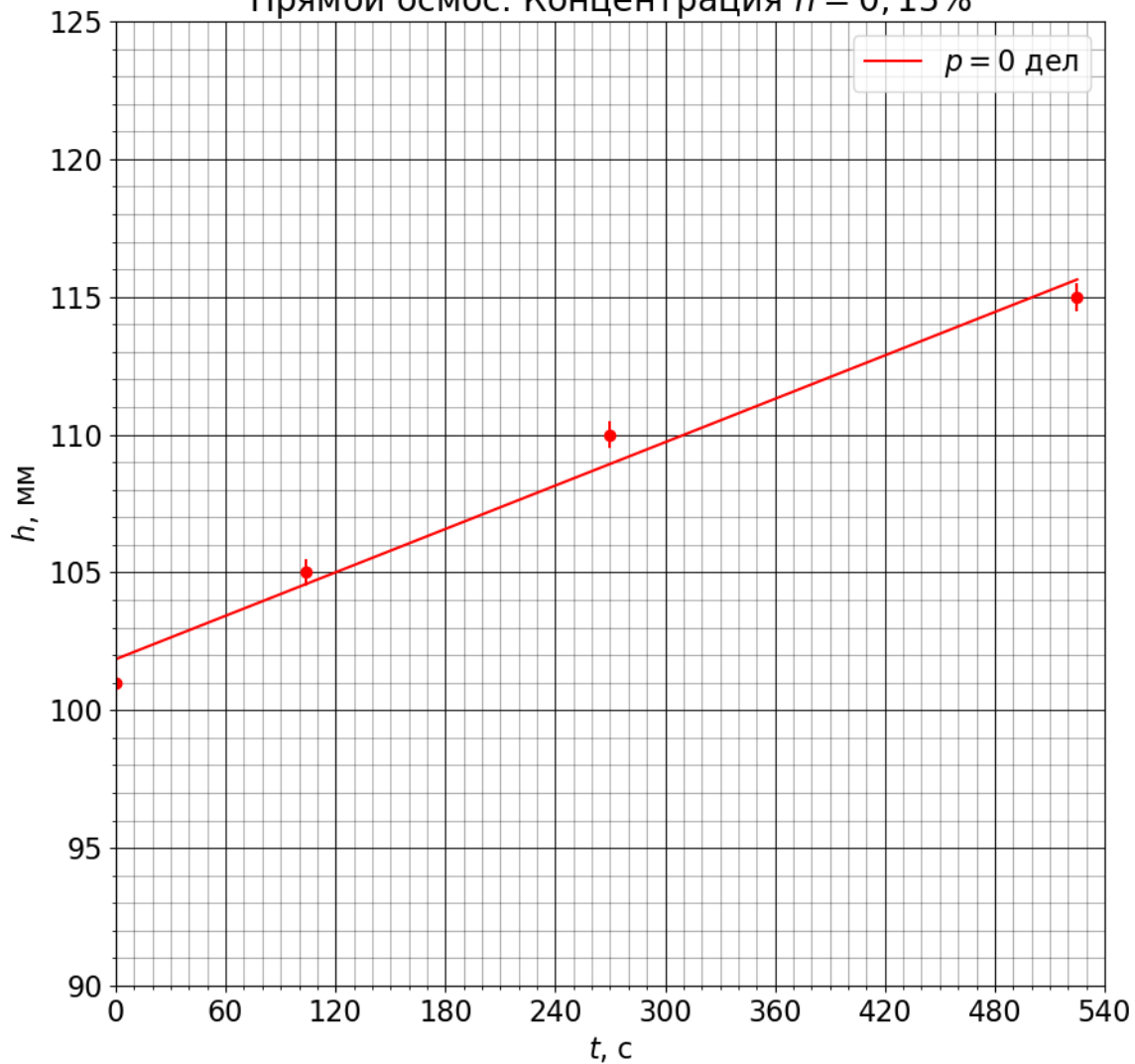


С помощью метода наименьших квадратов проведём наилучшую прямую $h = vt + h_0$.

