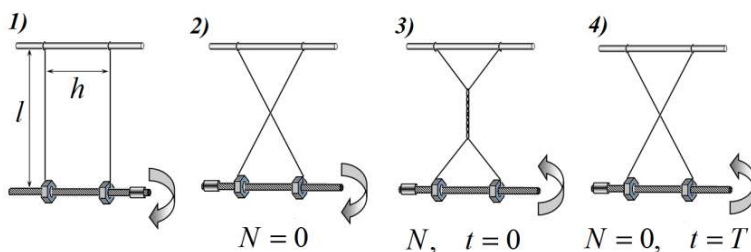


Условие

Закручивание: построение потенциальной кривой

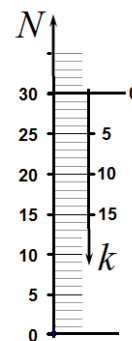
Поведение механических систем с одной степенью свободы полностью определяется зависимостью потенциальной энергии системы от координаты, график которой называется потенциальной кривой. Часто теоретический расчет этой зависимости может являться сложной, иногда неразрешимой задачей. В таких случаях потенциальная кривая может быть получена на основании экспериментальных данных.

В данной работе вам необходимо найти зависимость потенциальной энергии от координаты при свободном вращении металлического стержня, подвешенного на двух вертикальных нитях. В ходе всех экспериментов длины нитей l и расстояние между ними h не изменяйте.



Для проведения измерений используйте следующую методику. Из начального положения, когда нити вертикальны (1), поверните стержень на половину оборота (2), при этом нити соприкоснутся. Далее поворачивайте стержень так, чтобы нити скручивались, сделайте требуемое количество полных оборотов N (3). После доверните стержень еще на четверть оборота и отпустите его. Запускайте секундомер только тогда, когда стержень при раскручивании снова займет положение (3). После этого измеряйте время требуемого количества оборотов вращения до положения (4). В расчетах принимайте, что скорость стержня в начальном положении (3) равна нулю, несмотря на дополнительную четверть оборота.

В данной задаче используются две связанные между собой координаты: N – число оборотов при закручивании нитей, которое отсчитывается от нижнего положения стержня (2) снизу вверх; k – число оборотов, сделанных стержнем в ходе раскручивания нитей и отсчитываемых от положения (3) при $N = 30$ сверху вниз. Единицей измерения координат является «один оборот». Соответственно, единицей скорости V является «число оборотов в секунду», ее размерность $[V] = \text{с}^{-1}$. В качестве меры энергии используется квадрат скорости $E = V^2$, который пропорционален кинетической энергии вращения стержня. Назовем единицу измерения энергии в этом случае $[E] = \text{с}^{-2}$ – Ku (Kazakhstani unit). Потенциальная энергия стержня считается равной нулю в положении стержня (3) при $N = 30$, если не указано другое «нулевое» положение.



Часть 1. Теоретическое введение

Масса стержня равна $m_1 = 50,0$ г, а масса одной гайки – $m_2 = 6,4$ г.

1.1 Выразите единицу энергии Ku в Джоулях. Рассчитайте ее численное значение.

В ходе измерений вам необходимо измерять времена $t(k)$, за которые стержень совершает k оборотов. Пусть эта зависимость приближенно описывается формулой:

$$t(k) = Ak^\alpha,$$

где A, α – некоторые постоянные.

1.2 Получите формулу для расчета скорости $V(k)$ и кинетической энергии $E(k)$ в единицах Ku в зависимости от координаты k , которую формально можете считать непрерывной. Выразите $E(k)$ через параметры A, α, k .

Пусть потенциальная энергия U принимается равной нулю в положении стержня (2) и ее зависимость от координаты N приближенно описывается формулой:

$$U(N) = BN^\beta.$$

Обозначим T как время раскручивания стержня из начального положения (3) до нижнего положения (4), тогда в этих условиях приближенная зависимость $T(N)$ описывается формулой $T(N) = GN^\gamma$.

1.3 Выразите показатель степени γ через показатель степени β .

Часть 2. Изучение закона движения

Установите стержень в начальное положение (3) с $N = 30$. Освободите стержень и используйте секундомер с памятью этапов для фиксации времени $t(k)$, за которые стержень делает k оборотов из начального положения. Измерения проведите в диапазоне $k = 0 \div 30$ через каждые три оборота.

2.1 Результаты измерений $t(k)$ занесите в Таблицу 1. 2.2 Постройте график закона движения $k(t)$.

Для расчета скорости стержня по экспериментальным данным используйте симметричную формулу

$$V(k) = \frac{6}{t(k+3) - t(k-3)}.$$

2.3 Рассчитайте по экспериментальным данным значения кинетических энергий $E(k)$ для всех измеренных значений координаты k . Результаты измерений занесите в Таблицу 1 в столбец « $E(k)$ (эксп.)». 2.4 Постройте график полученной зависимости $E(k)$. Обозначьте его №1. 2.5 Запишите формулу для потенциальной энергии стержня $U(k)$, выразив ее через $E(k)$. 2.6 Постройте в логарифмическом масштабе зависимость $t(k)$ от числа оборотов k . 2.7 Рассчитайте значения параметров зависимости A, α и оцените их погрешности. 2.8 Используя найденные значения параметров A, α , рассчитайте значения кинетической энергии $E(k)$ в соответствии с п. 1.2. Результаты измерений занесите в Таблицу 1 в столбец « $E(k)$ » (теор.). 2.9 Постройте

график рассчитанной зависимости кинетической энергии стержня $E(k)$ на том же графике п. 2.4. Обозначьте его №2.

Часть 3. Поэтапное зондирование

В данной части оценка погрешностей не требуется. Для определения параметров зависимостей используйте графический метод.

Чем меньше интервал, тем приближенные (аппроксимирующие) формулы точнее описывают движение. В данной части работы Вам необходимо исследовать движения стержня на небольших интервалах изменения координаты N , границы которых указаны в *Writing Sheets*. Большее значение соответствует начальному положению. На каждом интервале Вам необходимо измерить закон движения – времена, за которые стержень сделает $k = 10$ оборотов из начального положения, при этом в каждом заданном интервале координаты N координата k изменяется от 1 до 10. Измерения проводите с шагом $\Delta k = 1$. Используйте секундомер с памятью этапов, засекайте времена после каждого оборота стержня.

На каждом интервале считайте, что полученную зависимость $t(k)$ можно приближенно описать функцией $t(k) = Ak^\alpha$ со своими значениями параметров A и α , которые вам необходимо определить. На каждом из указанных интервалов выполните следующие задания.

3.1 Измерьте значения времен $t(k)$, за которые стержень делает k оборотов из начального положения. 3.2 Постройте в логарифмическом масштабе зависимость $t(k)$ на подготовленных частях *Writing Sheets*. 3.3 По 6 последним точкам (для значений k от 5 до 10) проведите сглаживающую прямую линию.

3.4 По построенному линейному графику определите значения параметров A и α , указав формулы для их расчета. 3.5 Рассчитайте значения изменения кинетической энергии стержня $E_{5-10} = E(10) - E(5)$ при изменении координаты k от 5 до 10. Приведите формулу для расчета этой величины.

Обобщите полученные результаты. Для этого будем считать, что стержень раскручивается из начального положения $N = 30$.

3.6 Используя полученные в этой части данные, рассчитайте значения кинетической энергии $E(k)$ стержня после $k = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ оборотов. Постройте на графике п. 2.4 график полученной в этой части зависимости. Обозначьте его №3.

Часть 4. Время раскручивания

В данной части Вам необходимо исследовать зависимость времени полного раскручивания $T(N)$ стержня от начального значения N до нижнего положения (4).

4.1 Измерьте зависимость времени $T(N)$ полного раскручивания стержня от числа оборотов N для значений $N = 5, 10, 15, 20, 25, 30$. 4.2 Оцените погрешность измерения времени раскручивания для $N = 10$. Для этого проведите не менее 5 измерений этого времени. 4.3 Постройте в логарифмическом масштабе полученную зависимость $T(N)$. 4.4 Считая, что эта зависимость описывается формулой $T(N) = GN^\gamma$, определите показатель степени γ в этой формуле. 4.5 Используя найденное значение показателя степени γ , рассчитайте значение показателя степени β в формуле зависимости потенциальной энергии от координаты $U = BN^\beta$.

Считайте, что раскручивания стержня начинается с положения $N = 30$.

4.6 Рассчитайте значения кинетической энергии стержня $E(k)$ после $k = 5, 10, 15, 20, 25, 30$ оборотов. Приведите формулы, которые вы использовали для расчета $E(k)$.

Значение коэффициента B в формуле $U = BN^\beta$ подберите таким образом, чтобы значение кинетической энергии при $k = 30$, совпадало со значением этой энергии, рассчитанным в п. 3.6.

4.7 Постройте на графике п. 2.4 график полученной в этой части зависимости. Обозначьте его №4.

