

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»



Н. Н. Попок, Г. И. Гвоздь

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Методические указания  
к учебно-исследовательской лабораторной работе  
по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»  
для студентов специальности 1-36 07 02  
«Производство изделий на основе трехмерных технологий»

*Текстовое электронное издание*

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой  
2022

УДК 621.1 (075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией  
механико-технологического факультета в качестве методических указаний  
(протокол № 14 от 29.06.2022)

Кафедра «Технология и оборудование машиностроительного производства»

РЕЦЕНЗЕНТ:

канд. техн. наук, доц., доц. каф. «Технология и оборудование  
машиностроительного производства»

А. М. ДОЛГИХ

Для создания текстового электронного издания «Определение зависимости теплоемкости твердых тел, жидкостей и газов от температуры» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Николай Николаевич ПОПОК  
Галина Игоревна ГВОЗДЬ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОЕМКОСТИ  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Методические указания  
к учебно-исследовательской лабораторной работе  
по дисциплине «Термодинамика и термопередача»  
для студентов специальности 1-36 07 02  
«Производство изделий на основе трехмерных технологий»

Редактор *А. А. Прадидова*

---

Подписано к использованию 04.10.2022.

Объем издания: 1,00 Мб. Заказ 537.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	5
2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	5
3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ИТ-С-400 .....	6
4. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ.....	8
5. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ .....	10
6. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ .....	12
7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА .....	12
8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	12
Приложение А .....	13
Приложение Б.....	14

## 1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

*Цель работы* – определение теплоемкости твердых тел, жидкостей и газов.

Рекомендуется выполнять работу в следующем порядке:

1. Ознакомиться с физическими основами теплоемкости тел.
2. Изучить устройство и принцип работы прибора ИТ-С-400.
3. Получить у преподавателя испытуемый образец.
4. Измерить диаметр и высоту образца. Точность измерения  $\pm 0,1$  мм.
5. Образец взвесить на аналитических весах с точностью до 0,01 г.
6. Вычислить объем и плотность образца, значения занести в таблицу 1 (приложение А).
7. Провести экспериментальные измерения, заполнить протокол исследований (таблица 2, приложение А).
8. Сопоставить полученные результаты со справочными данными (приложение Б), построить график зависимости, сделать выводы.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплоемкость – это отношение количества теплоты, сообщаемого телу (системе), к суммарной температуре этого тела.

Удельная теплоемкость – это количество теплоты, которое необходимо сообщить единице количества вещества, чтобы увеличить его температуру на один градус:

$$c = \frac{dq}{dT}, \quad (1)$$

где  $dq$  – элементарное количество теплоты;

$dT$  – изменение абсолютной температуры вещества в данном теле.

Различают массовую теплоемкость  $c$ , отнесенную к 1 кг, Дж/(кг·К), объемную теплоемкость  $c'$ , отнесенную к 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях, Дж/(м<sup>3</sup>·К) и мольную теплоемкость  $\mu c$ , отнесенную к 1 молю газа, Дж/(моль·К).

В зависимости от характера термодинамического процесса удельная теплоемкость изменяется следующим образом:

– в изотермическом процессе при  $T=const$  и  $dT=0$  –  $c_T = \infty$ ;

– в адиабатическом процессе при  $dq=0$  и  $q=0$  –  $c_q=0$ ;

– в изохорном процессе при  $v=const$  –  $c_v = \frac{du}{dT} = \frac{du}{T_2 - T_1}$ ,

где  $du$  – изменение внутренней энергии;

$T_2$  и  $T_1$  – соответственно конечное и начальное изменение абсолютной температуры газа;

– в изобарном процессе при  $p=const$  –  $c_p = c_v + l$ ,

где  $l$  – работа.

Для идеальных газов:  $c_p - c_v = R$ .

Для реальных газов:  $c_p - c_v > R$ ,

где  $R = \frac{8314,2}{\mu}$  – газовое расстояние, Дж/кг·град.