$P, \text{ дел}$	200	180	160	140	120	100	80
$v, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	-0,71	-0,47	-0,40	-0,32	-0,26	-0,20	-0,14
$\sigma_v, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$h_0, \text{ мм}$	200,0	199,7	199,8	200,0	199,6	199,9	200,0
$\sigma_{h_0}, \text{ мм}$	0,1	0,2	0,1	0,3	0,4	0,3	0,3

График зависимости уровня в капилляре от времени $h(t)$.

Прямой осмос. Концентрация $n = 0,15\%$

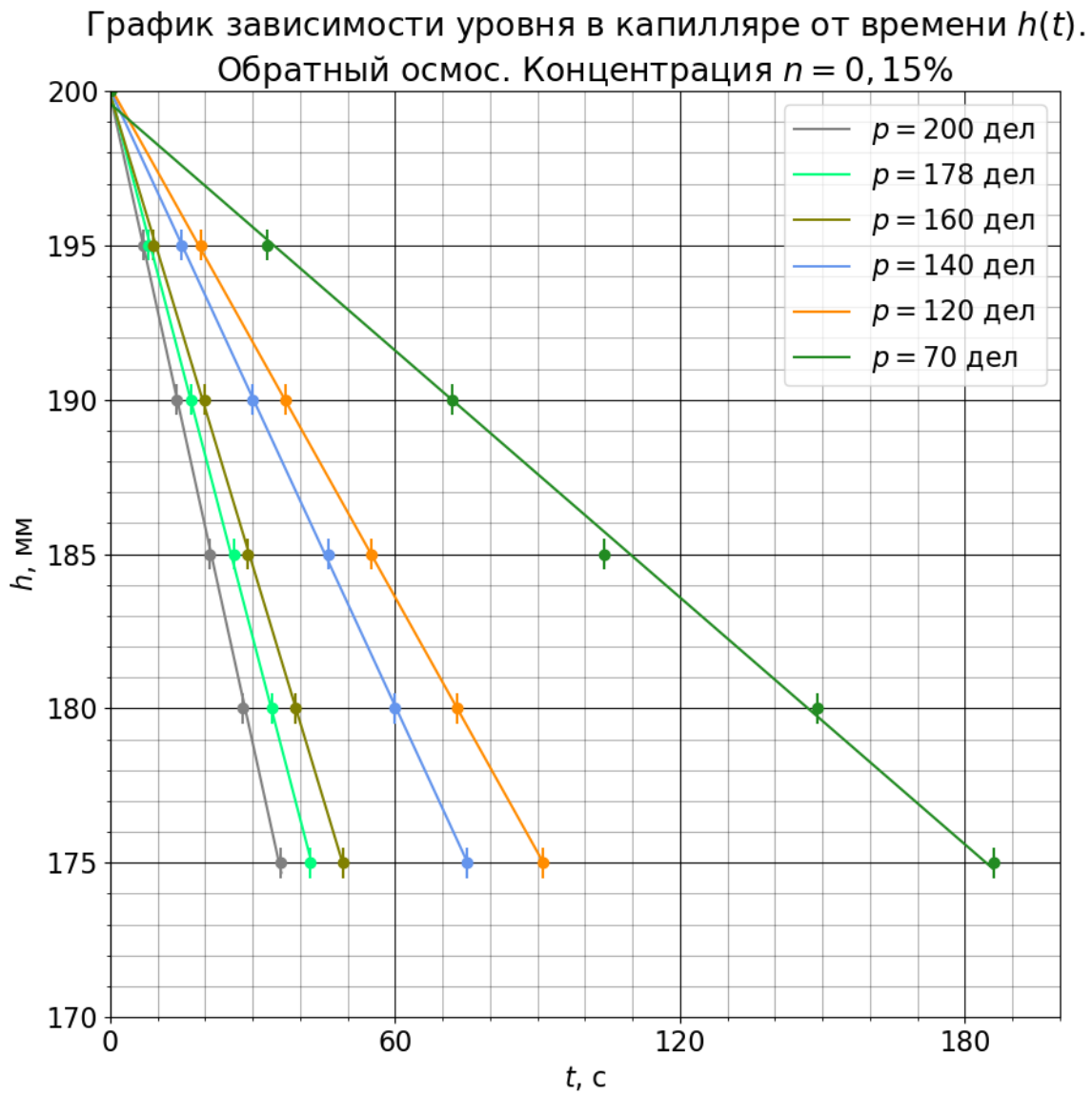


С помощью метода наименьших квадратов проведём наилучшую прямую $h = vt + h_0$.

$P = 0$ дел.

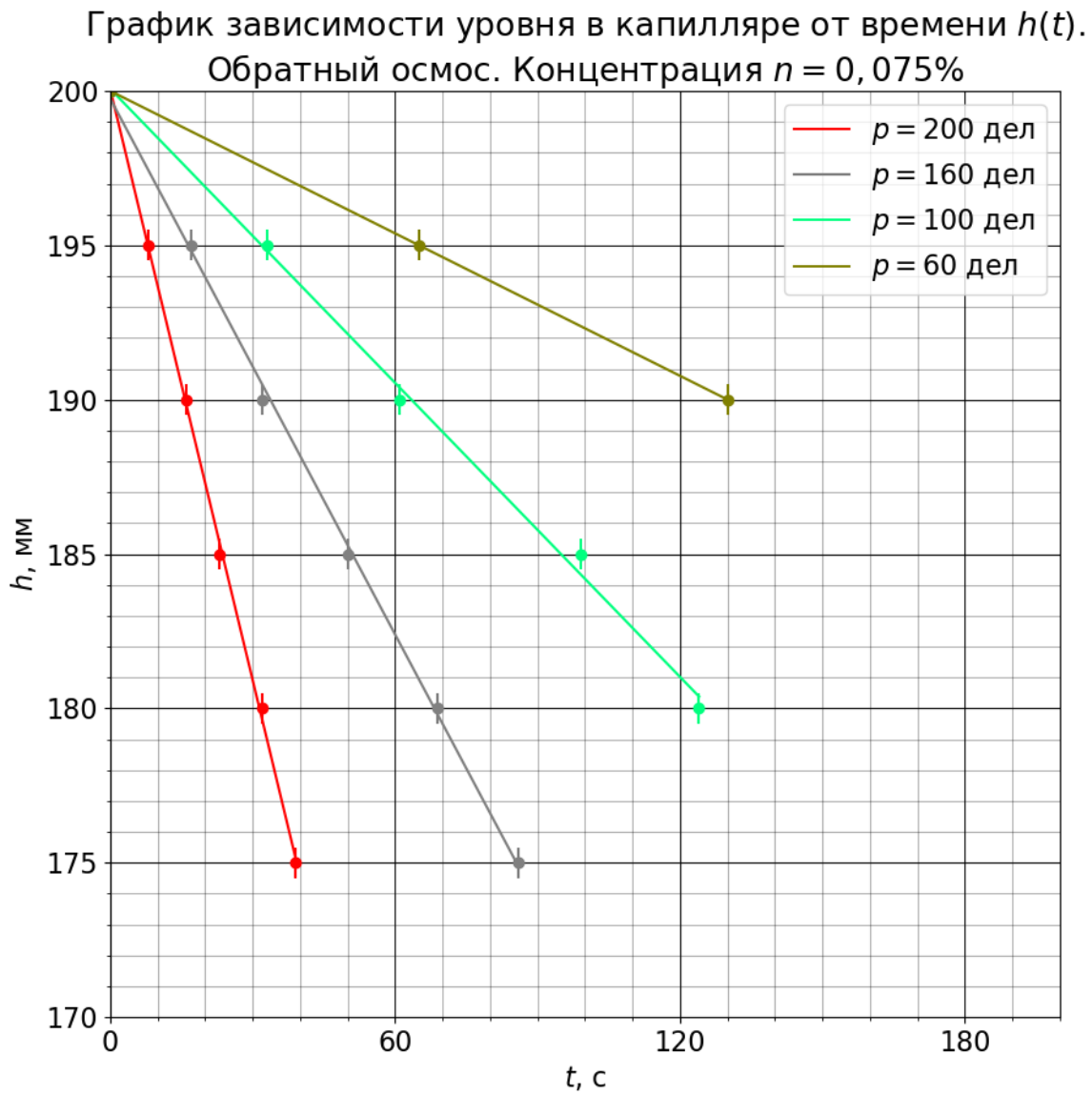
$$v = 0,026 \pm 0,003 \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