Решение

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТУРА Закручивание: построение потенциальной кривой **Часть 1. Теоретическое введение**

1.1 Кинетическая энергия вращающегося стержня выражается формулой

$$E = \frac{I\omega^2}{2}. \quad (1)$$

$I = \frac{m_1 a^2}{12} + 2m_2 \frac{h^2}{4}$ – момент инерции стержня относительно оси вращения (где l – длина стержня, h – расстояние между нитями), $\omega = 2\pi V$ – угловая скорость вращения стержня (ω – частота вращения). Следовательно,

$$E = \pi^2 \left(\frac{m_1 a^2}{6} + m_2 h^2 \right) V^2 \quad (2)$$

При $V = 1 \text{ с}^{-1}$ энергия стержня является искомой единицей измерения. Здесь и далее полагается, что можно пренебречь энергией, связанной с вертикальной скоростью стержня по сравнению с энергией вращательного движения. По результатам измерений $a = 25 \text{ см}$, $h = 15 \text{ см}$, значения масс указаны в условии задачи. Поэтому

$$1 \text{ Ку} \approx 6,35 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}. \quad (3)$$

1.2 Вычислим производную от предлагаемой зависимости времени от координаты $t(k) = Ak^\alpha$ по k , учитывая, что координатой является число оборотов k (не обязательно целое):

$$V(k) = \frac{dk}{dt} = \frac{k^{1-\alpha}}{\alpha A}, \quad (4)$$

$$E(k) = V^2 = \left(\frac{k^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2. \quad (5)$$

1.3 Выразим скорость вращения стержня из закона сохранения энергии:

$$V(k)^2 = U(N) - U(k). \quad (6)$$

Время раскручивания можно рассчитать по следующей формуле

$$T = \int_0^N \frac{dk}{V(k)}. \quad (7)$$

Проведя замену переменной интегрирования

$$\xi = \frac{N - k}{N} \quad (8)$$

и используя зависимость $U(N) = BN^\beta$, получаем

$$T(N) = N^{1-\frac{\beta}{2}} \sqrt{\frac{1}{B}} \int_0^1 \frac{d\xi}{\sqrt{1-\xi^\beta}}. \quad (9)$$

Интеграл в этом выражении не зависит от величины N , он зависит только от показателя степени β , поэтому зависимость времени раскручивания от числа оборотов задается формулой $T(N) = GN^\gamma$, в которой показатель степени равен

$$\gamma = 1 - \frac{\beta}{2}. \quad (10)$$

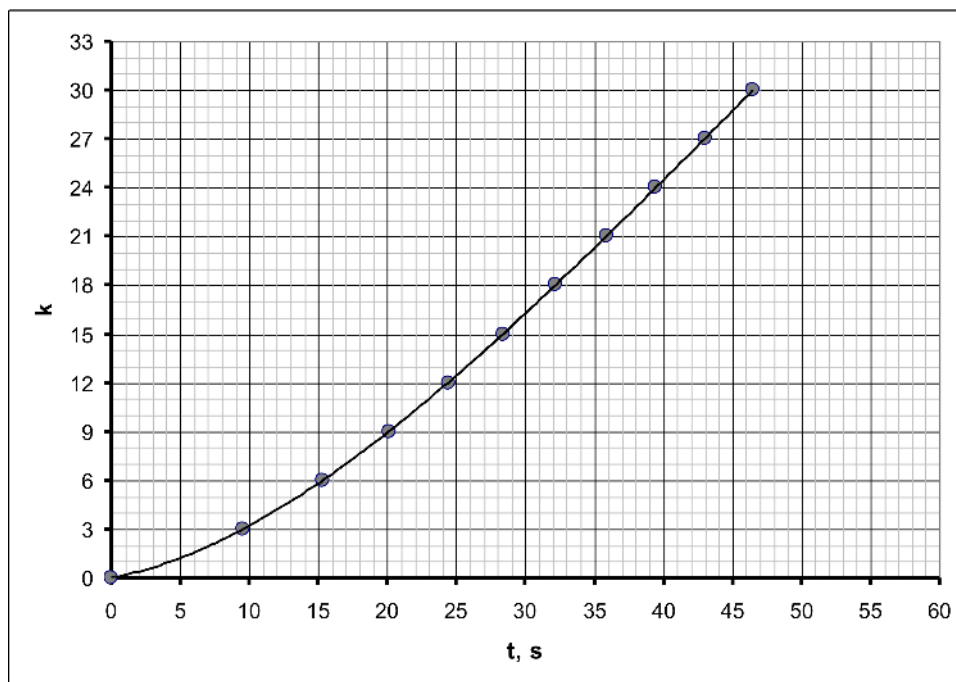
Часть 2. Изучение закона движения

2.1-2.2 Результаты измерений и необходимых расчетов приведены в Таблице 1.

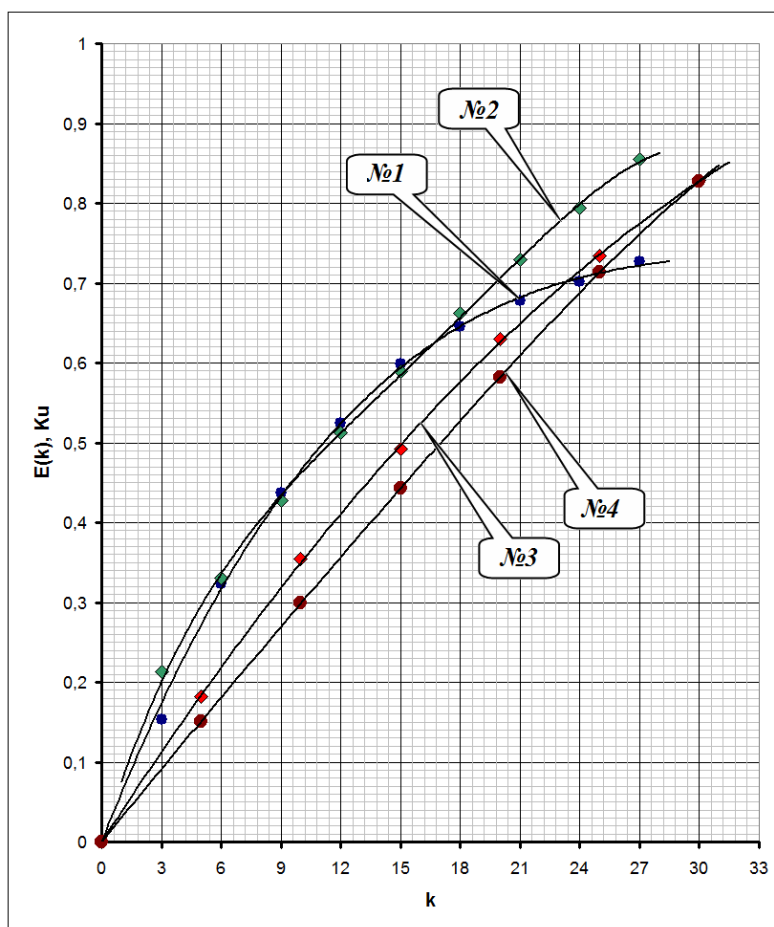
k	t, c	V, c^{-1}	$E, \text{ Ку (эксп.)}$	$\ln k$	$\ln t$	$E, \text{ Ку (теор.)}$
0	0	0	0			
3	9,55	0,391	0,153	1,099	2,257	0,213
6	15,35	0,568	0,323	1,792	2,731	0,330
9	20,11	0,662	0,438	2,197	3,001	0,427
12	24,42	0,725	0,525	2,485	3,195	0,512
15	28,39	0,774	0,599	2,708	3,346	0,590
18	32,17	0,803	0,645	2,890	3,471	0,662

21	35,86	0,823	0,677	3,045	3,580	0,729
24	39,46	0,838	0,702	3,178	3,675	0,794
27	43,02	0,852	0,726	3,296	3,762	0,855
30	46,5			3,401	3,839	0,914

На рисунке ниже показан график зависимости координаты от времени.



