

ORIGIN := 1 i := 1..15

Величины, необходимые для расчета

$$V_0 := 0.114 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \quad V_{\delta\alpha} := 0.558 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad E := 1.95 \cdot 10^{11} \text{ Па} \quad q := 1.009$$
$$a := 3 \quad \mu := 0.3 \quad \alpha := 1.66 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$$

$$\beta := \frac{1}{E \cdot (a^2 - 1)} \cdot [3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot a + 2 \cdot (1 + \mu) \cdot a^2]$$
$$\beta = 1.731 \times 10^{-11} \text{ 1/Па}$$

Абсолютное давление в пьезометре рассчитывается по формуле $P_a = P_{mn} + P_{\delta ap}$

где P_{mn} избыточное давление, измеренное манометром МИДА, МПа

$P_{\delta ap}$ барометрическое давление, измеряемое барометром, мм рт. ст.

$U_0 := 0.9967 \text{ В}$

СПРАВКА: $1 \text{ кгс/см}^2 = 0.0980665 \text{ МПа}$

Протокол

Напряжение,
термометр
сопротивления

Напряжение,
катушка

Напряжение,
манометр МИДА

Массив времени

$U_t :=$	11.91854	10.000	3.1732	0	
	11.92394	10.000	3.2173	1	
	11.92644	10.000	3.2581	2	
	11.92694	10.000	3.3019	3	
	11.92799	10.000	3.3260	4	
	11.92794	10.000	3.3569	5	
	11.92794	10.000	3.3812	6	
	11.92744 (B)	10.000 (B)	3.3925 (B)	$\tau := 7$	(мин)
	11.92791	10.000	3.4037	8	
	11.92862	10.000	3.4146	9	
	11.92963	10.000	3.4227	10	
	11.92963	10.000	3.4285	11	
	11.92974	10.000	3.4327	12	
	11.93093	10.000	3.4357	13	
	11.93132	10.000	3.4370	14	

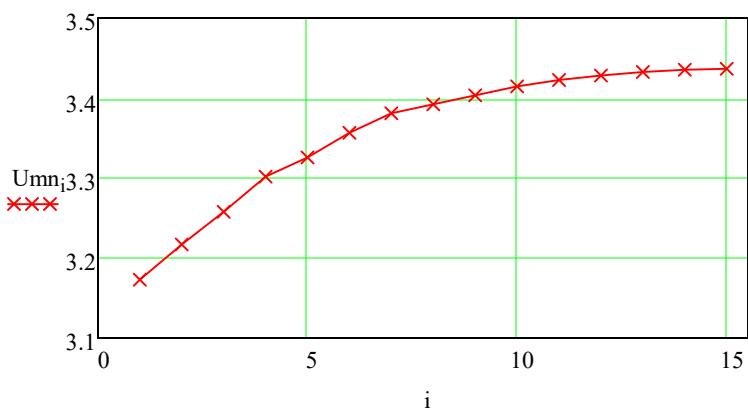
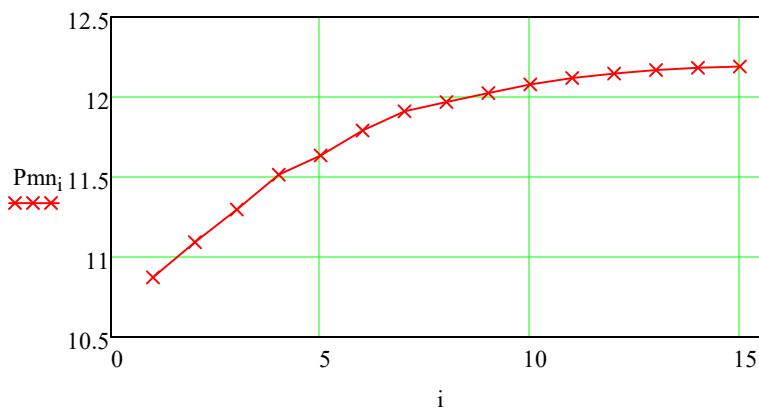
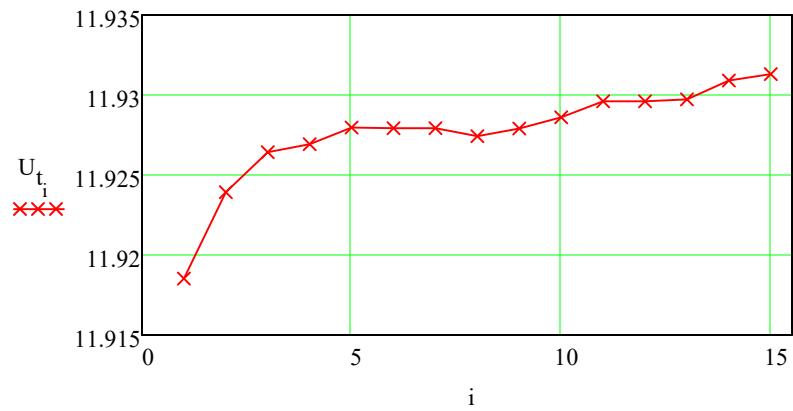
Обработка результатов измерений:

избыточное давление (МПа), измеренное манометром

МИДА

$$P_{mn} := \frac{(U_{mn} - U_0) \cdot 20}{(5 - U_0)} \text{ МПа}$$

	1
1	10.874
2	11.094
3	11.298
4	11.516
5	11.637
6	11.791
7	11.913
8	11.969
9	12.025
10	12.08
11	12.12
12	12.149
13	12.17
14	12.185
15	12.191



Средство измерения температуры:
терморезистор (платиновый термометр сопротивления)

1) Нахождение сопротивления термометра R_t , Ом

Задание встроенной переменной, определяющей номер первого элемента массива

Сопротивление образцовой катушки, Ом $Rk := 10.0$

$$Rt := \frac{U_t \cdot R_k}{U_k}$$

2) Вычисление платиновой температуры t_i
(вспомогательный параметр градуировочной зависимости терморезистора)

Задача: решить квадратное уравнение относительно t_i

$$\text{const} - \alpha := 3.9260 \cdot 10^{-3} \quad \beta t := 0.110 \quad \delta := 1.492 \quad R_0 := 10.0553$$

$$\text{parametr} - W := \frac{Rt}{R_0}$$

Решение квадратного уравнения осуществляется с помощью стандартной встроенной функции Mathcad root(F(x),x):

Задаем начальное приближение по температуре, °C $tt := 50$

Уравнение для платиновой температуры $T = 0 \dots 630$ °C

$$t_i := \text{root} \left[\frac{1}{\alpha} \cdot (W_i - 1) + \delta \cdot \frac{tt}{100} \cdot \left(\frac{tt}{100} - 1 \right) - tt, tt \right]$$

$$T_i := t_i + 0.015 \cdot \left[\frac{t_i}{100} \cdot \left(\frac{t_i}{100} - 1 \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{t_i}{419.58} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t_i}{630.74} - 1 \right) \right]$$

$t =$	46.826	46.823
	46.963	46.96
	47.026	47.023
	47.039	47.036
	47.066	47.063
	47.064	47.061
	47.064	47.061
$t =$	47.052	47.049
	47.064	47.061
	47.082	47.079
	47.107	47.104
	47.107	47.104
	47.11	47.107
	47.14	47.137
	47.15	47.147

Масса пустой колбы (5 взвешиваний для исключения случайной погрешности) -

$$M_{k1} := 67.5979 \text{ г}$$

$$M_{k2} := 67.5976 \text{ г}$$

$$M_{k3} := 67.5975 \text{ г}$$

$$M_{k4} := 67.5966 \text{ г}$$

$$M_{k5} := 67.5970 \text{ г}$$

Масса колбы с водой (5 взвешиваний для исключения случайной погрешности)

$$M_{kp1} := 180.3925 \text{ г}$$

$$M_{kp2} := 180.3915 \text{ г}$$

$$M_{kp3} := 180.3916 \text{ г}$$

$$M_{kp4} := 180.3910 \text{ г}$$

$$M_{kp5} := 180.3904 \text{ г}$$

$$M_k := \frac{(M_{k1} + M_{k2} + M_{k3} + M_{k4} + M_{k5})}{5} = 67.5973 \text{ г}$$

$$M_{kp} := \frac{(M_{kp1} + M_{kp2} + M_{kp3} + M_{kp4} + M_{kp5})}{5} = 180.3914 \text{ г}$$