$$h_0 = 101,9 \pm 0,8 \text{ мм}.$$



С помощью метода наименьших квадратов проведём наилучшую прямую $h = vt + h_0$.

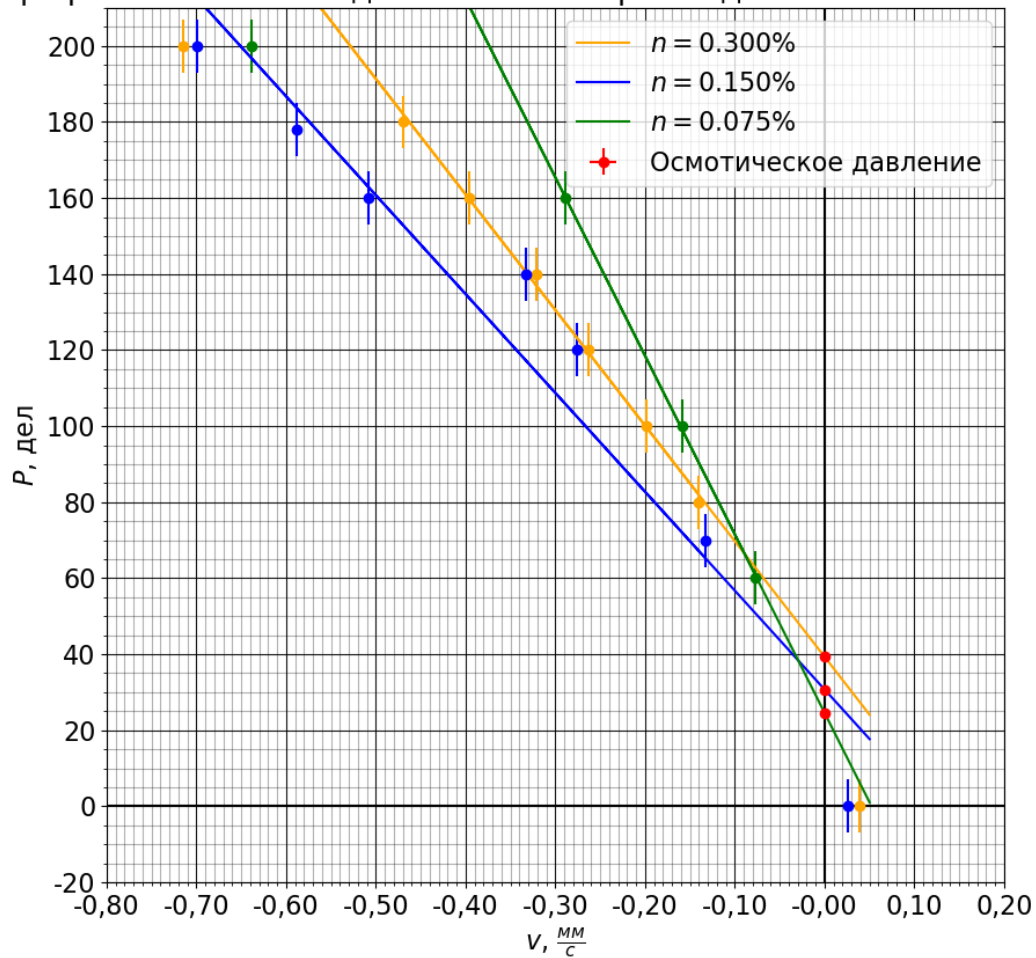
P , дел	200	178	160	140	120	70
v , $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$	-0,70	-0,59	-0,51	-0,33	-0,28	-0,13
σ_v , $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
h_0 , мм	199,9	200,0	199,9	200,0	200,1	199,6
σ_{h_0} , мм	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3