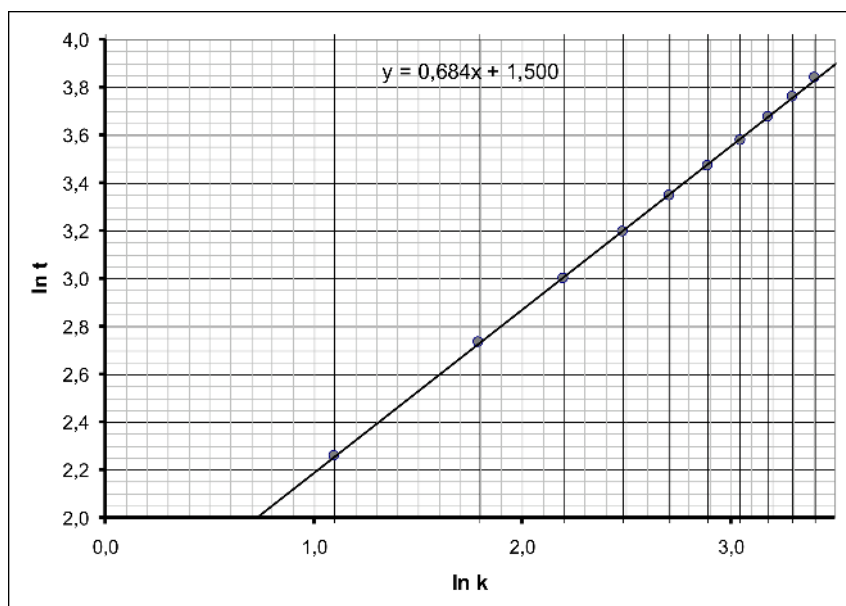
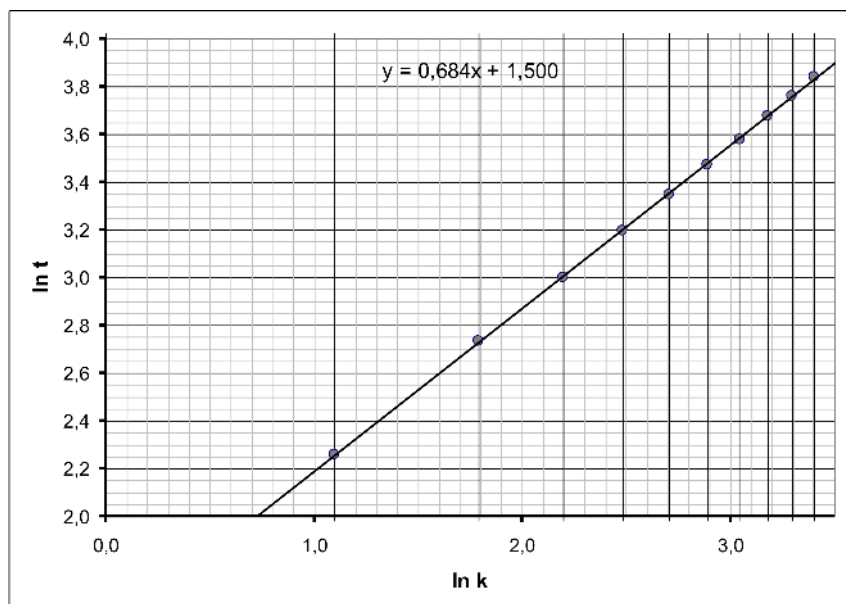
2.3 В таблице 1 приведены значения скоростей стержня V , рассчитанные по формуле, приведенной в условии задачи. Значения кинетической энергии рассчитаны по формуле $E = V^2$.
2.4 График полученной зависимости показан на рисунке (№1).



2.5 Потенциальная энергия при указанном нулевом уровне равна

$$U(k) = -E(k). \quad (11)$$

2.6 График зависимости времени движения от числа сделанных оборотов показан на рисунке ниже в логарифмическом масштабе.



2.7 Коэффициенты этой зависимости $\ln t = \alpha \ln k + \ln A$, рассчитанные по МНК равны

$$\alpha = 0,684 \pm 0,006, \quad (12)$$

$$\ln A = 1,50 \pm 0,02. \quad (13)$$

Расчет параметра A и его погрешности приводит к результатам

$$A = \exp(\ln A) = 4,48 \text{ Ки}, \quad (14)$$

$$\Delta A = A \Delta(\ln A) = \pm 0,07 \text{ Ки}. \quad (15)$$

2.8-2.9 Для расчета кинетической энергии следует воспользоваться формулой (5) с найденными численными значениями параметров. Результаты расчетов приведены в Таблице 1 и на графике п. 2.4 с обозначением №2.

Часть 3. Поэтапное зондирование

3.1-3.5 Результаты измерений, расчетов, графики и итоговый результат (рассчитанное значение изменения энергии E_{5-10}) для каждого интервала приведены ниже. Значения параметра α рассчитаны как коэффициент наклона графика

$$\alpha = \frac{\Delta(\ln t)}{\Delta(\ln k)}. \quad (16)$$

Удобно снять значения крайних точек на графике (точки пересечения с границами графика) – их значения указаны как z_{min} и z_{max} , тогда как $\Delta(\ln k) = 2,5$. Значение параметра $\ln A$ представляют собой значения координаты пересечения прямой с осью ординат. Для расчета изменения энергии используется формула

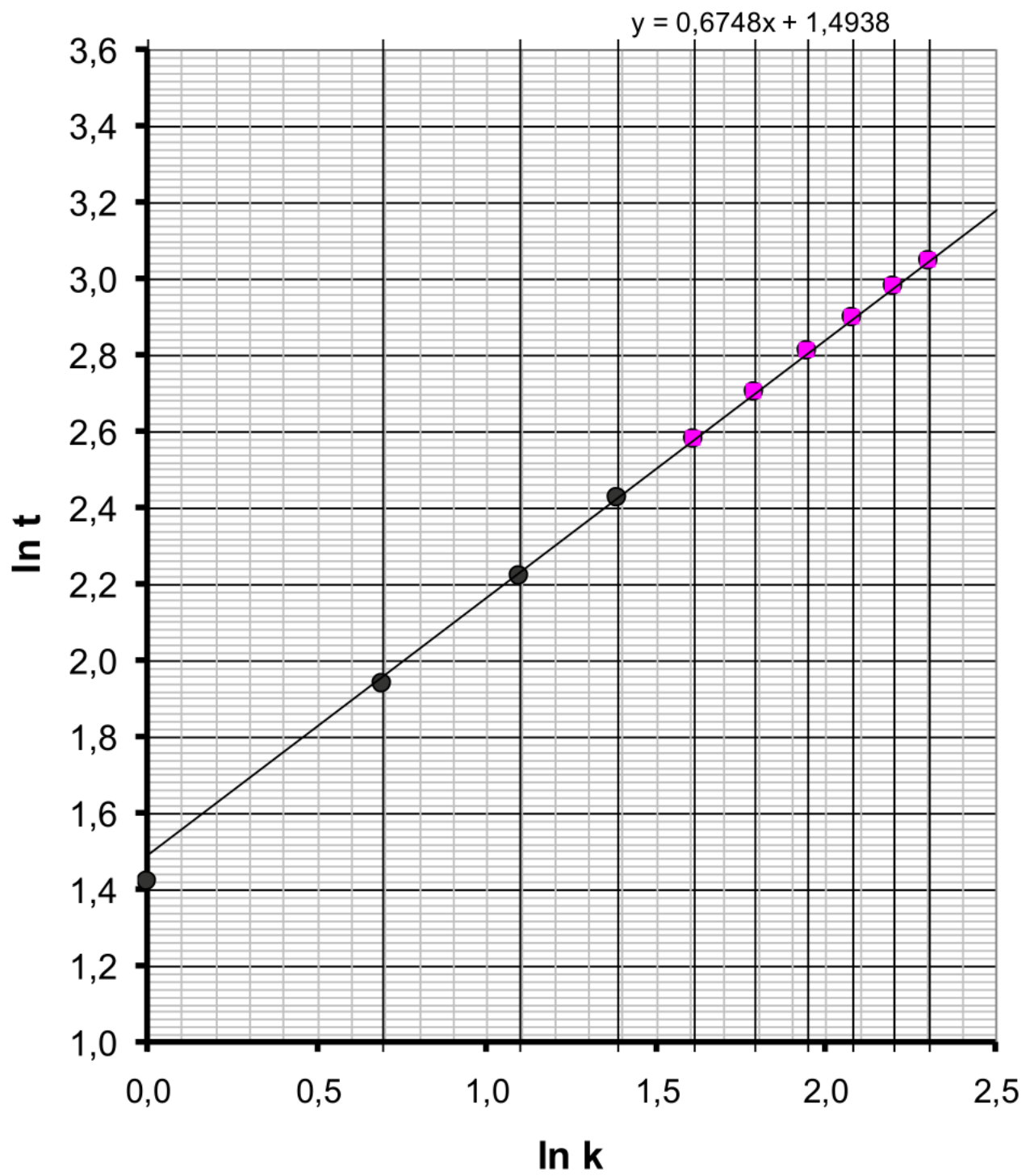
$$E_{5-10} = \left(\frac{10^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2 - \left(\frac{5^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2 = \left(\frac{5^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2 (4^{1-\alpha} - 1). \quad (17)$$