В общем случае теплоемкость есть функция температуры. Различают линейную и гиперболическую зависимости теплоемкости от температуры.

Для реальных газов зависимость теплоемкости от температуры описывается следующим уравнением:

$$c(T) = a + bT + dT^2, \quad (2)$$

где  $a, b, d$  – некоторые постоянные коэффициенты температуры;

$T$  – температура.

В соответствии с формулой (1) количество теплоты:

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT, \quad (3)$$

или

$$q = \int_0^{T_2} c(T) dT - \int_0^{T_1} c(T) dT = c \int_0^{T_2} T_2 - c \int_0^{T_1} T_1, \quad (4)$$

средняя теплоемкость:

$$c = \frac{c \int_0^{T_2} T_2 - c \int_0^{T_1} T_1}{T_2 - T_1}. \quad (5)$$

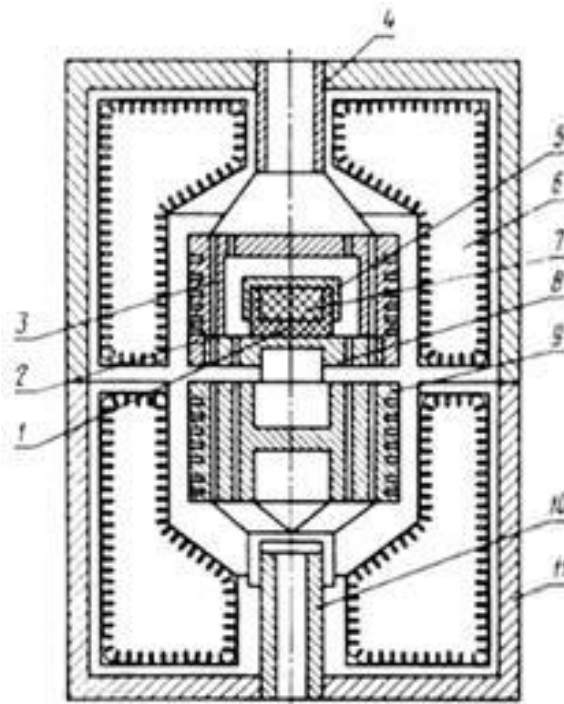
### 3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ИТ-С-400

Автоматизированная установка измерения теплоемкости ИТ-С-400 предназначена для исследования температурной зависимости удельной теплоемкости твердых тел, сыпучих, волокнистых материалов и жидкостей с плотностью не менее  $800 \text{ кг/м}^3$ . Установка рассчитана на проведение теплофизических исследований в лабораторных условиях.

Технические характеристики:

- диапазон измерения объемной теплоемкости: не менее  $1 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);
- температурный диапазон измерения: от +20 до +400 °С;
- диаметр образца:  $15 \pm 0,1$  мм;
- высота образца:  $15 \pm 0,5$  мм;
- продолжительность измерений во всем температурном диапазоне: не более 2,5 ч.

Важнейшей частью измерительного блока является измерительная ячейка (рисунок 1).



- 1 – термомер с ампулой; 2 – адиабатная оболочка; 3 – термопара (4 шт.);  
4 – входной патрубок; 5 – крышка; 6 – теплозащитная оболочка; 7 – образец;  
8 – основание; 9 – нагревательный блок; 10 – выходной патрубок; 11 – корпус**