С помощью метода наименьших квадратов проведём наилучшую прямую $h = vt + h_0$.

P , дел	200	160	100	60
v , $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$	-0,64	-0,29	-0,16	-0,08
σ_v , $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$	0,01	0,01	0,01	0,01
h_0 , мм	200,1	199,8	200,1	200,0
σ_{h_0} , мм	0,2	0,2	0,4	0,1

График зависимости давления от скорости движения мениска $P(v)$.

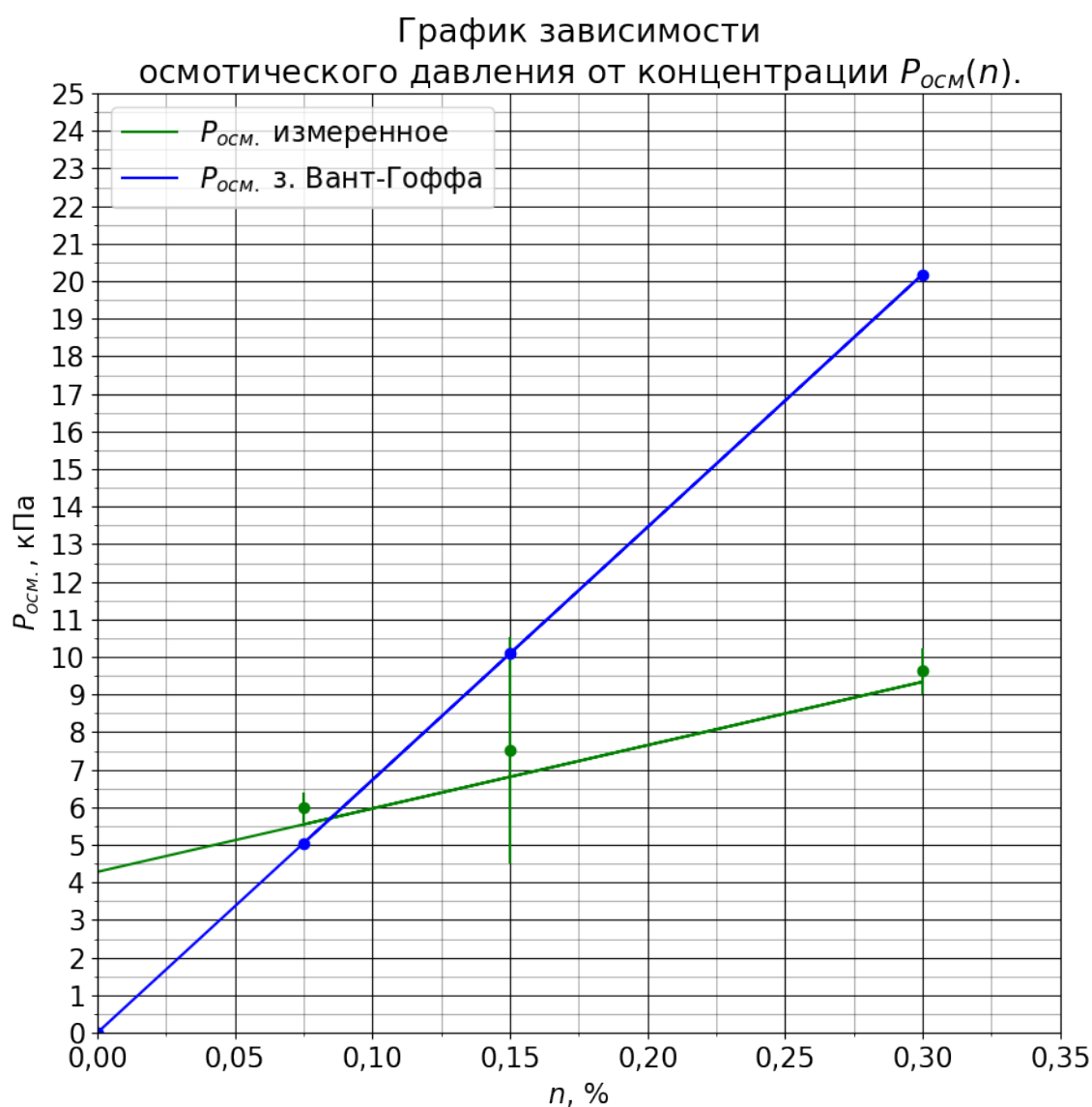


Построим график зависимости давления от скорости, а не скорости от давления, потому что погрешность определения скорости мала, а давление в системе значительно изменялось из-за наличия течи. Тогда можно применить метод наименьших квадратов для проведения прямой $P = av + P_{осм}$.

$n, \%$	$a, \frac{\text{дел} \cdot \text{с}}{\text{мм}}$	$\sigma_a, \frac{\text{дел} \cdot \text{с}}{\text{мм}}$	$P_{осм}, \text{дел}$	$\sigma_{P_{осм}}, \text{дел}$
0,300	-304	8	39,3	2,5
0,150	-260	29	30,7	12,3
0,075	-470	8	24,5	1,6

По графику видно, что при давлении $P = 200$ делений, экспериментальные точки сильно отклоняются от прямой. Это может быть связано с тем, что при таком давлении существенно влияние течи, которое оказывает сильное воздействие на скорость движения уровня жидкости в капилляре.

Также из общей зависимости отклоняются точки при $P = 0$ делений. Это возможно из-за того, что полупроницаемые перегородки на установке менялись давно, и осмос протекает медленнее.



