

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Поляков Даниил, Б23-ФЗ

Цель работы: ознакомиться с принципом действия теплового насоса и определить его параметры эффективности, изучить функцию и принцип работы расширительного клапана теплового насоса.

Оборудование:



- 1) Холодный резервуар;
 - 2) Горячий резервуар;
 - 3) Компрессор;
 - 4) Расширительный клапан;
 - 5) Блок питания с ваттметром (0.1 Вт);
 - 6) Цифровой термометр (0.1 °C);
- T_1 , T_2 , $T_{вх}$, $T_{вых}$ – термодатчики для измерения температур.

Расчётные формулы

- Масса воды в обоих резервуарах:

$$m = \rho V$$

ρ – плотность воды;

V – объём воды (одинаковый для обоих резервуаров).

- Эффективность теплового насоса:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_2}{P \Delta t} c m$$

Δt – время, в течение которого происходил процесс передачи энергии;

ΔT_2 – изменение температуры горячего резервуара за время Δt ;

P – усреднённая мощность, потребляемая установкой в промежутке времени $t_{i+1} - t_i$;

c – удельная теплоёмкость воды;

m – масса воды в горячем резервуаре.

- Теоретическая максимальная эффективность идеального теплового насоса:

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

T_1 – температура воды в холодном резервуаре;

T_2 – температура воды в горячем резервуаре.

- Разность температур воды в двух резервуарах:

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

T_1 – температура воды в холодном резервуаре;

T_2 – температура воды в горячем резервуаре.

- Полная энергия, отданная холодным резервуаром:

$$Q_1 = (T_{1н} - T_{1к}) c m$$

$T_{1н}$ – начальная температура воды в холодном резервуаре;

$T_{1к}$ – конечная температура воды в холодном резервуаре;

c – удельная теплоёмкость воды;

m – масса воды в холодном резервуаре.

- Полная энергия, полученная горячим резервуаром:

$$Q_2 = (T_{2к} - T_{2н}) c m$$

$T_{2н}$ – начальная температура воды в горячем резервуаре;

$T_{2к}$ – конечная температура воды в горячем резервуаре;

c – удельная теплоёмкость воды;

m – масса воды в горячем резервуаре.

- Полная энергия, потреблённая установкой за время работы:

$$W_{\text{потр}} = \sum_i P_i \Delta t$$

$$P_i = \frac{P(t_i) + P(t_{i+1})}{2}$$

P_i – усреднённая мощность, потребляемая установкой в промежутке времени $t_{i+1} - t_i$;

Δt – промежуток измерения времени.

- Полезная работа компрессора за время работы установки:

$$W_{\text{полезн}} = Q_2 - Q_1$$

Q_1 – полная энергия, отданная холодным резервуаром;

Q_2 – полная энергия, полученная горячим резервуаром.

- Полная энергия тепловых потерь установки за время работы:

$$W_{\text{потерь}} = W_{\text{потр}} - W_{\text{полезн}}$$

$W_{\text{потр}}$ – полная энергия, потреблённая установкой за время работы;

$W_{\text{полезн}}$ – полезная работа компрессора за время работы установки.

- Средняя эффективность теплового насоса за время работы:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W_{\text{потр}}}$$

Q_2 – полная энергия, полученная горячим резервуаром;

$W_{\text{потр}}$ – полная энергия, потреблённая установкой за время работы.

- Температура перегрева хладагента в испарителе:

$$\Delta T_n = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$$

$T_{\text{вх}}$ – температура на входе в испаритель;

$T_{\text{вых}}$ – температура на выходе из испарителя.

- Формулы для вычисления погрешностей:

- Абсолютная погрешность косвенных измерений:

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \dots}$$

- $\Delta Q_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_1}{\partial T_{1H}} \cdot \Delta T_{1H}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial T_{1K}} \cdot \Delta T_{1K}\right)^2} = cm \sqrt{(\Delta T_{1H})^2 + (\Delta T_{1K})^2} = \sqrt{2} cm \Delta T$

- $\Delta Q_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_2}{\partial T_{2H}} \cdot \Delta T_{2H}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial T_{2K}} \cdot \Delta T_{2K}\right)^2} = cm \sqrt{(\Delta T_{2H})^2 + (\Delta T_{2K})^2} = \sqrt{2} cm \Delta T$

- $\Delta W_{\text{нomp}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial W_{\text{нomp}}}{\partial P_i} \cdot \Delta P_i\right)^2} = \Delta t \sqrt{\left(\frac{\Delta P_1}{2}\right)^2 + \sum_{i=2}^{n-1} (\Delta P_i)^2 + \left(\frac{\Delta P_n}{2}\right)^2} = \Delta t \Delta P \sqrt{n-1.5}$

- $\Delta W_{\text{полезн}} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{\text{полезн}}}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{\text{полезн}}}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2\right)^2} = \sqrt{(\Delta Q_1)^2 + (\Delta Q_2)^2} = 2 cm \Delta T$

- $\Delta W_{\text{потерь}} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{\text{потерь}}}{\partial W_{\text{нomp}}} \cdot \Delta W_{\text{нomp}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{\text{потерь}}}{\partial W_{\text{полезн}}} \cdot \Delta W_{\text{полезн}}\right)^2} = \sqrt{(\Delta W_{\text{нomp}})^2 + (\Delta W_{\text{полезн}})^2}$

- $\Delta \varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial W_{\text{нomp}}} \cdot \Delta W_{\text{нomp}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q_2}{W_{\text{нomp}}}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{W_{\text{нomp}}^2} \cdot \Delta W_{\text{нomp}}\right)^2}$

Порядок измерений

Нальём в оба резервуара объём воды $V = 4$ л и запустим установку. Выводы с датчиков подключены к устройству CASSY Lab, поэтому измерения будем проводить в автоматическом режиме. Запустим измерения после запуска насоса. Снятие показаний датчиков $P, T_1, T_2, T_{\text{вх}}, T_{\text{вых}}$ производится с интервалом времени $\Delta t = 5$ с. В течение всего опыта будем перемешивать воду в обоих резервуарах, таким образом уравнивая температуру воды в объёме. Завершим эксперимент после того, как температура воды в холодном резервуаре достигнет близкой к 0°C .