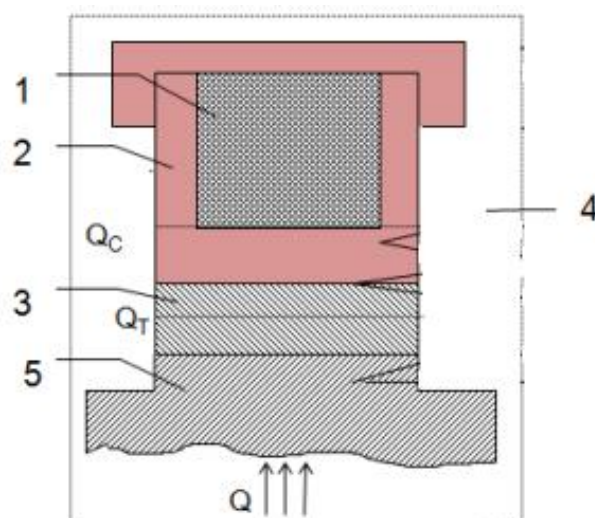
**Рисунок 1. – Конструкция измерительной ячейки прибора ИТ-С-400**

Измерительная ячейка закрывается охранным колпаком – верхней половиной корпуса. Ячейка охлаждается до заданной минимальной температуры жидким азотом, проходящим через отверстия в охранным колпаке, основании и нагревательном блоке. После достижения заданной минимальной температуры включается нагреватель, и измерительная ячейка начинает постепенно разогреваться до максимальной заданной для каждого образца температуры. В процессе разогрева в охранным колпаке при помощи нагревателя поддерживаются адиабатические условия (нулевая разность температур) между ячейкой и колпаком.

Для контроля работы нагревателя используются хромель-алюмелевые термопары, установленные в ячейке и охранном колпаке. В процессе эксперимента производится измерение температуры на основании, затем при постоянном измерении температуры ячейки определяется время задержки развития температуры в ячейке от развития температуры основания. Для автоматического регулирования работы охранного колпака и регулирования скорости нагрева измерительной ячейки используется блок питания и регулирования установки ИТ-С-400.

#### 4. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Тепловая схема измерителя теплоемкости ИТ-С-400 представлена на рисунке 2.



1 – образец испытуемый; 2 – ячейка; 3 – тепломер;  
4 – адиабатическая оболочка; 5 – нагреватель

Рисунок 2. – Тепловая схема измерителя теплоемкости ИТ-С-400

При проведении измерения испытуемый образец 1, помещенный внутри металлической ячейки 2 и накрытый колпаком, нагревают с помощью нагревателя 5. Тепловой поток  $Q$  поступает к ампуле через тепломер 3. Для того чтобы тепловая связь ампулы и образца с внешней средой осуществлялась только через тепломер, открытые участки поверхности ампулы изолированы от среды адиабатической оболочкой 4.

Поток теплоты в ячейку с образцом направляется только через нижний тепломер. Утечки теплоты и линейность потока обеспечиваются адиабатической оболочкой 4, которой закрыты все стороны ячейки, кроме нижней.



Поток теплоты  $Q_T$ , поступающий через нижний тепломер, расходуется на разогрев испытываемого образца и ячейки и определяется по формуле:

$$Q_T = Q_o + Q_я, \quad (1)$$

где  $Q_o$  – поток, расходуемый на нагрев образца, Вт;

$Q_я$  – поток, расходуемый на нагрев ячейки, Вт.

Значение  $Q_o$ , расходуемое на нагрев образца, выражается следующим образом:

$$Q_o = cm_o b, \quad (2)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·К);

$m_o$  – масса образца, кг;

$b$  – скорость разогрева, К/с.

Значение  $Q_я$ , расходуемое на разогрев ячейки, выражается следующим образом:

$$Q_я = C_я b, \quad (3)$$

где  $C_я$  – теплоемкость ячейки, Дж/К.

Величина потока теплоты, проводимого тепломером  $Q_T$ , выражается через перепад температуры на сторонах тепломера  $U_T$  и постоянной тепловой проводимости  $K_T$ , находимой в процессе проведения градуировочных экспериментов:

$$Q_T = K_T U_T. \quad (4)$$

Этот параметр  $K_T$  по сути является постоянной прибора и зависит только от температурного уровня. Выражение для расчета теплоемкости образца имеет вид:

$$c = \frac{1}{m_o} \left( \frac{K_T U_T}{b} - c_я \right), \quad (5)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·К).