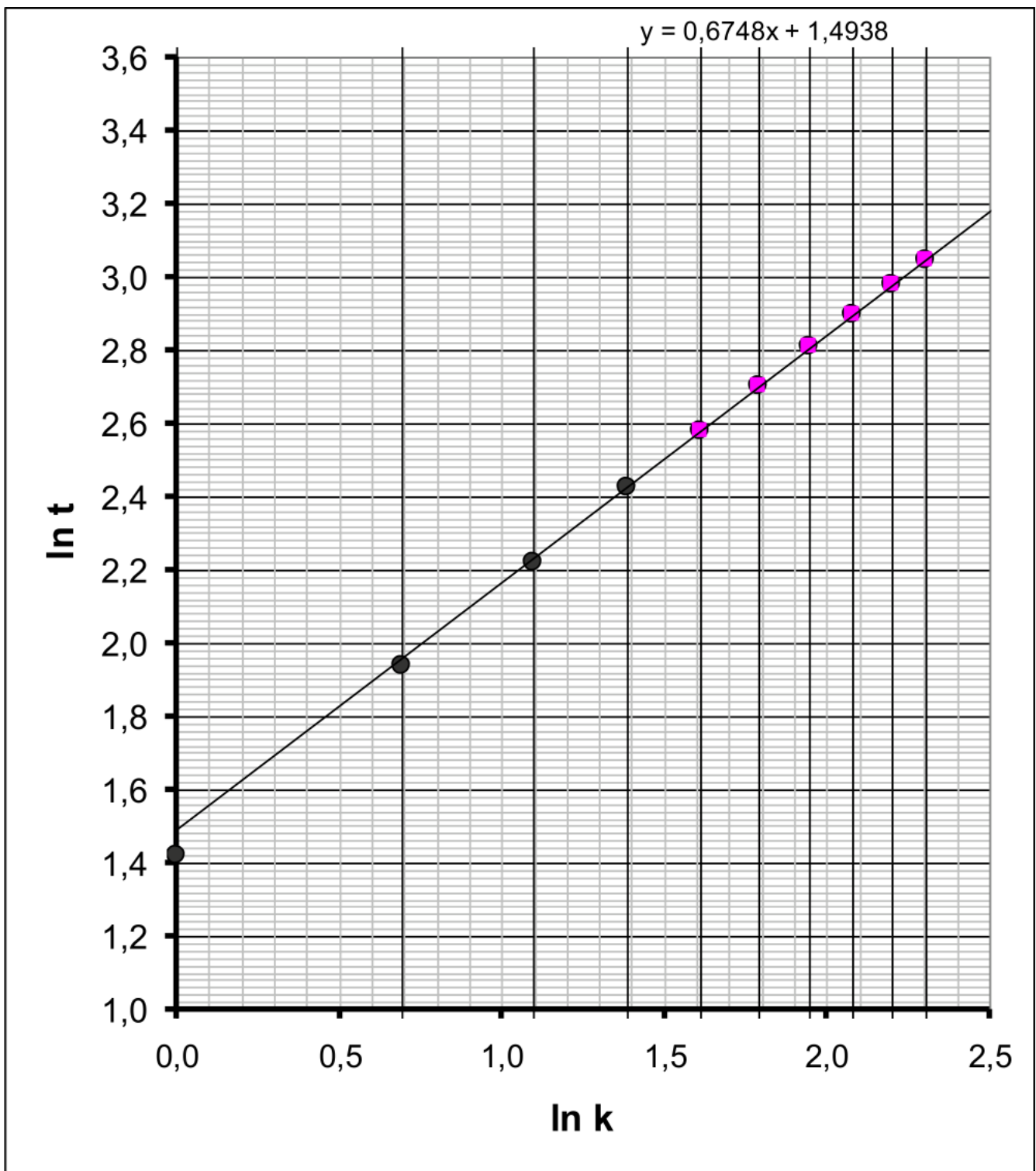
XXII Международная Жаутыковская Олимпиада/Экспериментальный тур с. 4/12

Интервал 35-25

k	$t, \text{с}$	$\ln k$	$\ln t$
0	0,00		
1	4,14	0,000	1,421
2	6,96	0,693	1,940
3	9,19	1,099	2,218
4	11,29	1,386	2,424
5	13,17	1,609	2,578
6	14,94	1,792	2,704
7	16,60	1,946	2,809
8	18,09	2,079	2,895
9	19,63	2,197	2,977
10	21,04	2,303	3,046