Таблицы и обработка данных

1. Определение эффективности теплового насоса.

Несмотря на то, что установка снимала показания датчиков с интервалом 5 с, при построении зависимости $\varepsilon(\Delta T)$ с таким шагом график получился очень шумным и было невозможно определить характер зависимости и сделать какие-либо выводы (см. Приложение). Это связано с хаотичными флуктуациями температуры в резервуарах за малый промежуток времени и недостаточной точностью измерений термометра. Поэтому целесообразно будет использовать более длинный интервал времени для расчёта каждой точки ε . Выберем интервал $\Delta t = 60$ с. Тогда $\Delta T_2(t)$ на первом интервале равна $T_2(60) - T_2(0)$, на втором $T_2(120) - T_2(60)$ и так далее.

Мощность на интервале будем рассчитывать как среднее значение от мощности, фиксированной в течение этого интервала:

$$P(0-60) = \frac{\frac{P(0)}{2} + P(5) + P(10) + \dots + P(50) + P(55) + \frac{P(60)}{2}}{12} \quad (\text{метод трапеций}).$$

Используя полученные значения $\Delta T_2(\Delta t_i)$ и $P(\Delta t_i)$ рассчитаем $\varepsilon(\Delta t_i)$. При построении зависимости $\varepsilon(\Delta T)$ каждому значению ε на промежутке (t_i, t_{i+1}) будем сопоставлять значение ΔT в точке $(t_i + t_{i+1})/2$, т.е. $\Delta T(30) \rightarrow \varepsilon(0-60)$, $\Delta T(90) \rightarrow \varepsilon(60-120)$ и т.д.

Таблица 1. Зависимость температуры, потребляемой мощности установки и эффективности теплового насоса от времени

t, c	$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$	$\Delta T, ^\circ C$	$\Delta T_2, ^\circ C$	P, Bm	ε
0	19.9	19.8	-0.1	0.0	208.4	2.62
5	20.0	19.9	-0.1	0.1	207.1	
10	19.9	20.0	0.1	0.1	202.9	
15	20.0	20.6	0.6	0.6	197.0	
20	20.0	20.6	0.6	0.0	192.2	
253	19.9	20.9	1.0	0.3	189.1	
30	19.9	20.8	0.9	-0.1	187.7	
35	19.4	21.0	1.6	0.2	188.1	
40	18.6	21.1	2.5	0.1	184.5	
45	18.8	21.3	2.5	0.2	183.4	
50	18.8	21.3	2.5	0.0	183.0	
55	18.0	21.5	3.5	0.2	183.9	
60	18.0	21.6	3.6	0.1	185.1	3.05
65	17.0	21.7	4.7	0.1	185.2	
70	18.6	21.9	3.3	0.2	187.3	
75	17.5	22.0	4.5	0.1	188.3	
80	17.4	22.2	4.8	0.2	189.8	
85	17.1	22.4	5.3	0.2	192.4	
90	18.1	22.6	4.5	0.2	193.1	
95	18.1	22.7	4.6	0.1	192.1	
100	17.4	22.9	5.5	0.2	195.9	
105	17.5	23.2	5.7	0.3	195.0	
110	17.4	23.3	5.9	0.1	194.9	
115	17.5	23.5	6.0	0.2	195.8	2.80
120	17.3	23.7	6.4	0.2	199.1	
125	17.6	23.7	6.1	0.0	197.8	
130	16.9	24.0	7.1	0.3	194.4	
135	16.8	24.2	7.4	0.2	197.7	
140	16.2	24.1	7.9	-0.1	195.9	
145	16.5	24.4	7.9	0.3	195.5	
150	16.5	24.6	8.1	0.2	198.1	
155	16.2	24.7	8.5	0.1	201.1	
160	16.2	25.0	8.8	0.3	200.4	
165	15.9	25.0	9.1	0.0	201.4	2.63
170	15.4	25.3	9.9	0.3	200.9	
175	15.8	25.4	9.6	0.1	201.7	
180	15.7	25.7	10.0	0.3	201.9	
185	15.4	26.0	10.6	0.3	201.3	
190	15.2	26.1	10.9	0.1	199.7	
195	15.4	26.3	10.9	0.2	198.4	
200	14.8	26.3	11.5	0.0	201.0	
205	15.1	26.3	11.2	0.0	201.4	
210	15.1	26.5	11.4	0.2	204.4	
215	14.8	26.6	11.8	0.1	201.8	
220	14.8	26.9	12.1	0.3	202.5	
225	14.6	27.2	12.6	0.3	203.3	