Результирующая масса выпуска

$$M_p := M_{kp} - M_k = 112.7941 \text{ г}$$

Образцовое сопротивление

$$R_{10} := 10 \text{ Ом} \quad \delta R_{10} := 0.0001$$

Условия опыта

$$P_{\delta ap} := 747 \text{ мм.рт.ст} \quad P_o := P_{\delta ap} \cdot 133.332 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}$$

$$T_o := 24 + 273.15 \text{ К}$$

Средние значения экспериментальных данных

Границные номера точек

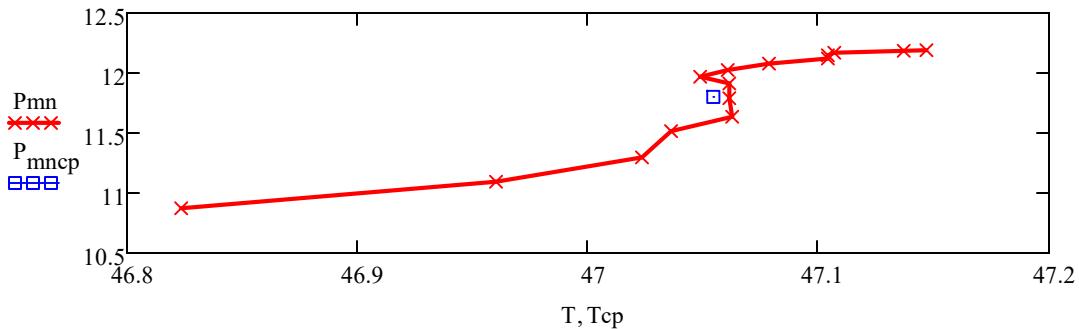
$$n0 := 1 \quad n1 := 15$$

$$T_{cp} := \frac{1}{n1 - n0 + 1} \cdot \sum_{i=n0}^{n1} T_i$$

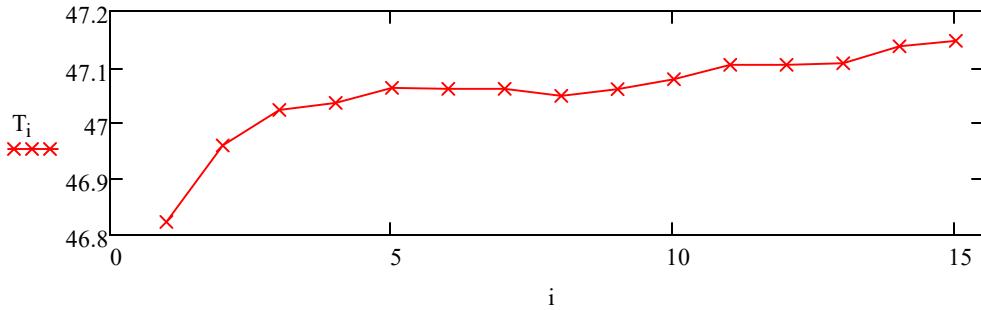
$$P_{mncp} := \sum_{i=n0}^{n1} P_{mn} \cdot \frac{1}{n1 - n0 + 1}$$

$$T_{cp} = 47.0543 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{mncp} = 11.800764 \text{ МПа}$$



$$i := 1..15$$



Абсолютное давление в пьезометре

$$P_a := P_{mncp} + P_o = 11.9 \text{ МПа}$$

$$P_o = 0.1 \text{ МПа}$$

Из таблицы для плотности воды для давления Po=746 мм. рт. ст.