$$\alpha = 0,672 \quad \ln A = 1,500 \quad A = 4,482$$





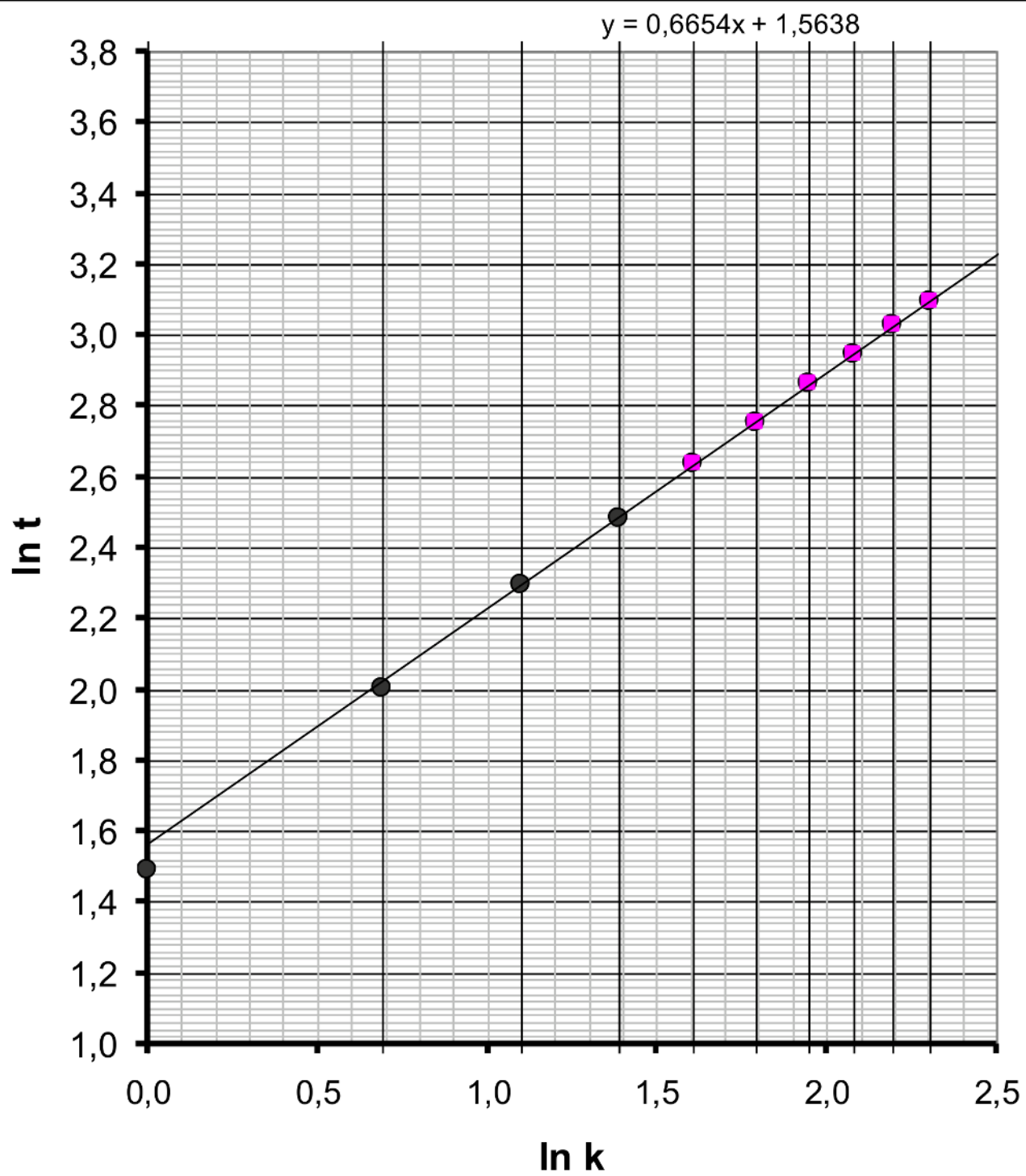
$z_{\max} = 3,18$ $z_{\min} = 1,50$

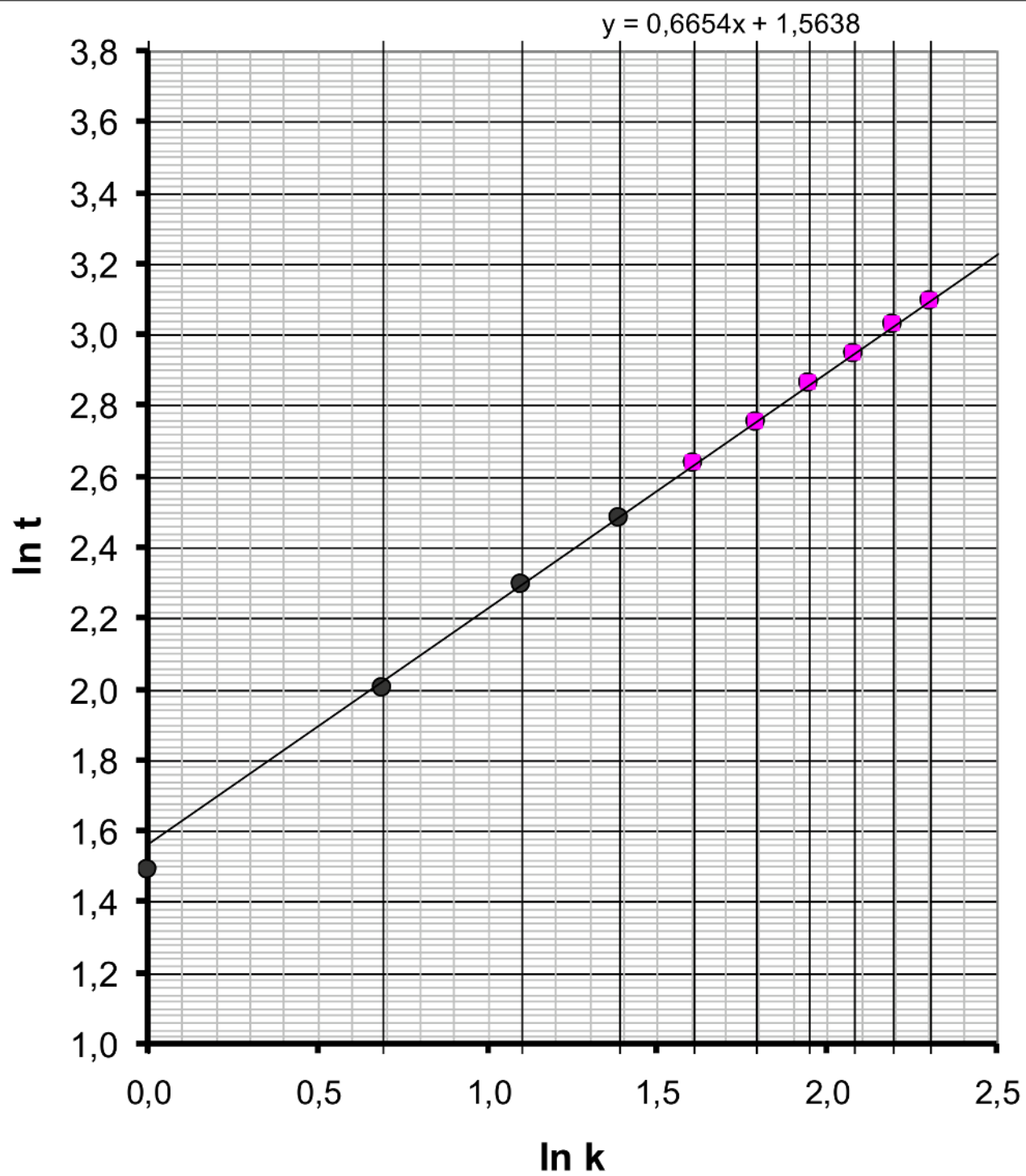
$$E_{5-10} = 0,182 \text{ Ки}$$

Интервал 30-20

k	$t, \text{с}$	$\ln k$	$\ln t$
0	0		
1	4,43	0,000	1,488
2	7,43	0,693	2,006
3	9,92	1,099	2,295
4	11,96	1,386	2,482
5	13,94	1,609	2,635
6	15,71	1,792	2,754
7	17,47	1,946	2,860
8	19,06	2,079	2,948
9	20,61	2,197	3,026
10	22,09	2,303	3,095

$$\alpha = 0,664 \ln A = 1,570 \quad A = 4,807$$





$z_{\max} = 3,23$ $z_{\min} = 1,57$

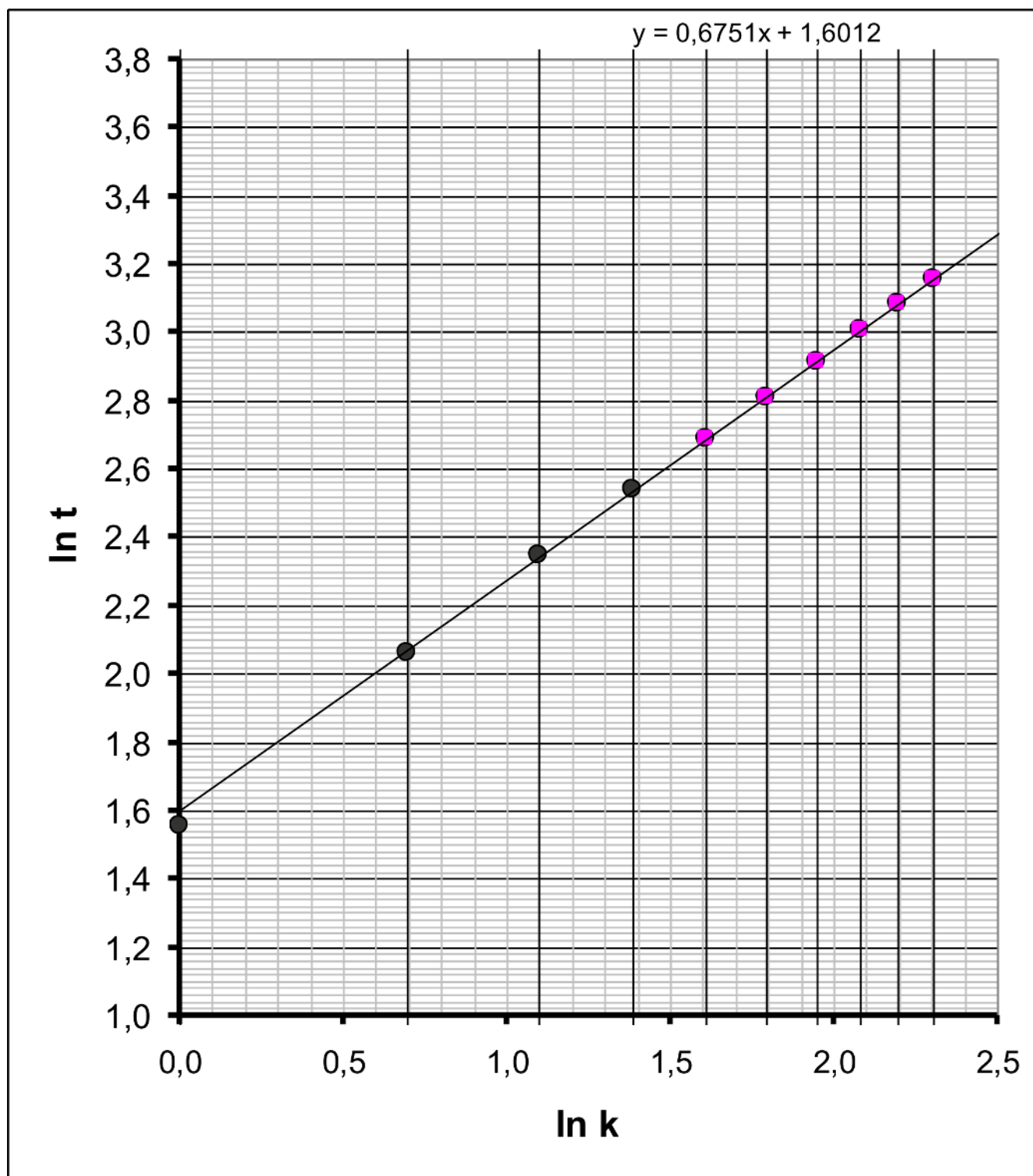
$$E_{5-10} = 0,172 \text{ Ки}$$

XXII Международная Жаутыковская Олимпиада/Экспериментальный тур с. 5/12

Интервал 25-15

k	$t, \text{с}$	$\ln k$	$\ln t$
0	0,00		
1	4,73	0,000	1,554
2	7,85	0,693	2,061
3	10,44	1,099	2,346
4	12,69	1,386	2,541
5	14,73	1,609	2,690
6	16,59	1,792	2,809
7	18,41	1,946	2,913
8	20,20	2,079	3,006
9	21,87	2,197	3,085
10	23,48	2,303	3,156