Время задержки температуры на тепломере при условии, что перепад температуры достаточно мал, выражается следующим образом:

$$\tau_T = \frac{U_T}{b}, \quad (6)$$

где  $\tau_T$  – время задержки температуры на тепломере, с.

Учитывая это, расчетная формула теплоемкости принимает вид:

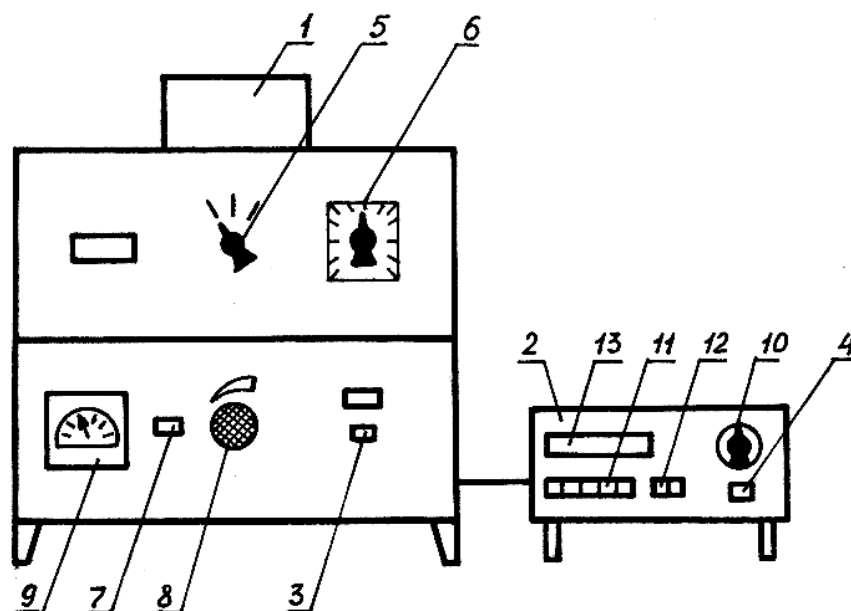
$$c = \frac{K_T}{m_o (\tau_T - \tau_T^o)}, \quad (7)$$

где  $\tau_T^o$  – время задержки температуры на тепломере, получаемое при калибровочных экспериментах с пустой ячейкой. Эта функция  $\tau_T^o = \tau_T^o(T)$  является «постоянной» прибора.

## 5. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Характеристику и свойства испытуемого образца заносят в таблицу 1 (приложение А).

Определение удельной теплоемкости проводят на измерителе теплоемкости ИТ-С-400, который изображен на рисунке 3.



- 1 – измерительная ячейка; 2 – микровольтнаноамперметр; 3, 4 – кнопки «Сеть»;  
 5 – переключатель «Измерение»; 6 – переключатель «Температура»;  
 7 – кнопка «Нагрев»; 8 – рукоятка настройки вольтметра; 9 – вольтметр;  
 10 – переключатель диапазонов измерения; 11 – пульт установки прибора в нулевое положение; 12 – кнопка «APP»; 13 – шкала

Рисунок 3. – Измеритель теплоемкости ИТ-С-400

1. Открывают измерительную ячейку 1, поднимая верхнюю половину ее корпуса. Испытуемый образец помещают внутрь металлической ампулы и накрывают металлическим колпаком. Опуская верхнюю половину корпуса, закрывают ячейку.

2. Нажатием кнопок «Сеть» 3 и 4 включают измеритель теплоемкости и микровольтнаноамперметр 2. Переключатель «Измерение» 5 устанавливают в положение « $t_1$ », а переключатель «Температура» 6 – в положение «0». Прибор прогревают в течение 20–30 мин.

3. Включают нагреватель кнопкой «Нагрев» 7, рукояткой 8 устанавливают на вольтметре 9 начальное напряжение 40 В. Переключатель 6 переводят в положение 25 °С. С помощью переключателя 10 устанавливают диапазон измерений микровольтнаноамперметра 2. Нажимая кнопку « $\mu V$ » на пульте 11, устанавливают прибор в нулевое положение. Включают микровольтнаноамперметр на измерение отжатием кнопки «APP» 12.

