

Рекомендуемые справочные данные по теплопроводности, температуропроводности, энтальпии и теплоемкости жидкого свинца

**Заведующий отделением ИБРАЭ РАН
д.т.н. Настасья Александровна Мосунова**

Научно-методический семинар «Измерения, анализ и оценка
теплофизических характеристик свинца в жидком состоянии»,
23 марта 2023 г., НИЯУ МИФИ

- Внедрение новых ядерных технологий невозможно без знания теплофизических свойств теплоносителей и конструкционных материалов
- Одним из ключевых проектов Госкорпорации «Росатом» является строительство РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем
- Всесторонняя экспертиза и принятие в российском научном сообществе единых значений ключевых теплофизических свойств жидкого свинцового теплоносителя будет способствовать повышению качества конструирования и обоснования безопасности установок
- Наличие аттестованных свойств является фактором, который облегчит прохождение аттестации программ для ЭВМ, необходимых для расчетного обоснования безопасности

* Концепция развития службы стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов в области использования атомной энергии на период 2021-2026 годов

Состояние вопроса на начало работ, методы и подходы, использованные в работе

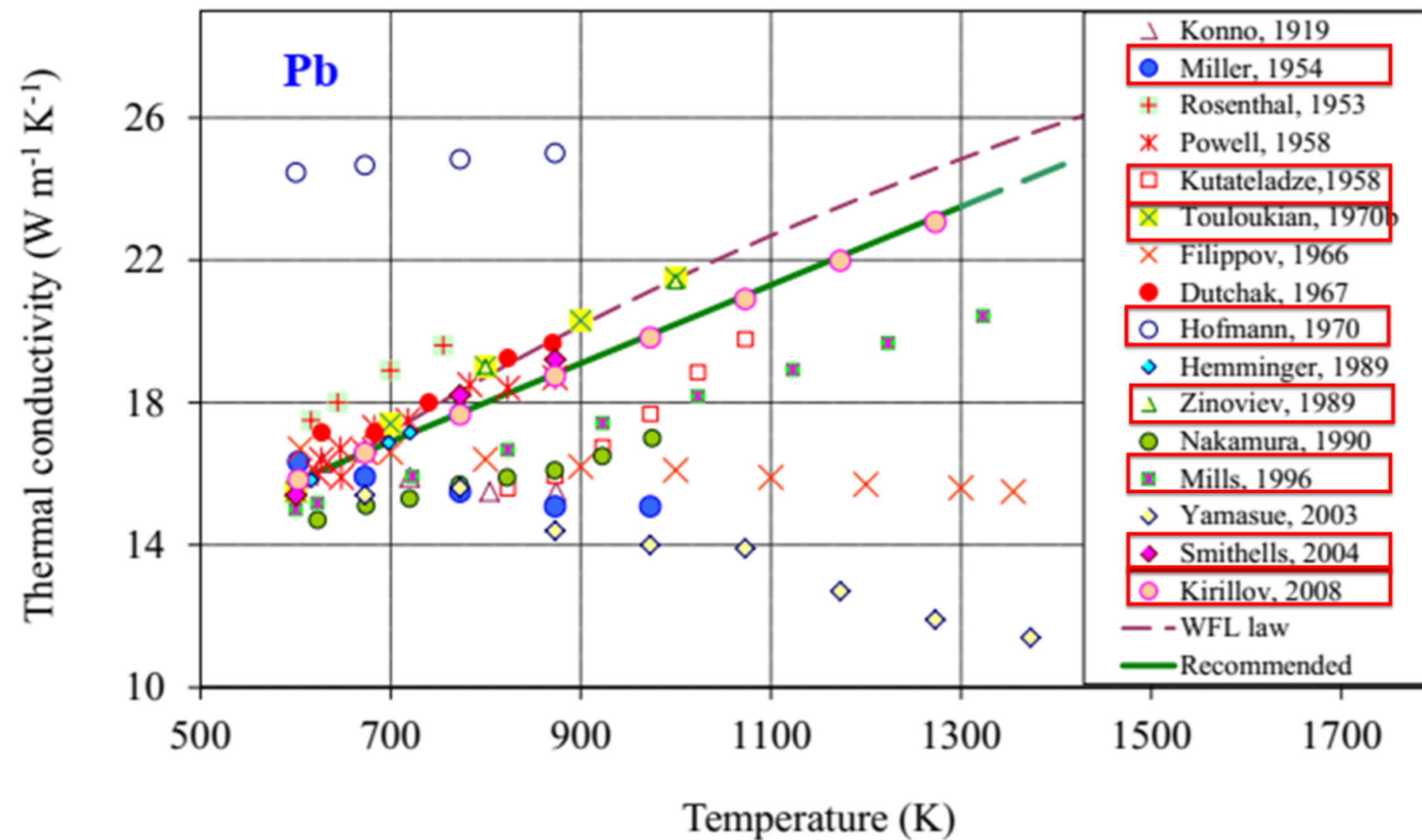


- Плотность свинца. Таблицы стандартных справочных данных (С.В.Станкус и др.), диапазон температур 273,15...1500 К, ГССД 229-07, утверждены 13 декабря 2007 г.
- Коэффициент объемного термического расширения. Таблицы стандартных справочных данных (С.В.Станкус и др.), диапазон температур 273,15...1500 К, ГССД 232-2008, утверждены 25 декабря 2008 г.
- Скорость звука. Таблицы стандартных справочных данных, диапазон температур: от температуры плавления до 1300 К, ГСССД 236 – 2009, утверждены 26 марта 2009 г.
- Другие свойства (теплопроводность, теплоемкость) – имеются рекомендации ОЭСР и КАСД, стандартные справочные данные отсутствуют

Методы и подходы

- Обзор существующих экспериментальных данных
- Анализ и отбор наиболее надежных экспериментальных данных
- Оценка данных и формулировка **рекомендованных значений**

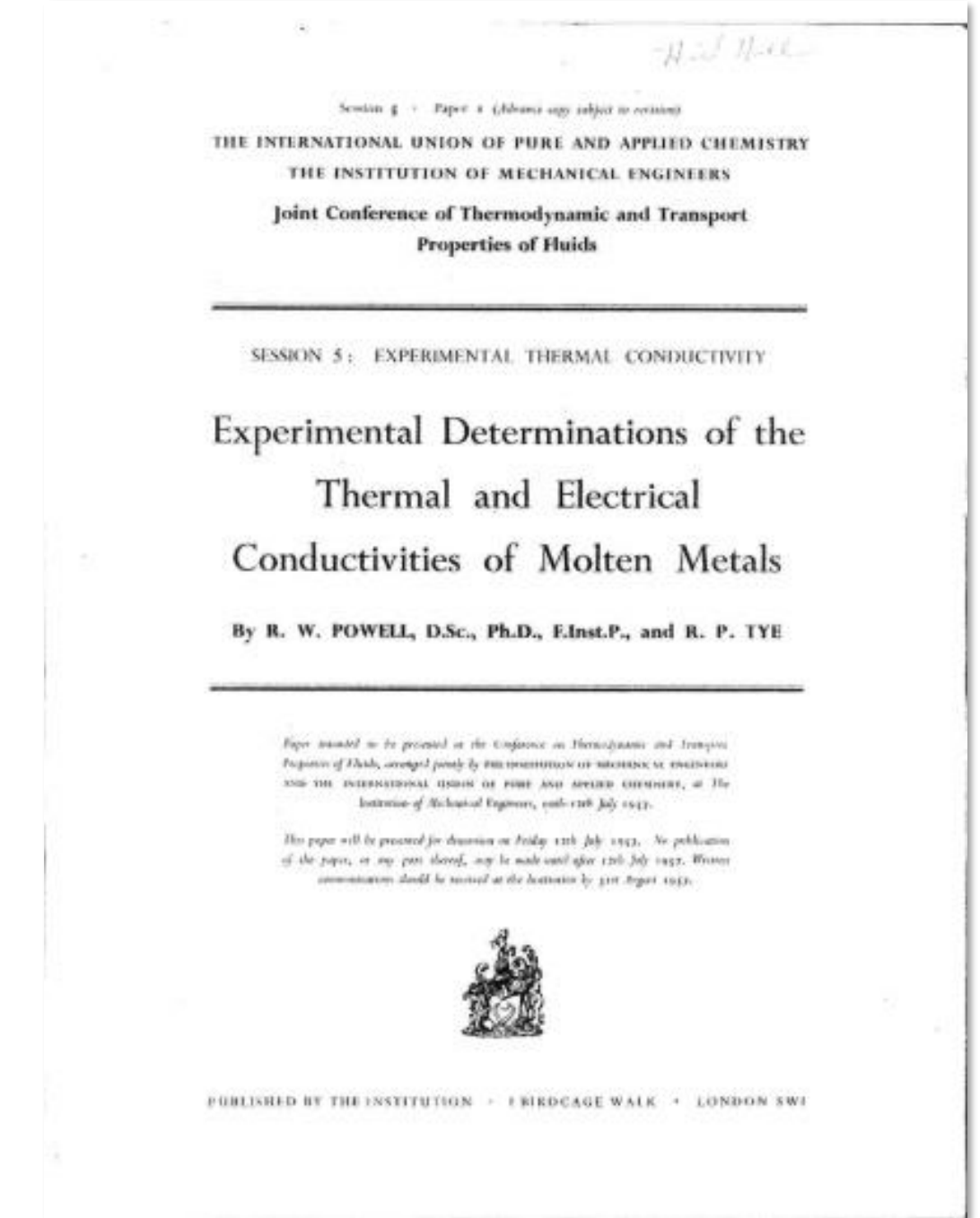
Рекомендации ОЭСР (2015 г.)