$$\alpha = 0,680 \quad \ln A = 1,600 \quad A = 4,953$$



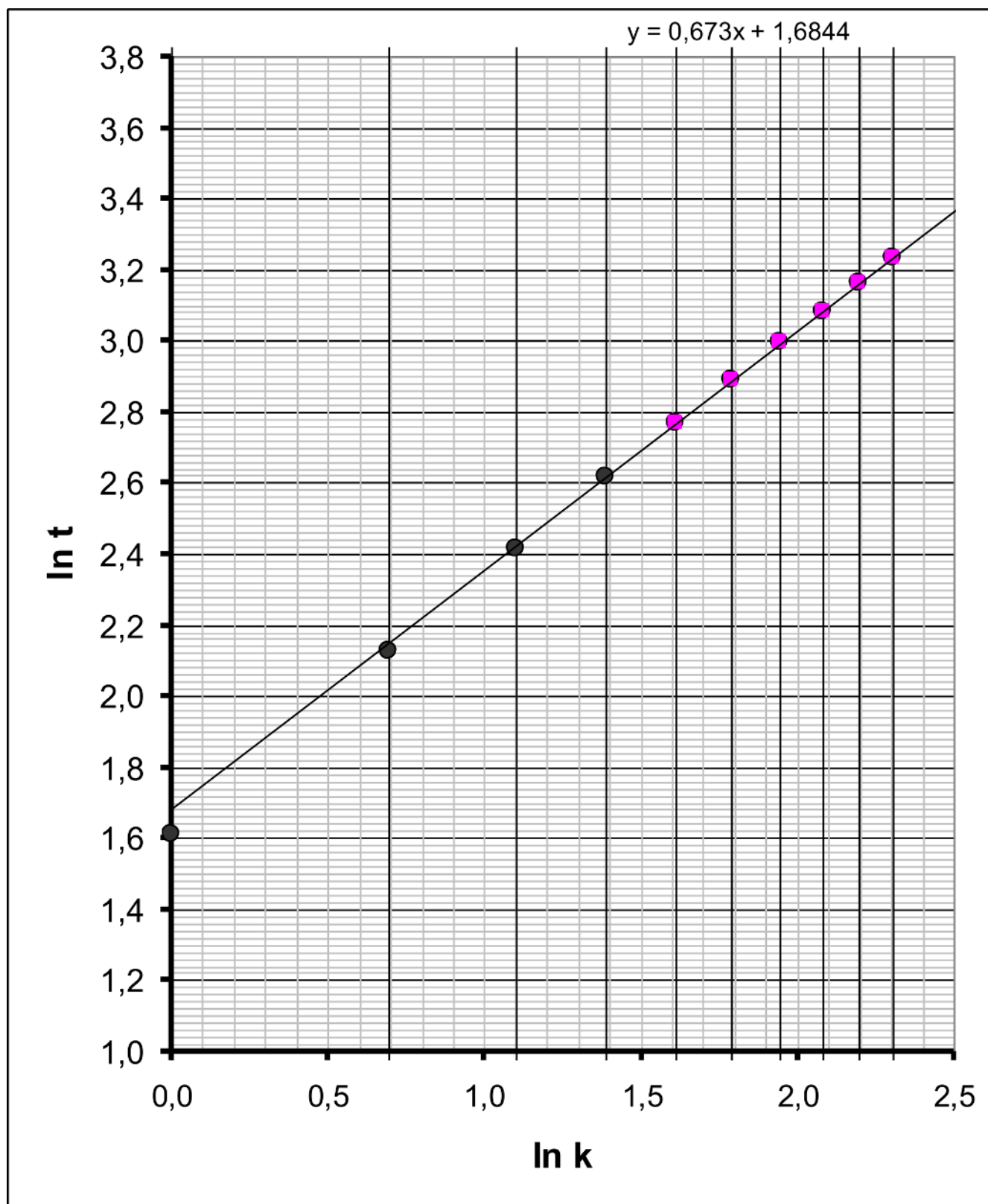
$z_{\max} = 2,23$ $z_{\min} = 0,57$

$$E_{5-10} = 0,138 \text{ Ky}$$

Интервал 20-10

k	$t, \text{с}$	$\ln k$	$\ln t$
0	0		
1	5,01	0,000	1,611
2	8,38	0,693	2,126
3	11,19	1,099	2,415
4	13,67	1,386	2,615
5	15,92	1,609	2,768
6	17,98	1,792	2,889
7	19,99	1,946	2,995
8	21,86	2,079	3,085
9	23,61	2,197	3,162
10	25,39	2,303	3,234

$$\alpha = 0,672 \quad \ln A = 1,680 \quad A = 5,366$$



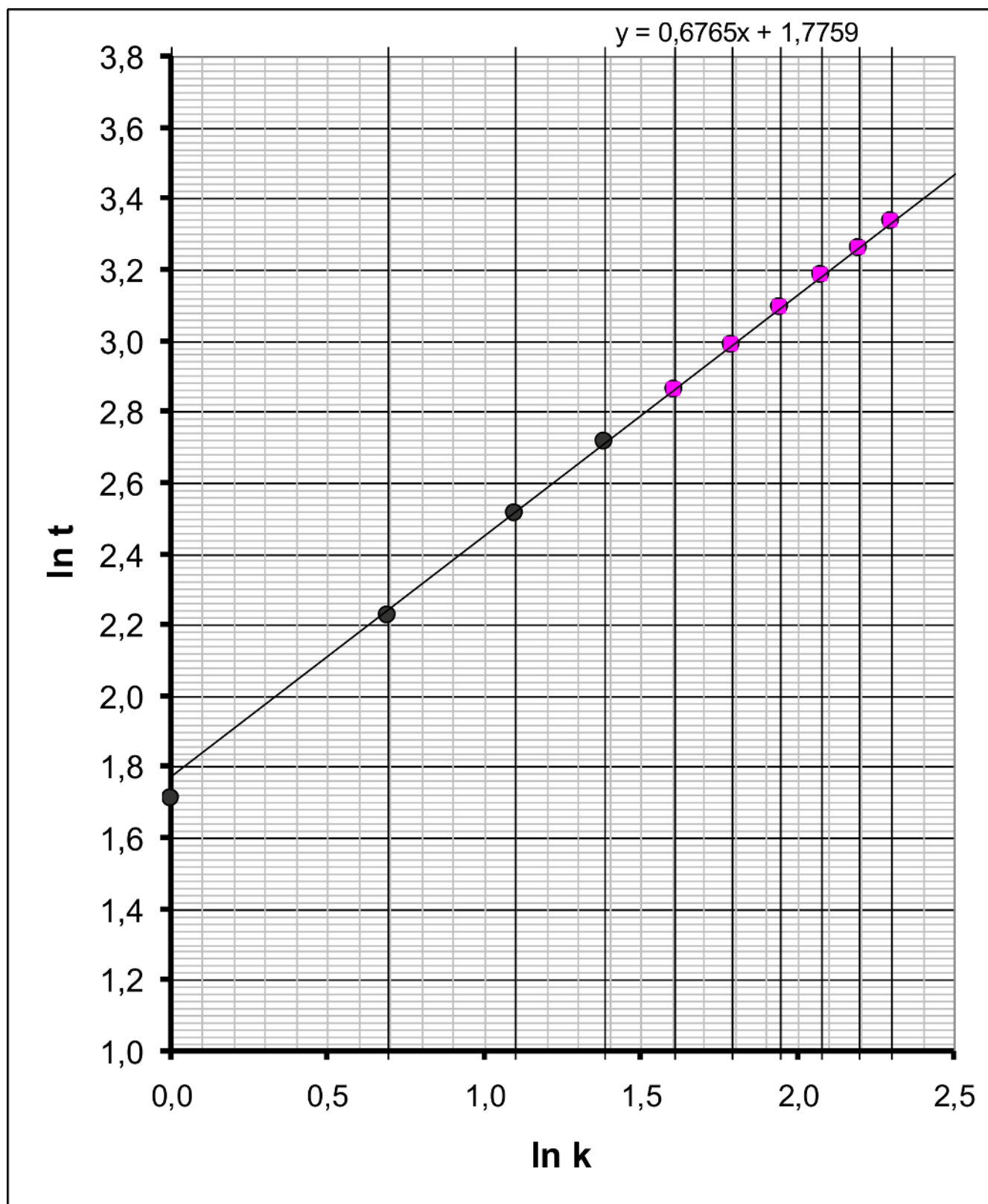
$z_{\max} = 3,30$ $z_{\min} = 1,60$

$$E_{5-10} = 0,127 \text{ Ky}$$

Интервал 15-5

k	$t, \text{с}$	$\ln k$	$\ln t$
0	0		
1	5,55	0,000	1,714
2	9,28	0,693	2,228
3	12,33	1,099	2,512
4	15,08	1,386	2,713
5	17,53	1,609	2,864
6	19,86	1,792	2,989
7	22,04	1,946	3,093
8	24,13	2,079	3,183
9	26,07	2,197	3,261
10	28,05	2,303	3,334