4. При достижении заданной температуры световой указатель микровольтнаноамперметра подходит к нулевой отметке шкалы 13. В этот момент переключатель 5 быстро переводят в положение « $t_2$ » и одновременно включают секундомер. Когда индикатор шкалы 13 вновь подойдет к нулевой отметке, выключают секундомер и записывают его показания в столбец « $\tau_T$ » таблицы 2 (приложение А).

5. Переключатель 6 переводят в положение 50 °С и вновь включают секундомер. Производят определение времени запаздывания  $\tau_T$  для следующего значения температуры. Описанную процедуру повторяют, последовательно переводя переключатель 6 в положения 75 и 100 °С. Все результаты определения  $\tau_T$  фиксируют в таблице 2 (приложение А).

6. После проведения последнего измерения рукояткой 8 выводят вольтметр 9 в нулевое положение. Кнопкой 7 выключают нагреватель. Переключатели 5 и 6 устанавливают в исходное положение. Отключают приборы от сети кнопками 3 и 4.

7. Поднимают верхнюю часть корпуса измерительной ячейки 1. Оставляют ее в таком положении для охлаждения до комнатной температуры. Из остывшей металлической ампулы извлекают испытуемый образец. Измерительную ячейку возвращают в исходное положение.

8. Расчет удельной теплоемкости по результатам проведенных измерений производят с использованием формулы (7). Параметры  $k_T$  и  $\tau_T^0$  являются постоянными прибора. Их значения в зависимости от температуры приведены в таблице 2 (приложение А).

9. Результаты измерений и расчетов по п. 8 удельной теплоемкости заносят в таблицу 2 (приложение А).

## **6. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ**

1. Образцы материалов цилиндрической формы диаметром ( $15\pm 0,3$ ) мм и высотой ( $5\pm 0,1$ ) мм.
2. Графитовый порошок или алюминиевая пудра.
3. Измеритель теплоемкости ИТ-С-400.
4. Весы аналитические (точность определения массы – 0,01 г).
5. Штангенциркуль.

## **7. СТРУКТУРА ОТЧЕТА**

1. Название, цель работы.
2. Описание метода определения теплоемкости.
3. Обработка результатов эксперимента.
4. Протокол исследования теплоемкости.

## **8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Каковы цель и порядок выполнения работы?
2. Что такое теплоемкость?
3. Какой закон лежит в основе всех процессов передачи теплоты?
4. Как изменяется теплоемкость твердых тел со снижением температуры?
5. Как вычислить удельную теплоемкость материала?
6. Что такое энтропия?
7. Опишите тепловую схему измерителя теплоемкости ИТ-С-400.
8. Из каких элементов состоит измеритель теплоемкости ИТ-С-400?
9. Запишите формулу для вычисления удельной теплоемкости испытуемого образца.
10. Как определить время задержки температуры на тепломере?

Таблица 1. – Характеристики и свойства испытываемого образца

Параметр	Значение
1. Материал	
2. Диаметр, м	
3. Высота, м	
4. Масса, кг	
5. Объем, м <sup>3</sup>	
6. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	

Объем образца, м<sup>3</sup>:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} h.$$

Плотность образца, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \frac{m_o}{V},$$

где  $d$  и  $h$  – диаметр и высота образца, м;  
 $m_o$  – масса образца, кг.