230	14.3	27.3	13.0	0.1	197.9	
235	14.3	27.4	13.1	0.1	199.6	
240	14.1	27.6	13.5	0.2	202.6	
245	13.9	27.7	13.8	0.1	198.2	2.72
250	13.5	27.9	14.4	0.2	188.8	
255	13.3	28.0	14.7	0.1	189.4	
260	13.5	28.2	14.7	0.2	203.8	
265	13.4	28.4	15.0	0.2	200.9	
270	13.3	28.6	15.3	0.2	202.6	
275	13.2	28.7	15.5	0.1	201.4	
280	13.0	28.9	15.9	0.2	201.4	
285	12.8	29.0	16.2	0.1	187.7	
290	12.8	29.1	16.3	0.1	185.9	
295	12.5	29.3	16.8	0.2	185.5	
300	12.5	29.5	17.0	0.2	185.6	
305	12.4	29.6	17.2	0.1	186.4	
310	12.3	29.7	17.4	0.1	187.3	
315	12.1	29.9	17.8	0.2	186.9	2.71
320	12.0	30.0	18.0	0.1	187.8	
325	11.2	30.3	19.1	0.3	186.9	
330	11.6	30.4	18.8	0.1	186.9	
335	11.3	30.6	19.3	0.2	185.6	
340	11.5	30.8	19.3	0.2	184.3	
345	11.3	30.9	19.6	0.1	183.3	
350	11.2	31.1	19.9	0.2	182.5	
355	11.0	31.3	20.3	0.2	183.1	
360	10.9	31.3	20.4	0.0	183.4	
365	10.8	31.5	20.7	0.2	183.4	
370	10.6	31.6	21.0	0.1	183.8	2.59
375	10.5	31.7	21.2	0.1	184.1	
380	10.2	32.0	21.8	0.3	183.6	
385	10.2	32.0	21.8	0.0	183.7	
390	10.0	32.2	22.2	0.2	184.9	
395	10.0	32.4	22.4	0.2	184.6	
400	9.9	32.5	22.6	0.1	183.1	
405	9.7	32.8	23.1	0.3	181.9	
410	9.6	32.7	23.1	-0.1	180.3	
415	9.7	33.0	23.3	0.3	179.1	
420	9.6	33.0	23.4	0.0	178.7	
425	9.3	33.2	23.9	0.2	178.9	
430	9.1	33.3	24.2	0.1	179.4	2.47
435	9.1	33.4	24.3	0.1	180.0	
440	9.0	33.6	24.6	0.2	180.2	
445	8.9	33.8	24.9	0.2	180.0	
450	8.8	33.9	25.1	0.1	180.4	
455	8.7	34.0	25.3	0.1	180.5	
460	8.6	34.1	25.5	0.1	180.5	
465	8.5	34.2	25.7	0.1	180.4	
470	8.3	34.4	26.1	0.2	181.1	
475	8.2	34.6	26.4	0.2	181.7	
480	8.2	34.6	26.4	0.0	182.3	
485	8.1	34.8	26.7	0.2	182.5	2.60
490	7.9	34.9	27.0	0.1	181.9	
495	7.9	35.1	27.2	0.2	181.8	
500	7.7	35.2	27.5	0.1	183.2	
505	7.7	35.3	27.6	0.1	183.0	
510	7.4	35.5	28.1	0.2	183.3	
515	7.4	35.7	28.3	0.2	183.1	
520	7.4	35.7	28.3	0.0	183.3	
525	7.3	35.9	28.6	0.2	181.1	
530	7.1	35.9	28.8	0.0	180.4	
535	7.1	36.2	29.1	0.3	179.1	
540	6.9	36.3	29.4	0.1	177.8	
545	6.8	36.5	29.7	0.2	177.5	

550	6.7	36.6	29.9	0.1	177.4	1.88
555	6.6	36.6	30.0	0.0	177.3	
560	6.4	36.6	30.2	0.0	177.3	
565	6.4	36.8	30.4	0.2	177.9	
570	6.3	36.8	30.5	0.0	178.3	
575	6.2	36.9	30.7	0.1	178.2	
580	6.2	37.0	30.8	0.1	179.1	
585	6.1	37.1	31.0	0.1	179.1	
590	5.9	37.3	31.4	0.2	179.3	
595	5.8	37.3	31.5	0.0	179.7	
600	5.7	37.5	31.8	0.2	179.3	2.02
605	5.7	37.7	32.0	0.2	180.0	
610	5.6	37.9	32.3	0.2	179.8	
615	5.5	38.0	32.5	0.1	180.3	
620	5.3	38.0	32.7	0.0	179.7	
625	5.3	38.1	32.8	0.1	179.9	
630	5.1	38.1	33.0	0.0	180.1	
635	5.0	38.3	33.3	0.2	181.1	
640	5.0	38.5	33.5	0.2	181.0	
645	4.9	38.5	33.6	0.0	179.7	1.91
650	4.8	38.6	33.8	0.1	178.2	
655	4.8	38.7	33.9	0.1	176.5	
660	4.6	38.8	34.2	0.1	174.5	
665	4.6	39.0	34.4	0.2	174.0	
670	4.5	39.1	34.6	0.1	174.3	
675	4.4	39.2	34.8	0.1	174.5	
680	4.3	39.3	35.0	0.1	174.7	
685	4.3	39.3	35.0	0.0	174.6	
690	4.1	39.5	35.4	0.2	175.0	1.72
695	4.0	39.6	35.6	0.1	175.5	
700	4.0	39.6	35.6	0.0	175.4	
705	3.9	39.7	35.8	0.1	175.6	
710	3.8	39.8	36.0	0.1	176.7	
715	3.8	40.0	36.2	0.2	176.8	
720	3.6	40.0	36.4	0.0	176.3	
725	3.5	40.2	36.7	0.2	176.5	
730	3.5	40.2	36.7	0.0	176.8	
735	3.4	40.3	36.9	0.1	177.5	1.74
740	3.3	40.4	37.1	0.1	177.0	
745	3.1	40.5	37.4	0.1	177.5	
750	3.1	40.5	37.4	0.0	177.9	
755	3.1	40.7	37.6	0.2	177.9	
760	2.9	40.8	37.9	0.1	178.5	
765	2.9	40.9	38.0	0.1	178.9	
770	2.8	41.0	38.2	0.1	179.4	
775	2.8	41.1	38.3	0.1	179.8	
780	2.7	41.1	38.4	0.0	179.8	
785	2.7	41.2	38.5	0.1	180.1	1.74
790	2.6	41.3	38.7	0.1	178.6	
795	2.5	41.4	38.9	0.1	176.9	
800	2.4	41.5	39.1	0.1	175.7	
805	2.3	41.7	39.4	0.2	174.1	
810	2.2	41.7	39.5	0.0	174.1	
815	2.1	41.7	39.6	0.0	174.2	
820	2.0	41.9	39.9	0.2	173.7	
825	1.7	42.0	40.3	0.1	173.7	
830	1.4	42.1	40.7	0.1	175.2	
835	1.9	42.3	40.4	0.2	175.8	1.74
840	1.8	42.2	40.4	-0.1	175.8	