$$746 \cdot \frac{133.332}{98.0665} \cdot 10^{-3} = 1.014 \text{ кгс/см}^2$$

для давления 1 кгс/см² в интервале температур 20-30 С проводим линейную интерполяцию

$$T_o = 297.15 \quad \rho_{20C1} := \frac{1}{0.0010018} \quad \rho_{30C1} := \frac{1}{0.0010044}$$

$$\rho_o := \left[\rho_{20C1} - (T_o - 20 - 273.15) \cdot \frac{\rho_{20C1} - \rho_{30C1}}{30 - 20} \right] \quad \rho_o = 997.2 \quad \text{кг/м}^3$$

Из таблицы для плотности воздуха для давления $P_o=746$ мм. рт. ст.

$$746 \cdot 133.332 = 9.9466 \times 10^4 \quad \text{Па}$$

для давления 99 кПа и 24 оС

$$\rho_{bozd} := 1.161 \quad \text{кг/м}^3$$

Рассчитаем плотность воды при комнатной температуре и давлении в пьезометре $P=P_{minCP}$ $T=24$ С

$$Pa = 11.9 \quad \frac{Pa}{0.0980665} = 121.35 \quad \text{кгс/см}^2$$

Проводим линейную интерполяцию плотности воды при $Pa=69.486$ кгс/см²

$$T_o = 297.15 \quad \rho_{20C2} := \frac{1}{0.0009998} \quad \rho_{30C2} := \frac{1}{0.001024}$$

$$\rho := \rho_{20C2} + (T_o - 20 - 273.15) \cdot \frac{\rho_{20C2} - \rho_{30C2}}{30 - 20} \quad \rho = 1009.7 \quad \text{кг/м}^3$$

Масса выпуска с учетом поправки, связанной со взвешиванием в воздухе, определяется

Плотность материала гирь

$$\rho_g := 7800 \quad \text{кг/м}^3$$

$$M_b := M_p \cdot \frac{\rho_g}{1 - \frac{\rho_{bozd}}{\rho_g}} = 112.9088 \text{ г} \quad M_p = 112.794$$

$$\rho_o = 997.17$$

$$\text{Изменение массы воды в балластном объеме} \quad V_o = 1.14 \times 10^{-4}$$

$$\Delta M_{\delta o} := (\rho - \rho_o) \cdot V_{\delta o} = 6.967 \times 10^{-5} \text{ кг}$$

Поправка на барическую деформацию

$$\Delta V_P := \beta \cdot (P \cdot 10^6 - 1) \cdot V_o = 2.348 \times 10^{-8} \quad \text{м}^3$$

Поправка на термическую деформацию

$$\Delta V_T := 3 \cdot \alpha_t \cdot (T_{cp} - 293.15 + 273.15) \cdot V_o = 1.536 \times 10^{-7} \quad \text{м}^3$$

Определяем массу вещества, оставшегося в пьезометре

$$M_{OCT} = \frac{V_o}{\rho_{para}} \quad \text{где} \quad \rho_{para} := 0.5779 \quad \text{- плотность водяного пара при } T=100 \text{ С и } P=746 \text{ мм. рт. ст. или } 1.014 \text{ кгс/см}^2$$

$$M_{OCT} := \frac{V_o}{\rho_{para}} = 1.973 \times 10^{-4} \text{ кг}$$

Определяем удельный объем воды

$$v(Pa, T_{cp}) := \frac{V_o + \Delta V_p + \Delta V_T}{M_b \cdot 10^{-3} - \Delta M_{\delta_0} + M_{OCT}} \quad v(Pa, T_{cp}) = 1.0100917 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$$

Определяем плотность воды

$$\frac{1}{v(Pa, T_{cp})} = 990.009 \text{ кг/м}^3$$

Расчет погрешности

1. Температура $n1 = 15$

Случайная погрешность $n0 = 1$

$$\Delta T_{slu} := 2.776 \cdot \sqrt{\sum_{n=n0}^{n1} (T_{cp} - T_n)^2} \cdot \frac{1}{(n1 - n0 + 1) \cdot (n1 - n0)} = 0.057 \text{ К}$$

Приборная погрешность определения температуры платиновым термометром сопротивления, которая равна 0.06 К

$$\Delta T_{plat} := 0.06 \text{ К}$$

$$\text{Полная абсолютная погрешность } \Delta T := \sqrt{\Delta T_{plat}^2 + \Delta T_{slu}^2} = 0.083 \text{ К}$$

$$\text{Полная относительная погрешность } \delta T := \frac{\Delta T}{T_{cp}} = 0.175\% \text{ K}$$

2. Давление.