Таблица 2. – Определение удельной теплоемкости

№ опыта	t, °C	$\tau_t$ , с	$\tau_t^0$ , с	$k_t$ , Вт/°C	Теплоемкость $c$ , Дж/(кг·°C)
1	25	–	–	–	
2	50		13,2	0,372	
3	75		13,0	0,377	
4	100		12,8	0,382	
5	125		12,6	0,387	

Таблица 1. – Удельная теплоемкость в кДж/(кг·град) углеродистых сталей в зависимости от температуры

Интервал температур, °С	Углеродистые стали						
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У12
50–100	0,469	0,481	0,481	0,486	0,486	0,489	0,486
100–150	0,489	0,502	0,502	0,507	0,502	0,519	0,519
150–200	0,511	0,519	0,523	0,519	0,515	0,532	0,540
200–250	0,528	0,536	0,544	0,532	0,528	0,548	0,544
250–300	0,544	0,553	0,557	0,557	0,548	0,565	0,557
300–350	0,565	0,574	0,569	0,574	0,569	0,586	0,578
350–400	0,586	0,595	0,595	0,599	0,586	0,607	0,599
400–450	0,611	0,624	0,624	0,624	0,611	0,628	0,615
450–500	0,649	0,662	0,662	0,662	0,649	0,669	0,636
500–550	0,691	0,708	0,695	0,703	0,691	0,695	0,662
550–600	0,733	0,754	0,741	0,749	0,708	0,716	0,699
600–650	0,775	0,799	0,791	0,787	0,733	0,720	0,745
650–700	0,829	0,867	0,858	0,846	0,770	0,770	0,816
700–750	0,971	1,105	1,139	0,432	1,583	2,081	2,089
750–800	0,913	0,875	0,959	0,950	0,624	0,615	0,649
800–850	0,754	0,795	0,867	0,737	0,502	0,675	0,657
850–900	0,716	0,849	0,716	0,649	0,548	0,619	0,619
900–950	0,946	0,662	0,649	0,649	0,624	0,624	0,619
950–1000	0,557	0,669	0,657	0,649	0,624	0,632	0,628
1000–1050	0,582	0,669	0,657	0,649	0,632	0,645	0,636
1050–1100	0,599	0,669	0,662	0,649	0,632	0,653	0,641
1100–1150	0,615	0,669	0,662	0,657	0,641	0,662	0,649
1150–1200	0,632	0,669	0,669	0,666	0,653	0,669	0,657
1200–1250	0,649	0,669	0,669	0,678	0,669	0,678	0,666

Таблица 2. – Удельная теплоемкость легированных сталей в кДж/(кг·град)  
в зависимости от температуры °С.

Интервал температур, °С	Марки стали				
	30X	30H3	30XH	30Г2	50С2Г
50–100	0,486	0,481	0,494	0,477	0,498
100–150	0,107	0,502	0,5078	0,494	0,511
150–200	0,523	0,523	0,523	0,511	0,523
200–250	0,540	0,536	0,540	0,528	0,540
250–300	0,557	0,548	0,561	0,544	0,557
300–350	0,582	0,569	0,582	0,565	0,578
350–400	0,607	0,591	0,559	0,590	0,603
400–450	0,636	0,619	0,632	0,615	0,632
450–500	0,669	0,662	0,674	0,649	0,666
500–550	0,720	0,703	0,720	0,695	0,703
550–600	0,770	0,749	0,775	0,741	0,749
600–650	0,825	0,791	0,812	0,779	0,783
650–700	1,050	1,637	1,306	0,837	0,829
700–750	1,662	0,955	1,176	1,449	0,904
750–800	0,636	0,603	0,976	0,821	1,365
800–850	0,653	0,624	0,569	0,557	0,611
850–900	0,636	0,641	0,582	0,536	0,624
900–950	0,645	0,649	0,628	0,590	0,628
950–1000	0,636	0,649	0,636	0,599	0,636
1000–1050	0,632	0,641	0,636	0,607	0,645
1050–1100	0,632	0,641	0,645	0,615	0,653
1100–1150	0,641	0,645	0,645	0,624	0,662
1150–1200	0,641	0,649	0,653	0,632	0,669
1200–1250	0,649	0,657	0,653	0,636	0,678
1250–1300	0,649	0,662	0,662	0,645	0,678