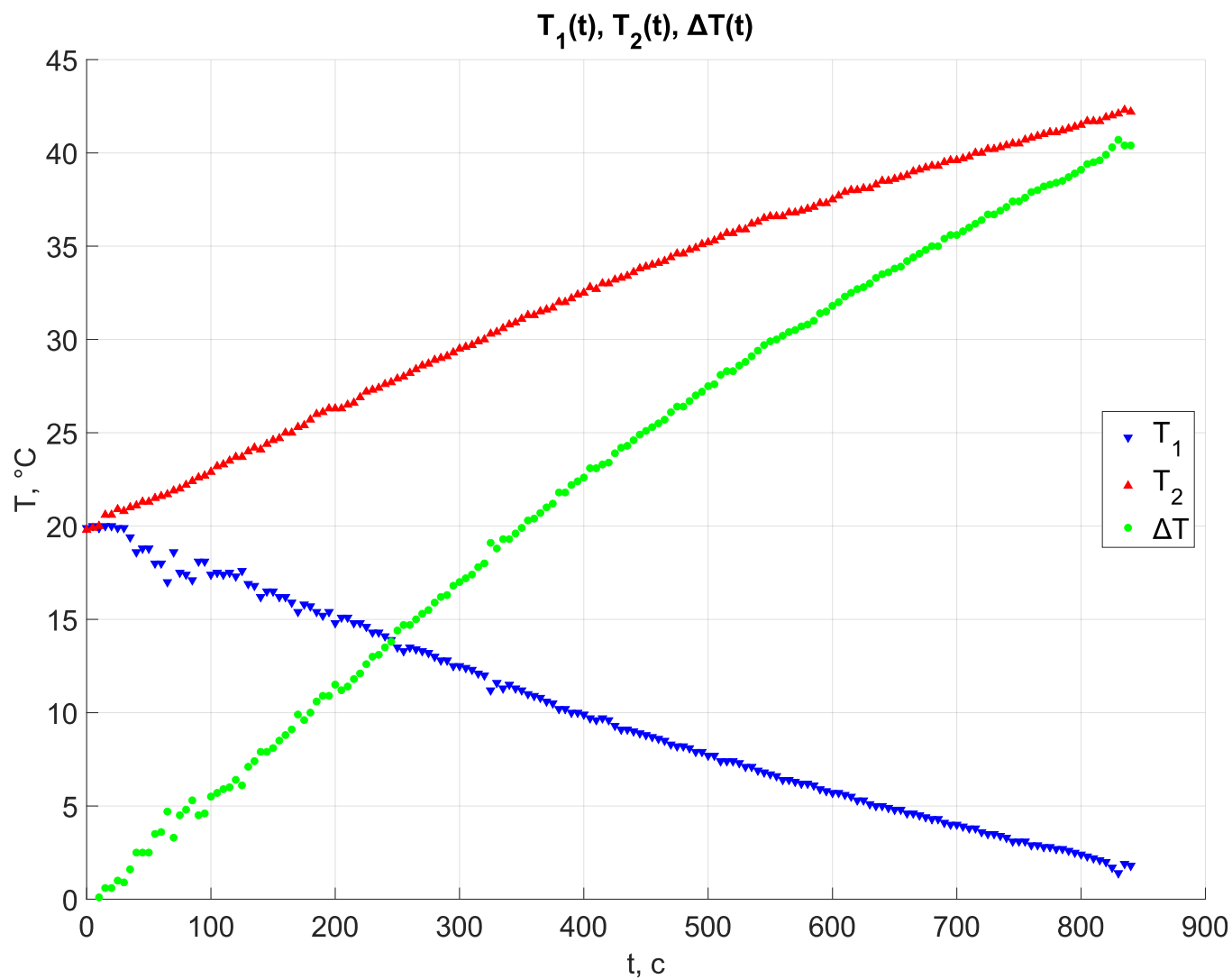


График 1.1. Зависимость температуры воды в холодном резервуаре T_1 , температуры воды в горячем резервуаре T_2 и разности температур воды в двух резервуарах ΔT от времени