$$\alpha = 0,676 \quad \ln A = 1,780 \quad A = 5,930$$



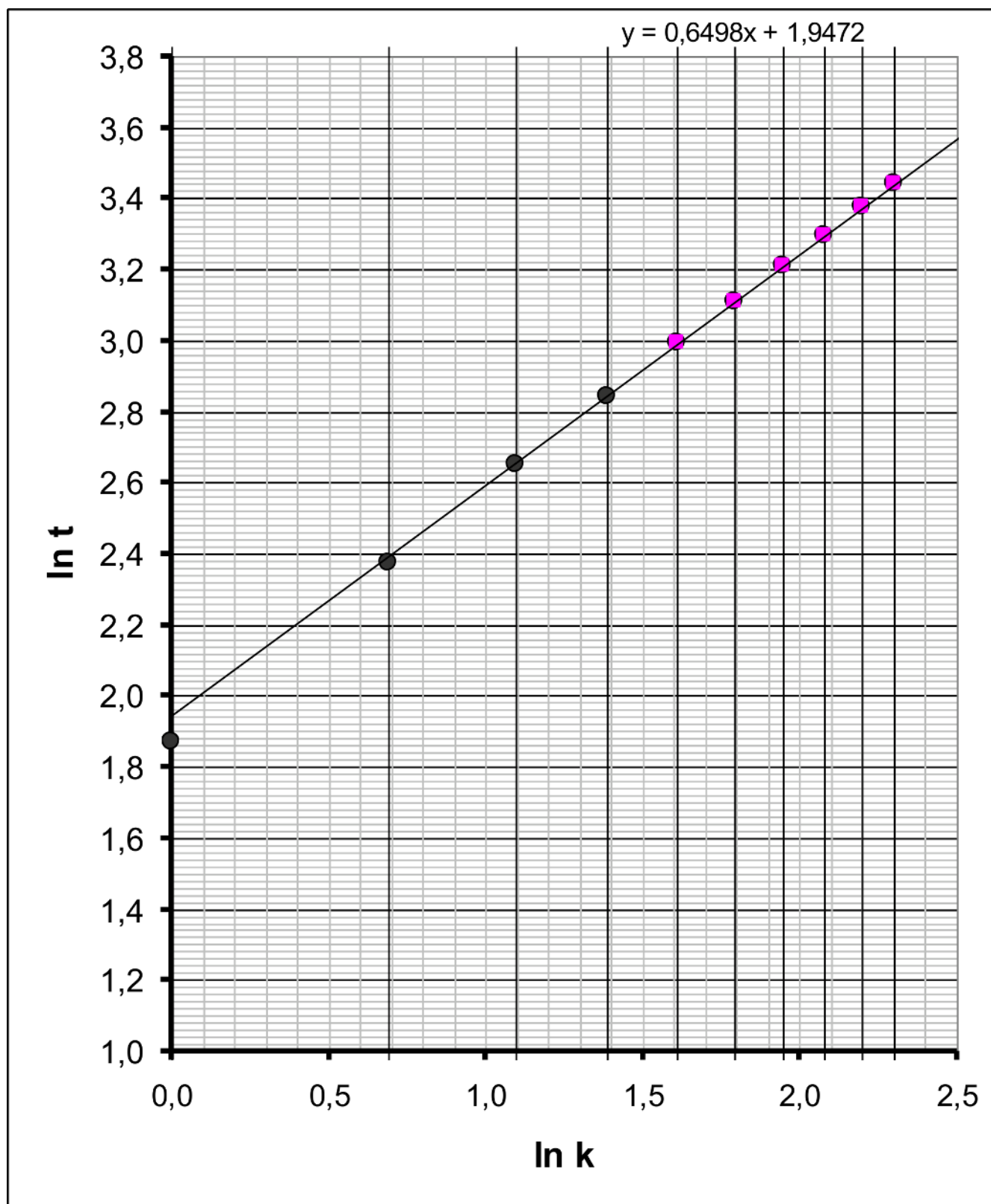
$z_{\max} = 3,47$ $z_{\min} = 1,78$

$E_{5-10} = 0,100$ Ku

Интервал 10-0

k	$t, \text{с}$	$\ln k$	$\ln t$
0	0		
1	6,48	0,000	1,869
2	10,74	0,693	2,374
3	14,16	1,099	2,650
4	17,16	1,386	2,843
5	19,94	1,609	2,993
6	22,44	1,792	3,111
7	24,84	1,946	3,212
8	27,08	2,079	3,299
9	29,28	2,197	3,377
10	31,23	2,303	3,441

$$\alpha = 0,648 \quad \ln A = 1,950 \quad A = 7,029$$



$z_{\max} = 2,57$ $z_{\min} = 0,95$

$E_{5-10} = 0,094 \text{ } Ku$

XXII Международная Жаутыковская Олимпиада/Экспериментальный тур с. 7/12

Экспериментальный тур.

3.6 Итоговая таблица выглядит следующим образом.

Верхняя граница N	Нижняя граница N	E_{5-10}, Ku	N	k	$E(k)$
35	25	0,182		0	0
30	20	0,172	30	5	0,182
25	15	0,138	25	10	0,354
20	10	0,127	20	15	0,492
15	5	0,100	15	20	0,619
10	0	0,094	10	25	0,719
			5	30	0,814

Значения $E(k)$ получены посредством поэтапного суммирования:

$$\begin{aligned} E_0 &= 0 \\ E(k+5) &= E(k) + E_{5-10} \end{aligned} \quad (18)$$

График данной зависимости №3 приведен на графике п.2.4.

Часть 4. Время раскручивания

4.1 Таблица результатов измерений представлена ниже.

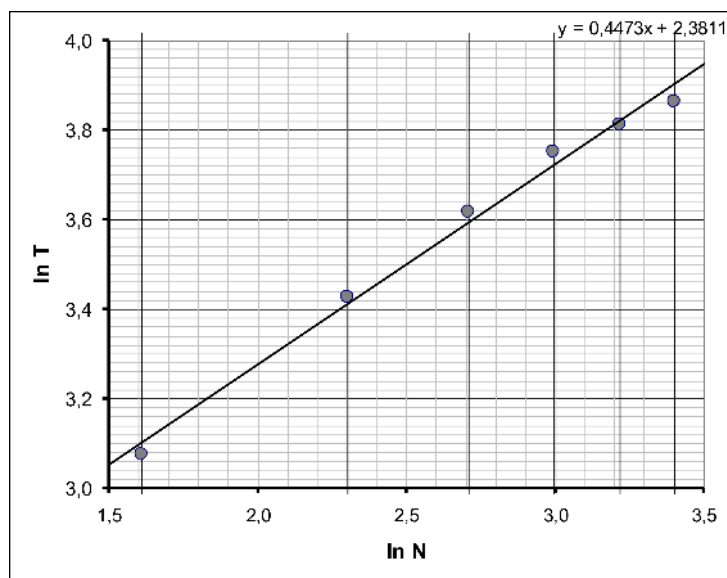
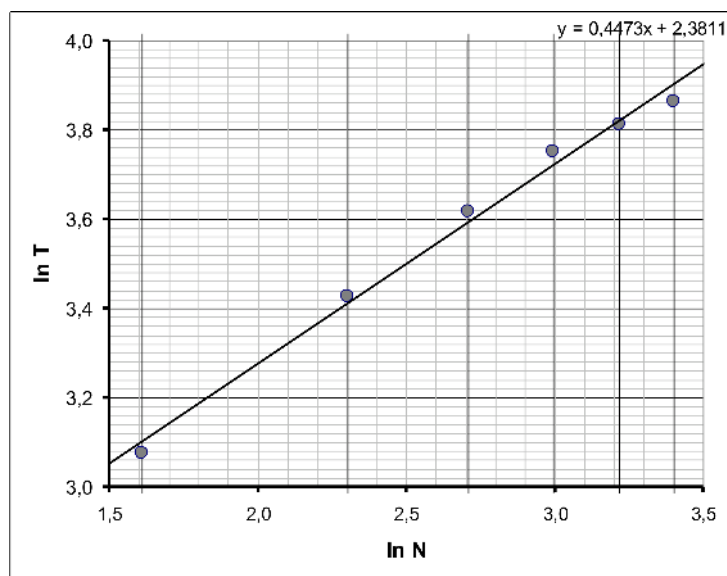
N	T, c		$\ln N$	$\ln T$	N	k	$E(k)$
30	47,63		3,40	3,86		0	0,000
25	45,30		3,22	3,81	30	5	0,149
20	42,62		3,00	3,75	25	10	0,294
15	37,25		2,71	3,62	20	15	0,436
10	30,81		2,30	3,43	15	20	0,572
5	21,65		1,61	3,07	10	25	0,702
					5	30	0,814

4.2. Для оценки погрешности измерения времени раскручивания необходимо провести несколько измерений. Расчет случайной погрешности строго проводится по формуле

$$\Delta T = t_{n,p} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} \quad (19)$$

и составляет несколько сотых долей секунды.

4.3 График зависимости времени раскручивания от начального числа оборотов показан на рисунке.



4.4 Значение показателя степени может быть найдено, как по графику, так и по МНК. Его значение равно

$$\gamma = 0,45. \quad (20)$$

4.5 Показатель степени в формуле для потенциальной энергии равен

$$\beta = 2(1 - \gamma) = 1,10. \quad (21)$$

4.6 Для расчета кинетической энергии необходимо: а) по формуле $U' = N^\beta$ рассчитать значения потенциальной энергии; б) по этим значениям рассчитать значения кинетической энергии (с точностью до коэффициента)

$$E'(k) = U'(30) - U'(N - k). \quad (22)$$

в) провести нормировку энергии

$$E(k) = \frac{E(30)}{E'(30)} E'(k), \quad (23)$$

где $E(30)$ - значение кинетической энергии, найденное в части 3 задания (по нашим измерениям $E(30) = 0,814$). Результаты расчетов приведены в таблице 4.1. График №4 приведен на графике п.2.4.