Не будем учитывать погрешность в определении атмосферного давления, так как она мала по сравнению с погрешностью определения грузопоршневого манометра

$$\Delta P = \Delta P_{mn}$$

$$\text{Случайная погрешность } \Delta P_{slu} := 2.776 \cdot \sqrt{\sum_{n=n0}^{n1} (P_{mncp} - P_{mn_n})^2} \cdot \frac{1}{(n1 - n0 + 1) \cdot (n1 - n0)} = 0.306 \text{ МПа}$$

$$\text{Приборная погрешность } \Delta P_{pp} := P_{mncp} \cdot 0.001 = 0.012 \text{ МПа}$$

$$\text{Полная абсолютная погрешность } \Delta P := \sqrt{\Delta P_{pp}^2 + \Delta P_{slu}^2} = 0.306 \text{ МПа}$$

$$\text{Полная относительная погрешность } \delta P := \frac{\Delta P \cdot 100}{P_{mncp}} = 2.594 \% \text{ K}$$

Учтем погрешность прямого вычисления по формуле

$$v(P, T) = \frac{V_o + \Delta V_p + \Delta V_T}{M_B + M_{OCT} - \Delta M_{\delta_0}}$$

$$\delta V_o := 0.001 \% \quad \Delta V_o := V_o \cdot \delta V_o \cdot 0.01$$

$$\Delta V_T = 3 \cdot \alpha t \cdot (T - 273.15) \cdot V_o$$

$$\Delta V_P = \beta \cdot (P - 1) \cdot V_o$$

$$\Delta V_o = 1.14 \times 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$\Delta V_T = 1.536 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\Delta V_P = 2.348 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\Delta V_{\delta o} = 5.58 \times 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$\delta V_{\delta o} := 0.1 \% \quad \Delta V_{\delta o} := V_{\delta o} \cdot \delta V_{\delta o} \cdot 0.01$$

$$\delta \Delta V_P := \sqrt{\delta P^2 + \delta V_o^2} \quad \delta \Delta V_P = 2.59359$$

$$\delta \Delta V_T := \sqrt{\delta T^2 + \delta V_o^2} \quad \delta \Delta V_T = 2.01865 \times 10^{-3}$$

$$\Delta \Delta M_{\delta o} := \Delta V_{\delta o} \cdot (\rho - \rho_o) \quad \Delta \Delta M_{\delta o} = 6.967 \times 10^{-8}$$

$$\Delta \Delta V_T := \Delta V_T \cdot \delta \Delta V_T \quad \Delta \Delta V_T = 3.1 \times 10^{-10}$$

$$\Delta \Delta V_P := \Delta V_P \cdot \delta \Delta V_P \quad \Delta \Delta V_P = 6.09 \times 10^{-8}$$

Рассчитаем погрешность определения массы выпуска -

$$M_{\text{kk}} := \sqrt[5]{M_{k1} \cdot M_{k2} \cdot M_{k3} \cdot M_{k4} \cdot M_{k5}} = 67.5973 \text{ г}$$

$$M_{\text{kp}} := \sqrt[5]{M_{kp1} \cdot M_{kp2} \cdot M_{kp3} \cdot M_{kp4} \cdot M_{kp5}} = 180.3914 \text{ г}$$

$$\text{Результирующая масса выпуска} \quad M_{\text{kp}} := M_{kp} - M_k = 112.7941 \text{ г}$$

$$\Delta M_k := 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ г} \quad \delta M_{k1} := \frac{\Delta M_k}{M_{k1}} \quad \Delta M_{kp} := 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ г} \quad \delta M_{kp1} := \frac{\Delta M_{kp}}{M_{kp1}}$$