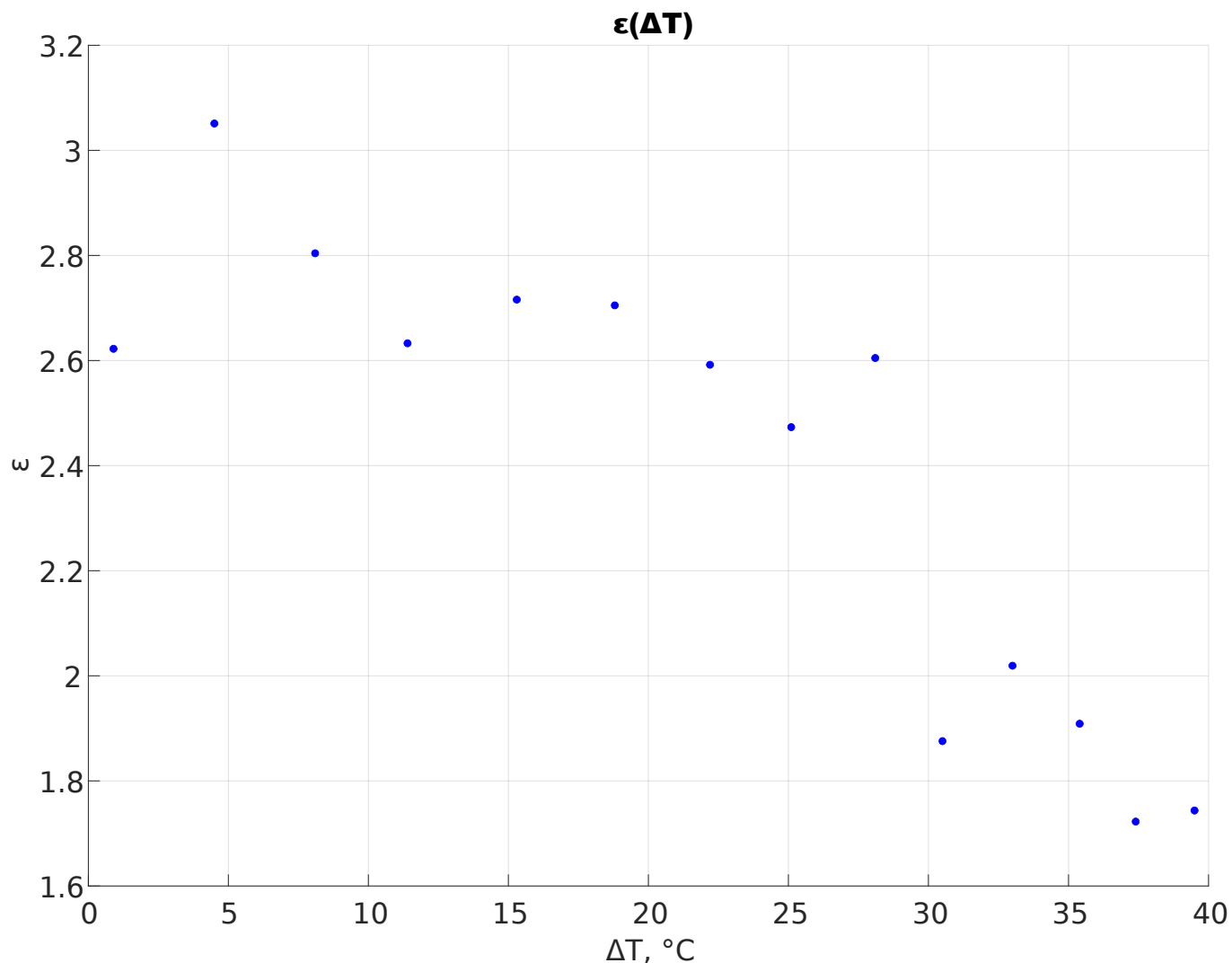


График 1.2. Зависимость эффективности теплового насоса от разности температур воды в двух резервуарах

Из графика **1.1** видно, что со временем скорость изменения температуры воды в резервуарах замедляется, и, соответственно, уменьшается эффективность теплового насоса (график **1.2**). Это в первую очередь связано с теплообменом с окружающей средой. Но даже в случае идеальной системы её максимально возможная эффективность всё равно уменьшается с ростом разности температур. Чтобы убедиться в этом, построим график зависимости теоретического максимального значения эффективности насоса от разности температур (в соответствии с циклом Карно), используя полученные экспериментальные значения T_1 и T_2 .

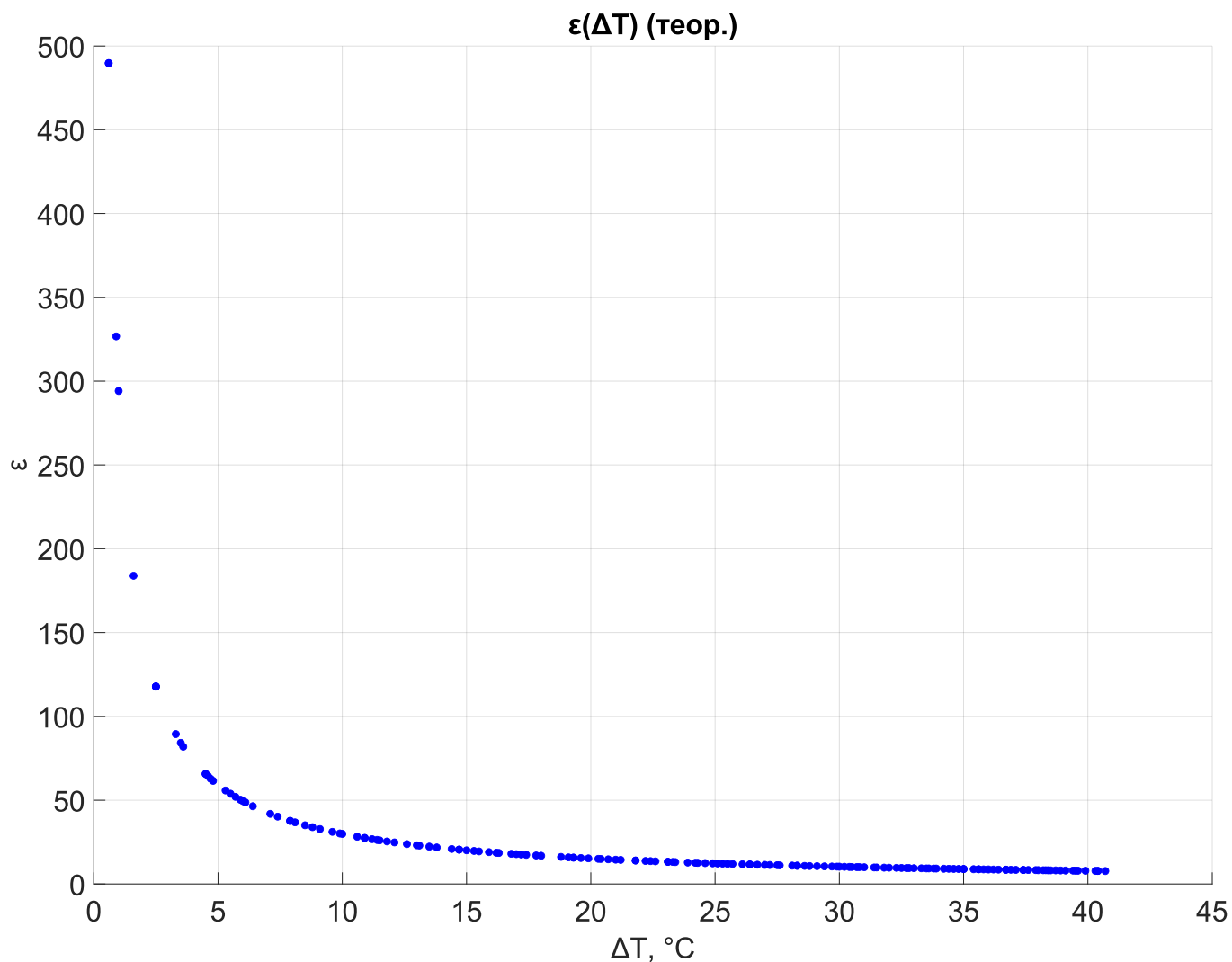


График 1.3. Теоретическая зависимость эффективности идеального теплового насоса от разности температур воды в двух резервуарах

Действительно, теоретически эффективность нашего теплового насоса должна уменьшаться со временем и ростом разности температур, что и подтверждается на опыте. Хотя, конечно, полученные реальные значения эффективности во много раз меньше идеальных.