С помощью метода наименьших квадратов по измеренным точкам проведём наилучшую прямую $P = an + b$.

Коэффициенты МНК.

$a, 10^3 \frac{\text{Па}}{\%}$	$\sigma_a, 10^3 \frac{\text{Па}}{\%}$	$b, 10^3 \text{ Па}$	$\sigma_b, 10^3 \text{ Па}$
16,8	5,2	4,3	1,0

Построим график зависимости осмотического давления от концентрации по закону Вант-Гоффа:

$$P_{осм} = nkT = \frac{N_{соли} \cdot kT}{V_{воды}} = \frac{N_{соли} \cdot kT \cdot \rho_{воды}}{M_{воды}} = \frac{N_A \nu_{соли} \cdot kT \cdot \rho_{воды}}{M_{воды}}$$

$$P_{осм} = \frac{RT \cdot m_{соли} \cdot \rho_{воды}}{M_{воды} \cdot \mu_{соли}} = \frac{RT \cdot \rho_{воды} \cdot n[\%]}{\mu_{соли} \cdot 100\%}$$

Вывод

В работе наблюдался прямой и обратный осмос, было измерено осмотическое давление при разной концентрации раствора.

$n, \%$	$P_{осм}, \text{Па}$	$P_{выч}, \text{Па}$
0,300	$9,6 \pm 0,6$	20,2
0,150	$7,5 \pm 3,0$	10,1
0,075	$6,0 \pm 0,4$	5,0

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:

1. Во время измерений было обнаружено падение давления в системе на ≈ 7 делений манометра. Течь устранить не удалось. Не герметичность системы могла повлиять на итоговые значения.
2. Полупроницаемые перегородки давно не менялись и со временем могли засориться, что приводит к понижению измеренного давления от вычисленного по формуле Вант-Гоффа.