$$\delta M_{k2} := \frac{\Delta M_k}{M_{k2}} \quad \delta M_{kp2} := \frac{\Delta M_{kp}}{M_{kp2}}$$

$$\delta M_{k3} := \frac{\Delta M_k}{M_{k3}} \quad \delta M_{kp3} := \frac{\Delta M_{kp}}{M_{kp3}}$$

$$\delta M_{k4} := \frac{\Delta M_k}{M_{k4}} \quad \delta M_{kp4} := \frac{\Delta M_{kp}}{M_{kp4}}$$

$$\delta M_{k5} := \frac{\Delta M_k}{M_{k5}} \quad \delta M_{kp5} := \frac{\Delta M_{kp}}{M_{kp5}}$$

$$\delta M_k := \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\delta M_{k1}^2 + \delta M_{k2}^2 + \delta M_{k3}^2 + \delta M_{k4}^2 + \delta M_{k5}^2} = 1.654 \times 10^{-6}$$

$$\delta M_{kp} := \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\delta M_{kp1}^2 + \delta M_{kp2}^2 + \delta M_{kp3}^2 + \delta M_{kp4}^2 + \delta M_{kp5}^2} = 6.198 \times 10^{-7}$$

$$\Delta M_{\text{kk}} := M_k \cdot \delta M_k = 1.118 \times 10^{-4} \text{ г}$$

$$\Delta M_{\text{kp}} := M_{kp} \cdot \delta M_{kp} = 1.118 \times 10^{-4} \text{ г}$$

$$\Delta M_p := \Delta M_{kp} + \Delta M_k = 2.236 \times 10^{-4} \text{ г}$$

$$\Delta M_b := \Delta M_p \cdot \frac{1 - \frac{\rho_{bozd}}{\rho_o}}{1 - \frac{\rho}{\rho_o}} = 0.0002 \quad \text{г}$$

Погрешность определения массы остатка

В итоге

$$\Delta_1 := \sqrt{\Delta V_o^2 + \Delta \Delta V_T^2 + \Delta \Delta V_P^2}$$

$$\Delta M_{OCT} := \frac{\Delta V_o}{\rho_{para}} = 1.973 \times 10^{-9} \quad \text{кг}$$

$$\delta_1 := \frac{\Delta_1}{V_o + \Delta V_P + \Delta V_T} = 5.335 \times 10^{-4}$$

$$\Delta_2 := \sqrt{\Delta M_b^2 + \Delta \Delta M_{\delta o}^2 + \Delta M_{OCT}^2}$$

$$\delta_2 := \frac{\Delta_2}{M_b \cdot 10^{-3} - \Delta M_{\delta o} + M_{OCT}} = 1.978 \times 10^{-3}$$

$$\delta v_{pr} := \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = 2.049 \times 10^{-3}$$

$$\Delta \rho_{pr} := \delta v_{pr} \cdot \frac{1}{v(Pa, T_{cp})} = 2.028 \quad \text{кг/м}^3$$

$$\Delta v_{pr} := \delta v_{pr} \cdot v(Pa, T_{cp}) = 2.07 \times 10^{-6} \quad \text{м}^3/\text{кг}$$

Общая погрешность вычисления удельного объема.