Теперь найдём численные значения энергий нашей установки. Масса воды в каждом резервуаре примерно равна 4 кг. Погрешность измерений всех величин считаем равной цене деления прибора: $\Delta T = 0.1 ^\circ\text{C}$, $\Delta P = 0.1 \text{ Bm}$.

- Полная энергия, отданная холодным резервуаром:

$$Q_1 = 303 \pm 2 \text{ кДж}$$

- Полная энергия, полученная горячим резервуаром:

$$Q_2 = 375 \pm 2 \text{ кДж}$$

- Полная энергия, потреблённая установкой за время работы:

Для нахождения $W_{\text{номр}}$ проинтегрируем потребляемую мощность установки по времени, используя метод трапеций (см. **Расчётные формулы**).

$$W_{\text{номр}} = 155.713 \pm 0.006 \text{ кДж}$$

- Полезная работа компрессора за время работы установки:

$$W_{\text{полезн}} = 72 \pm 3 \text{ кДж}$$

- Полная энергия тепловых потерь установки за время работы:

$$W_{\text{потерь}} = 84 \pm 3 \text{ кДж}$$

- Средняя эффективность теплового насоса за время работы:

$$\varepsilon = 2.406 \pm 0.015$$

2. Изучение функции расширительного клапана.

Значение в начальный момент времени $t = 0$ было выброшено из-за сильного выпадения значения входной температуры вследствие запуска установки ($T_{\text{вх}}(0) = 49 \text{ }^\circ\text{C}$).

Таблица 2. Зависимость температуры хладагента на входе и на выходе из испарителя от времени

$t, \text{ c}$	$T_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t, \text{ c}$	$T_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t, \text{ c}$	$T_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$
5	20.7	20.6	-0.1	285	9.5	14.7	5.2	565	5.4	8.0	2.6
10	20.7	20.7	0.0	290	9.5	14.3	4.8	570	5.2	8.0	2.8
15	20.6	20.7	0.1	295	9.4	14.1	4.7	575	5.2	7.9	2.7
20	20.6	20.6	0.0	300	9.4	13.8	4.4	580	5.1	8.0	2.9
25	20.7	20.7	0.0	305	9.2	13.6	4.4	585	5.0	8.0	3.0
30	20.6	20.7	0.1	310	9.1	13.4	4.3	590	4.9	8.1	3.2
35	20.0	20.7	0.7	315	9.0	13.2	4.2	595	4.9	8.2	3.3
40	19.1	20.7	1.6	320	8.9	13.1	4.2	600	4.8	8.3	3.5
45	18.2	20.6	2.4	325	8.9	13.0	4.1	605	4.9	8.4	3.5
50	17.3	20.6	3.3	330	8.8	12.9	4.1	610	4.7	8.5	3.8
55	16.4	20.6	4.2	335	8.8	12.7	3.9	615	4.7	8.6	3.9
60	15.8	20.5	4.7	340	8.7	12.6	3.9	620	4.6	8.5	3.9
65	15.0	20.5	5.5	345	8.6	12.4	3.8	625	4.6	8.6	4.0
70	14.4	20.5	6.1	350	8.5	12.3	3.8	630	4.6	8.6	4.0
75	13.8	20.6	6.8	355	8.3	12.2	3.9	635	4.6	8.7	4.1
80	13.3	20.5	7.2	360	8.2	12.1	3.9	640	4.7	8.6	3.9

85	12.8	20.5	7.7	365	8.1	12.0	3.9	645	4.7	8.5	3.8
90	12.5	20.4	7.9	370	8.0	11.9	3.9	650	4.6	8.3	3.7
95	12.2	20.4	8.2	375	7.9	11.9	4.0	655	4.5	7.9	3.4
100	11.8	20.3	8.5	380	7.9	11.9	4.0	660	4.5	7.4	2.9
105	11.6	20.2	8.6	385	7.9	11.8	3.9	665	4.3	7.1	2.8
110	11.4	20.2	8.8	390	7.9	11.8	3.9	670	4.2	6.7	2.5
115	11.2	20.1	8.9	395	7.8	11.6	3.8	675	4.1	6.5	2.4
120	11.0	20.1	9.1	400	7.8	11.4	3.6	680	4.0	6.5	2.5
125	10.9	20.0	9.1	405	7.7	10.9	3.2	685	3.9	6.3	2.4
130	10.8	19.8	9.0	410	7.6	10.4	2.8	690	3.8	6.4	2.6
135	10.6	19.7	9.1	415	7.5	10.1	2.6	695	3.7	6.5	2.8
140	10.6	19.6	9.0	420	7.4	9.7	2.3	700	3.7	6.7	3.0
145	10.4	19.6	9.2	425	7.2	9.6	2.4	705	3.6	6.7	3.1
150	10.3	19.5	9.2	430	7.1	9.5	2.4	710	3.6	6.9	3.3
155	10.3	19.4	9.1	435	6.9	9.5	2.6	715	3.4	7.0	3.6
160	10.2	19.3	9.1	440	6.8	9.5	2.7	720	3.4	7.2	3.8
165	10.2	19.2	9.0	445	6.7	9.5	2.8	725	3.3	7.3	4.0
170	10.2	19.2	9.0	450	6.6	9.6	3.0	730	3.3	7.3	4.0
175	10.1	19.0	8.9	455	6.5	9.7	3.2	735	3.2	7.4	4.2
180	10.0	19.0	9.0	460	6.5	9.7	3.2	740	3.2	7.4	4.2
185	10.0	18.8	8.8	465	6.4	9.8	3.4	745	3.2	7.5	4.3
190	10.0	18.7	8.7	470	6.3	9.9	3.6	750	3.2	7.7	4.5
195	10.0	18.6	8.6	475	6.3	10.0	3.7	755	3.3	7.8	4.5
200	9.9	18.5	8.6	480	6.3	10.0	3.7	760	3.1	7.8	4.7
205	9.9	18.3	8.4	485	6.2	10.1	3.9	765	3.2	7.9	4.7
210	9.9	18.2	8.3	490	6.3	10.2	3.9	770	3.2	8.0	4.8
215	9.9	18.0	8.1	495	6.2	10.1	3.9	775	3.2	8.0	4.8
220	9.9	17.8	7.9	500	6.2	10.2	4.0	780	3.2	8.0	4.8
225	9.8	17.6	7.8	505	6.1	10.2	4.1	785	3.3	7.9	4.6
230	9.8	17.4	7.6	510	6.1	10.1	4.0	790	3.3	7.7	4.4
235	9.7	17.2	7.5	515	6.1	10.1	4.0	795	3.3	7.4	4.1
240	9.7	16.9	7.2	520	6.2	10.1	3.9	800	3.3	6.9	3.6
245	9.7	16.8	7.1	525	6.2	10.1	3.9	805	3.2	6.5	3.3
250	9.7	16.6	6.9	530	6.1	9.8	3.7	810	3.1	6.2	3.1
255	9.7	16.5	6.8	535	6.1	9.3	3.2	815	3.0	5.9	2.9
260	9.7	16.4	6.7	540	6.0	8.9	2.9	820	3.0	5.8	2.8
265	9.6	16.3	6.7	545	5.9	8.6	2.7	825	2.8	5.7	2.9
270	9.6	16.0	6.4	550	5.8	8.3	2.5	830	2.8	5.6	2.8
275	9.7	15.8	6.1	555	5.6	8.1	2.5	835	2.7	5.6	2.9
280	9.5	15.3	5.8	560	5.5	7.9	2.4	840	2.7	5.6	2.9