Kirillov 2008

~~Pottlacher 1990~~

Powell 1957



“In an effort to find a physically reasonable compromise between the available data and the WFL law, the following linear correlation was chosen as recommendation for the thermal conductivity of the technically pure liquid lead at normal pressure”

Table 5.1. Smoothed Values for Thermal Conductivity ($J \text{ cm. per sq. cm. sec. deg. C.}$), Electrical Resistivity ($10^{-6} \text{ ohm sq. cm. per cm.}$) and Lorenz Function ($10^{-8} J \text{ ohm per sec. deg. C. deg. K.}$) of Lead, Bismuth and Lead-bismuth Eutectic (44.5 per cent Lead 55.5 per cent Bismuth)

Temperature deg.C.	deg.F.	Lead			Lead-Bismuth Eutectic			Bismuth		
		Thermal conductivity	Electrical resistivity	Lorenz function	Thermal conductivity	Electrical resistivity	Lorenz function	Thermal conductivity	Electrical resistivity	Lorenz function
150	302	—	—	—	0.093	113.5	2.50	—	—	—
200	392	—	—	—	0.101	114.7	2.45	—	—	—
250	482	—	—	—	0.109	116.0	2.42	—	—	—
300	572	—	—	—	0.1165	117.7	2.39	0.113	128.6	2.53
350	662	0.160	95.0	2.44	0.124	119.6	2.38	0.118	131.1	2.49
400	752	0.169	97.2	2.44	0.1305	121.8	2.36	0.123	133.6	2.44
450	842	0.176	99.5	2.42	0.1365	124.2	2.34	0.128	136.0	2.41
500	932	0.181	102.0	2.39	0.142	126.6	2.32	0.1335	138.5	2.39
550	1,022	0.184	104.4	2.33	—	—	—	0.139	—	—
600	1,112	0.187	106.8	2.29	—	—	—	—	—	—