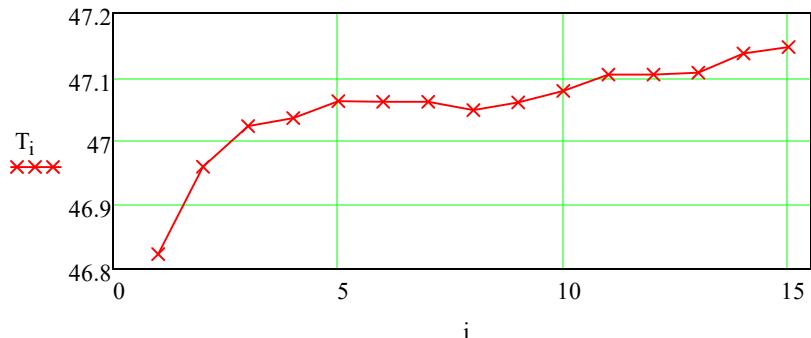
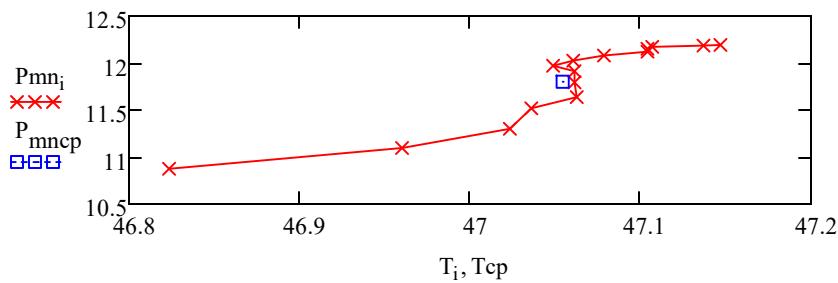
$$\Delta v := \sqrt{\Delta v_{pr}^2} = 2.07 \times 10^{-6} \quad \text{м}^3/\text{кг}$$

$$\delta v := \frac{\Delta v}{v(Pa, T_{cp})} = 0.205\%$$

График зависимости $P(T)$ (апроксимация мнк)

$P_{mn} =$	$\begin{pmatrix} 10.87353 \\ 11.09385 \\ 11.29768 \\ 11.5165 \\ 11.6369 \\ 11.79127 \\ 11.91267 \\ 11.96913 \\ 12.02508 \\ 12.07953 \\ 12.12 \\ 12.14898 \\ 12.16996 \\ 12.18495 \\ 12.19144 \end{pmatrix}$	$T =$	$\begin{pmatrix} 46.823417 \\ 46.96008 \\ 47.023351 \\ 47.036006 \\ 47.06258 \\ 47.061315 \\ 47.061315 \\ 47.04866 \\ 47.060555 \\ 47.078525 \\ 47.104087 \\ 47.104087 \\ 47.106871 \\ 47.13699 \\ 47.146861 \end{pmatrix}$
------------	---	-------	---

$$i := 1..15$$



$n2 := 1 \quad n3 := 15$

$$F(x) := \begin{pmatrix} 1 \\ x \end{pmatrix} \quad S := \text{linfit}(T, Pmn, F) \quad f(x) := F(x) \cdot S$$

$$S = \begin{pmatrix} -218.873 \\ 4.902 \end{pmatrix} \quad Pmnras(x) := S_1 + S_2 \cdot x$$

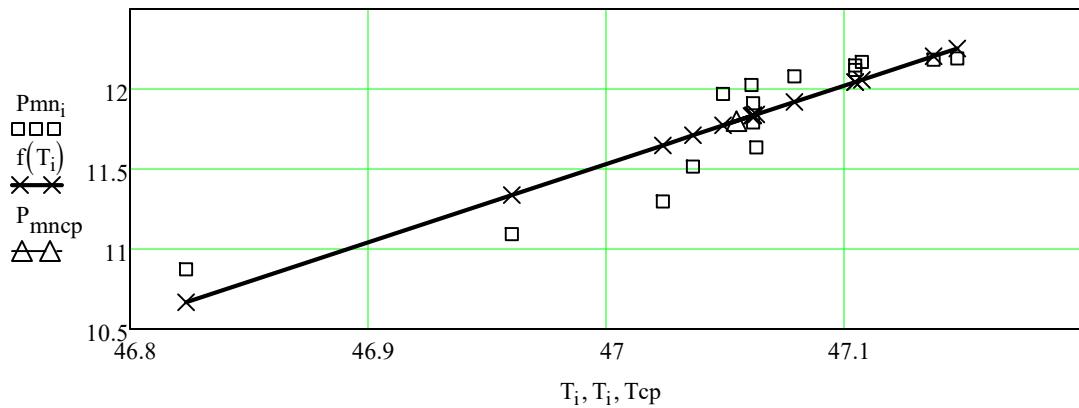


рис. А

Случайная абсолютн.
погрешность

$$\Delta P_{slu} := 2.776 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=n^2}^{n^3} (P_{mnras}(T_i) - P_{mn_i})^2}{(n^3 - n^2 + 1) \cdot (n^3 - n^2)}} = 0.128 \text{ МПа}$$