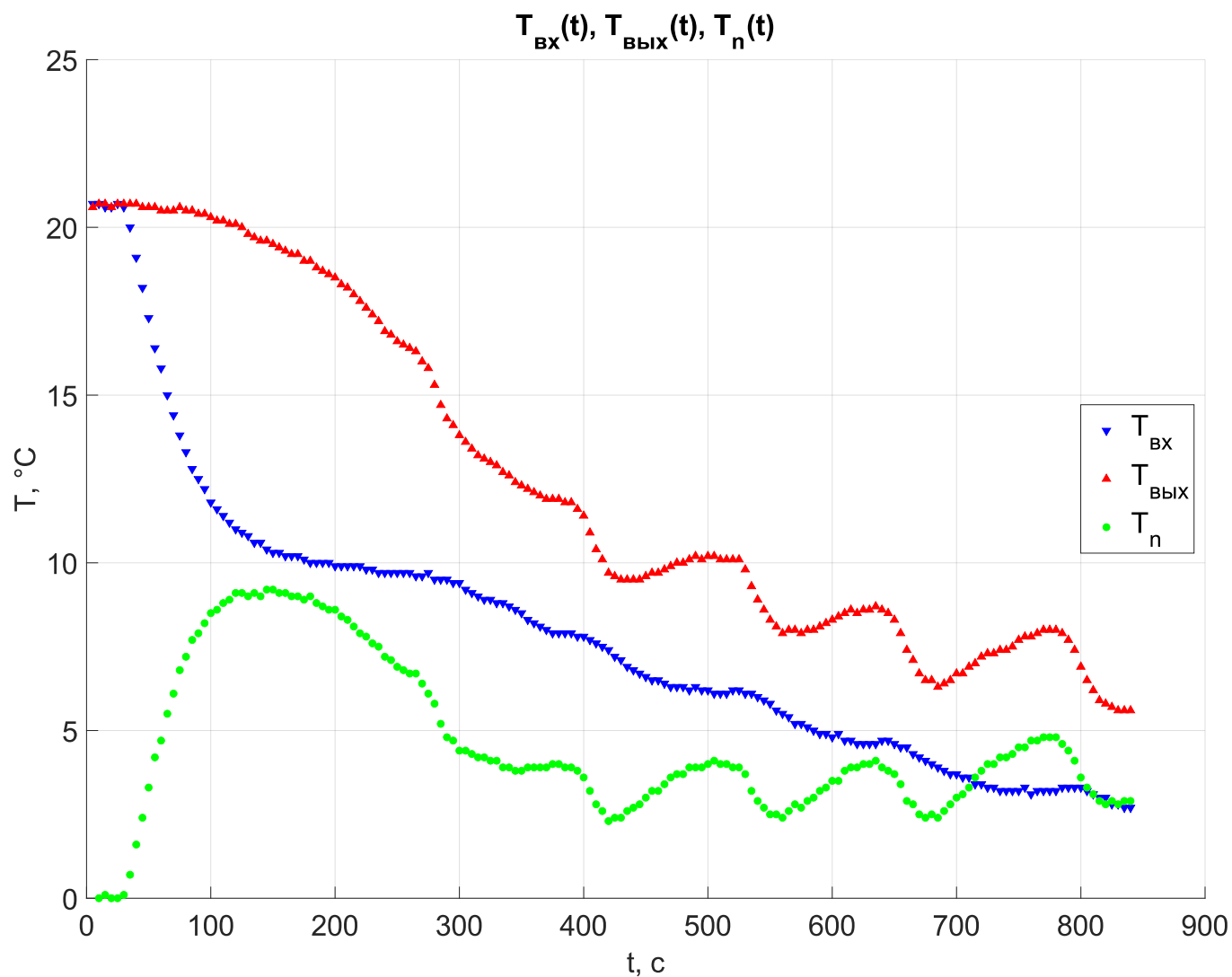


График 2. Зависимость температуры хладагента на входе $T_{\text{вх}}$ на выходе $T_{\text{вых}}$ испарителя и температура перегрева хладагента в испарителе T_n от времени

Наблюдаем, что температура на входе и выходе испарителя постепенно падает с течением времени и вскоре приобретает осциллирующий вид. При этом разность температур на входе и выходе примерно через 400 секунд с запуска установки начинает колебаться около постоянного (стационарного) значения:

$$T_{n \text{ cm}} = 3.6 \pm 1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Выводы

В процессе работы разница температур в резервуарах постепенно увеличивалась, но скорость её изменения замедлялась (график 1.1). Эффективность насоса снижалась с течением времени и увеличением разности температур (график 1.2).