XXII Международная Жаутыковская Олимпиада/Экспериментальный тур с. 9/12

Схема оценивания Правильные расчеты по неправильным формулам не оцениваются! За неверное округление – штраф (-0,2 балла)

Пункт	Содержание	Баллы	Всего за пункт
Часть 1. Теоретическое введение			
1.1	Формула (2): $E = \pi^2 \left(\frac{m_1 a^2}{6} + m_2 h^2 \right) V^2$	0,2	0,5
	Измерены $a = (25 \pm 1)$ см и $h = (15 \pm 1)$ см	0,2	
	Численное значение в формуле (3): $1 \text{ Ку} \approx 6,35 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$	0,1	
1.2	Формула (4): $V(k) = \frac{k^2 - \alpha}{\alpha A}$	0,3	0,5
	Формула (5): $E(k) = \left(\frac{k^2 - \alpha}{\alpha A} \right)^2$	0,2	
1.3	Интеграл (7): $T = \int_0^N \frac{dk}{V(k)}$	0,2	0,6
	Формула (9): $T(N) = N^{1-\frac{q}{2}} \sqrt{\frac{1}{B} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^q}}}$	0,3	
	Показатель степени (10): $\gamma = 1 - \frac{2}{q}$	0,1	
Часть 2. Изучение закона движения			
2.1	Проведены измерения времен $0,1 \times 10$ В пределах 10% $0,1 \times 10$ (В пределах 20% $0,05 \times 10$)	1	1
<i>Пункты 2.2 – 2.4 и 2.6 – 2.9 оцениваются, если оценен п. 2.1</i>			
2.2	Построение графика $k(t)$:		0,3
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,2	
	проведена сглаживающая линия	0,1	
2.3	Проведены расчеты кинетической энергии	0,4	0,4
2.4	Построение графика $E(k)$		
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,2	
	проведена сглаживающая линия	0,1	
2.5	Формула (11) для потенциальной энергии: $U(k) = -E(k)$	0,2	0,2
2.6	Построение графика $\ln t$ от $\ln k$:		
	рассчитаны логарифмы времен	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,2	
	проведена сглаживающая прямая	0,1	
2.7	Расчет параметров зависимости		0,9
	использован МНК	0,2	
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,68 \pm 0,05$ *(в диапазоне $\alpha = 0,68 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,2	
	погрешность $\Delta \alpha$	0,1	
	численное значение в диапазоне $A = 4,5 \pm 0,3$ *(в диапазоне $A = 4,5 \pm 0,6 - 0,1$)*	0,2	
	погрешность A (формула - число)	0,2	
2.8	Расчет значений энергии $E(k)$ «теор»		0,5
2.9	Построение графика $E(k)$ (оценивается, если оценен п.2.8)		0,3
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,2	
	проведена сглаживающая линия	0,1	

Часть 3. Поэтапное зондирование			
<i>на всех этапах пункты 3.2 – 3.5 оцениваются, если оценены результаты измерений соответствующего п.3.1</i>			
Интервал 35-25			
3.1	Проведены измерения В пределах 10% - 0,3 (В пределах 20% - 0,1)		0,3
3.2	Построение графика		0,2
	расчет $\ln t$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,1	
3.3	проведена сглаживающая прямая		0,1
3.4	Расчет параметров		0,8
	формула для α : $\alpha = \frac{\Delta(\ln t)}{\Delta(\ln k)}$	0,1	
	формула для A: $A = \exp(\ln A)$	0,1	
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,67 \pm 0,06$ *(в диапазоне $\alpha = 0,67 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	
	численное значение в диапазоне $A = 4,5 \pm 0,03$ *(в диапазоне $A = 4,5 \pm 0,06 - 0,1$)*	0,3	
3.5	Расчет энергии		0,5
	формула (17): $E_{5-10} = \left(\frac{10^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2 - \left(\frac{5^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2 = \left(\frac{5^{1-\alpha}}{\alpha A} \right)^2 (4^{1-\alpha} - 1)$	0,2	
	Численное значение в диапазоне $E_{5-10} = 0,18 \pm 0,06$ *(в диапазоне $E_{5-10} = 0,18 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	
Интервал 30-20			
3.1	Проведены измерения В пределах 10% - 0,3 (В пределах 20% - 0,1)		0,3
3.2	Построение графика		0,2
	расчет $\ln(t)$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,1	
3.3	проведена сглаживающая прямая		0,1
3.4	Расчет параметров		0,6
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,66 \pm 0,06$ *(в диапазоне $\alpha = 0,66 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	
	численное значение в диапазоне $A = 4,8 \pm 0,03$ *(в диапазоне $A = 4,8 \pm 0,06 - 0,1$)*	0,3	
3.5	Численное значение в диапазоне $E_{5-10} = 0,17 \pm 0,06$ *(в диапазоне $E_{5-10} = 0,17 \pm 0,10 - 0,1$)*		0,3
Интервал 25-15			
3.1	Проведены измерения В пределах 10% - 0,3 (В пределах 20% - 0,1)		0,3
3.2	Построение графика		0,2
	расчет $\ln(t)$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,1	
3.3	проведена сглаживающая прямая		0,1
3.4	Расчет параметров		0,6
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,68 \pm 0,06$ *(в диапазоне $\alpha = 0,68 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	

XXII Международная Жаутыковская Олимпиада/Экспериментальный тур с. 11/12

	численное значение в диапазоне $A = 4,95 \pm 0,03$ *(в диапазоне $A = 4,95 \pm 0,06 - 0,1$)*	0,3	
3.5	Численное значение в диапазоне $E_{5-10} = 0,14 \pm 0,06$ *(в диапазоне $E_{5-10} = 0,14 \pm 0,10 - 0,1$)*		0,3
	<i>Интервал 20-10</i>		
3.1	Проведены измерения В пределах 10% - 0,3 (<i>В пределах 20% - 0,1</i>)		0,3
3.2	Построение графика		0,2
	расчет $\ln(t)$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,1	
3.3	проведена сглаживающая прямая		0,1
3.4	Расчет параметров		0,6
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,67 \pm 0,06$ *(в диапазоне $\alpha = 0,67 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	
	численное значение в диапазоне $A = 5,36 \pm 0,03$ *(в диапазоне $A = 5,36 \pm 0,06 - 0,1$)*	0,3	
3.5	Численное значение в диапазоне $E_{5-10} = 0,13 \pm 0,06$ *(в диапазоне $E_{5-10} = 0,13 \pm 0,10 - 0,1$)*		0,3
	<i>Интервал 15-5</i>		
3.1	Проведены измерения В пределах 10% - 0,3 (<i>В пределах 20% - 0,1</i>)		0,3
3.2	Построение графика		0,2
	расчет $\ln(t)$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,1	
3.3	проведена сглаживающая прямая		0,1
3.4	Расчет параметров		0,6
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,67 \pm 0,06$ *(в диапазоне $\alpha = 0,67 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	
	численное значение в диапазоне $A = 5,93 \pm 0,03$ *(в диапазоне $A = 5,93 \pm 0,06 - 0,1$)*	0,3	
3.5	Численное значение в диапазоне $E_{5-10} = 0,10 \pm 0,06$ *(в диапазоне $E_{5-10} = 0,10 \pm 0,10 - 0,1$)*		0,3
	<i>Интервал 10-0</i>		
3.1	Проведены измерения В пределах 10% - 0,3 (<i>В пределах 20% - 0,1</i>)		0,3
3.2	Построение графика		0,2
	расчет $\ln(t)$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,1	
3.3	проведена сглаживающая прямая		0,1
3.4	Расчет параметров		0,6
	численное значение в диапазоне $\alpha = 0,65 \pm 0,06$ *(в диапазоне $\alpha = 0,65 \pm 0,10 - 0,1$)*	0,3	
	численное значение в диапазоне $A = 7,03 \pm 0,03$ *(в диапазоне $A = 7,03 \pm 0,06 - 0,1$)*	0,3	
3.5	Численное значение в диапазоне $E_{5-10} = 0,09 \pm 0,06$ *(в диапазоне $E_{5-10} = 0,09 \pm 0,10 - 0,1$)*		0,3

3.6	Расчет зависимости энергии от координаты		0,9
	формулы (18): $E_0 = 0$ $E(k+5) = E(k) + E_{5-10}$	0,2	
	Проведен расчет энергий	0,4	
	Построение графика №3	0,3	
Часть 4. Время раскручивания			
4.1	Проведены измерения времен 0,2х6 в пределах 10% 0,2х6 (<i>в пределах 20% 0,1х6</i>)		1,2
<i>пункты 4.3 – 4.5 и 4.7 оцениваются, если оценены результаты измерений в п 4.1</i>			
4.2	Оценка погрешности измерения времени		0,6
	проведено 5-7 измерений (допустимая погрешность – 10%) (<i>3-4 измерения – 0,1</i>)	0,3	
	проведено усреднение	0,1	
	оценена погрешность по любой правильной формуле	0,2	
4.3	Построение графика $T(N)$:		0,4
	рассчитаны $\ln T$	0,1	
	точки нанесены в соответствии с таблицей	0,2	
	проведена сглаживающая прямая	0,1	
4.4	Определен показатель степени $\gamma = 0,45 \pm 0,03$ *(в диапазоне $\gamma = 0,45 \pm 0,06 - 0,1$)*		0,3
4.5	Рассчитано значение $\beta = 2(1 - \gamma)$		0,2
4.6	Расчет энергий		0,8
	Методика расчета		
	расчет потенциальной энергии	0,1	
	расчет кинетической энергии (22): $E^*(k) = U^*(30) - U^*(N - k)$	0,1	
	нормировка по формуле (23): $E(k) = \frac{E(30)}{E^*(30)} E^*(k)$	0,1	
	проведены расчеты энергии	0,5	
4.7	построение графика №4	0,3	0,3
	ВСЕГО		20