Случайная относитн.
погрешность

$$\delta P := \frac{\Delta P_{slu} \cdot 100}{P_{mncp}} = 1.086 \text{ \%}$$

1. Дайте определение метода пьезометра постоянного объема для определения плотности жидкости в произвольной форме, при этом перечислите все необходимые и достаточные ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ДЕЙСТВИЯ

Метод пьезометра постоянного объема заключается в том, что в течении всего эксперимента нам известен объем и масса исследуемого вещества.

Последовательность необходимых (режимных) действий:
заполнение пьезометра исследуемой жидкостью
нагрев пьезометра до заданной температуры Т
поддержание заданной температуры Т
давление превышает барометрическое
измерение в пьезометре параметров вещества (давление и температура)
выпуск вещества в жидкой фазе из пьезометра в колбу
измерение массы выпущенной жидкости

Измерительные действия:

- 1) Запись начальных условий (барометрическое давление и температура окружающей среды)
- 2) Измерение массы пустой колбы
- 3) Контроль температуры в пьезометре с помощью платинового термометра сопротивления (запись напряжения термометра)
- 4) Измерение давления в пьезометре с помощью манометра МИДА (запись напряжения манометра)
Запись значений напряжения катушки
- 5) Измерение массы колбы с веществом после выпуска
Запись времени шагов эксперимента

Необходимо внести поправку на изменение объема пьезометра в результате изменения температуры и давления и поправку при измерении массы выпущенной жидкости.

21.05.02 уст. 1.

Приведите численные результаты, которые получены с помощью всех необходимых действий-измерений. Эти действия вы внесли в свое определение метода и вычислили $v = 1.0099077 \times 10^{-3}$

1) Численные результаты будут приведены только для 1 результата из серии

2) Условия опыта

$$P_{\text{датч}} := 747 \text{ мм.рт.ст}$$

	$T_{\text{окн}} := 24$ С
3) Масса пустой колбы	$M_{\text{колб}} := 67.5979$ г
Масса колбы с водой	$M_{\text{колб1}} := 180.3925$ г
4) Температура в пьезометра	$T_1 = 46.823$ С
5) Избыточное давление	$P_{\text{изб}} = 10.874$ МПа

Подставляем в расчетные формулы измеренные величины

$$\Delta M_{\delta o} := (\rho - \rho_o) \cdot V_{\delta o} = 6.967 \times 10^{-5} \text{ кг}$$

Поправка на барическую деформацию для первого измерения

$$\Delta V_p := \beta \cdot (P \cdot 10^6 - 1) \cdot V_o = 2.348 \times 10^{-8} \text{ м}^3$$

Поправка на термическую деформацию для первого измерения

$$\Delta V_T := 3 \cdot \alpha t \cdot (T_1 - 293.15 + 273.15) \cdot V_o = 1.523 \times 10^{-7} \text{ м}^3$$

$$M_{\text{OCT}} = \frac{V_o}{\rho_{\text{пара}}} \quad \text{где} \quad \rho_{\text{пара}} := 0.5779 \quad \text{- плотность водяного пара при } T=100 \text{ С и } P=746 \text{ мм. рт. ст. или } 1.014 \text{ кгс/см}^2$$

Определяем удельный объем воды

$$v(Pa, T_{cp}) := \frac{V_o + \Delta V_p + \Delta V_T}{M_b \cdot 10^{-3} - \Delta M_{\delta o} + M_{\text{OCT}}} \quad v(Pa, T_{cp}) = 1.0100801 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$$

значение другое, так как представленный ход действий воспроизводился только для первого измерения серии, при расчете средних величин мы исключаем случайную погрешность.

21 05.02 уст. 1.

Оценка 5

$$ZC(x) := a_1 + a_2 \cdot x$$

$$ZCm(x) := \textcolor{red}{b}_1 + b_2 \cdot x$$