Были получены следующие результаты:

- Полная энергия, отданная холодным резервуаром:

$$Q_1 = 303 \pm 2 \text{ кДж}$$

- Полная энергия, полученная горячим резервуаром:

$$Q_2 = 375 \pm 2 \text{ кДж}$$

- Полная энергия, потреблённая установкой за время работы:

$$W_{\text{номр}} = 155.713 \pm 0.006 \text{ кДж}$$

- Полезная работа компрессора за время работы установки:

$$W_{\text{полезн}} = 72 \pm 3 \text{ кДж}$$

- Полная энергия тепловых потерь установки за время работы:

$$W_{\text{потерь}} = 84 \pm 3 \text{ кДж}$$

- Средняя эффективность теплового насоса за время работы:

$$\varepsilon = 2.406 \pm 0.015$$

- В процессе работы расширительного клапана насоса (график 2) разность температур на входе и выходе примерно через 400 секунд с запуска установки начинает колебаться около постоянного (стационарного) значения:

$$T_{n \text{ см}} = 3.6 \pm 1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Тепловой насос – эффективный способ нагревания тела или помещения, т.к. он способен передать нагреваемому телу тепла больше, чем было затрачено при этом работы – другими словами, его эффективность больше 1, что и было проверено в нашей работе.

Недостатками теплового насоса являются его сложность и стоимость, а также необходимость наличия тела (источника), передающего свою тепловую энергию нагреваемому телу (потребителю). При этом температура источника не должна сильно отличаться от температуры потребителя, иначе эффективность насоса будет снижаться.

Приложение. Построение зависимости эффективности теплового насоса от разности температур воды в резервуарах с минимальным шагом по времени $\Delta t = 5$ с.

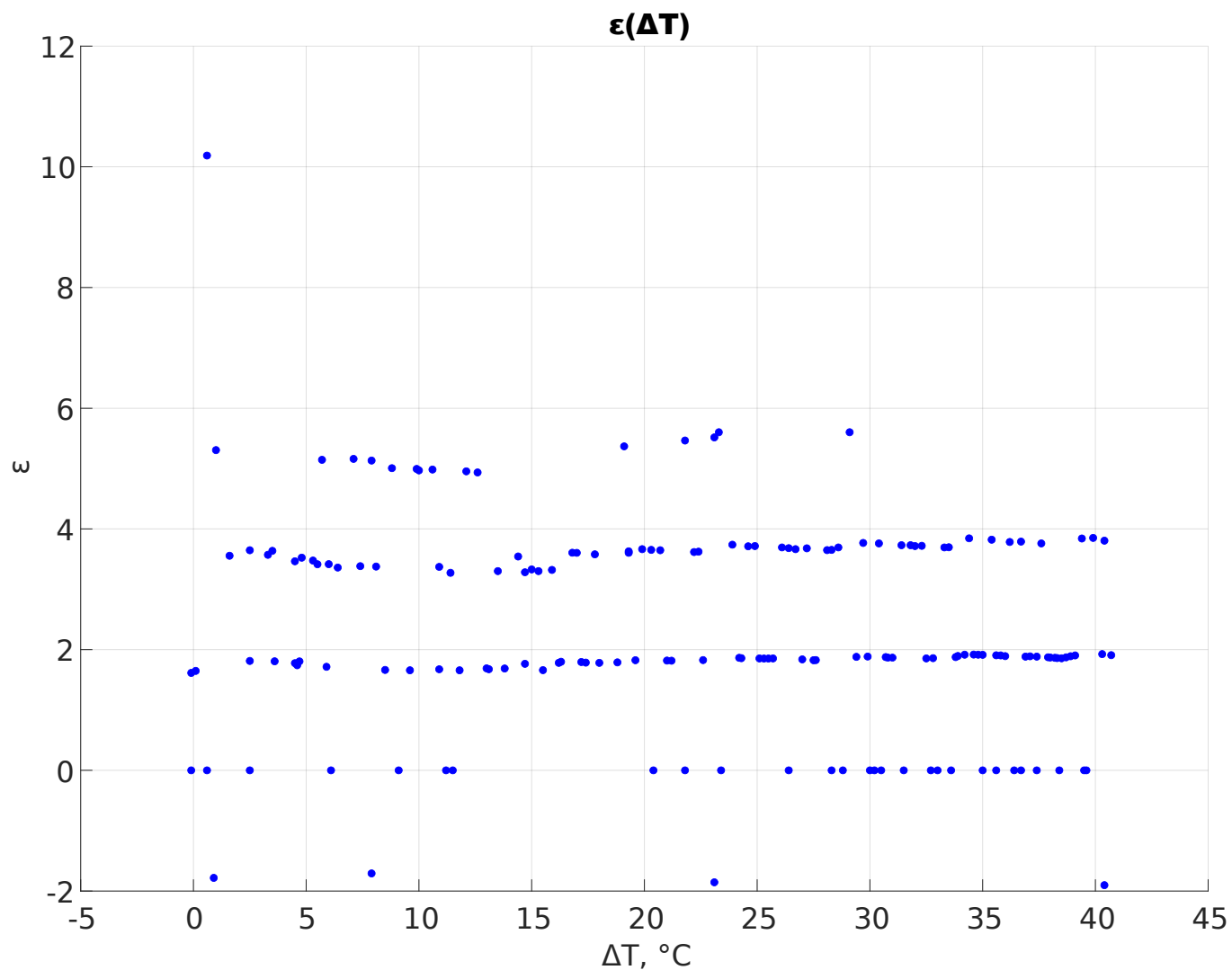


График 3. Зависимость эффективности теплового насоса от разности температур воды в двух резервуарах с шагом $\Delta t = 5$ с