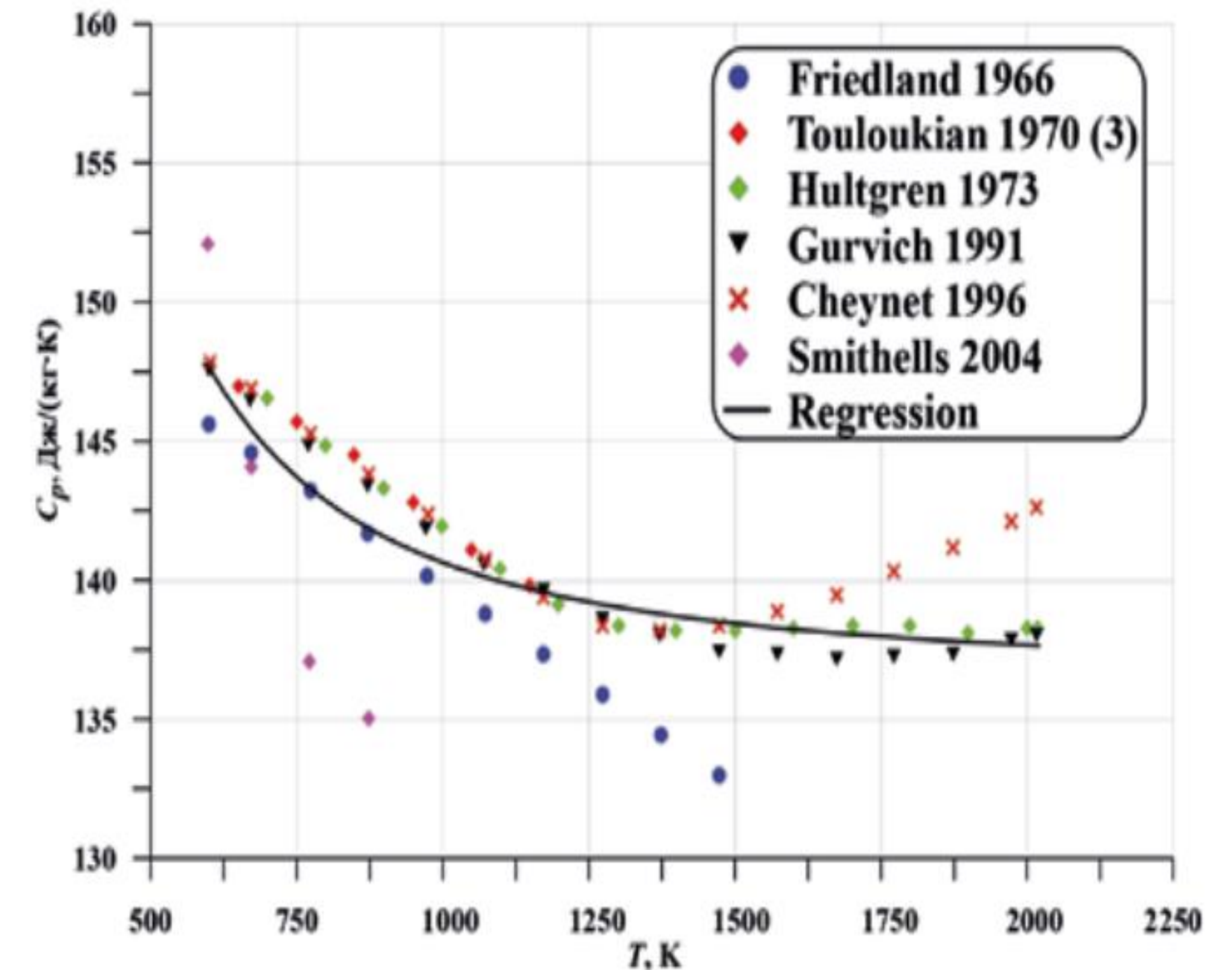
УДК 621.039.5

Расчетные соотношения для определения термодинамических свойств свинцового теплоносителя

И.А. Чусов,

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск Московской области, ул. Орджоникидзе, д. 2
ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 249035, г. Обнинск, Калужская обл., Студгородок, д. 1,

Отметим, что на представленных в статье графиках приведены только те данные, которые использовались при численной оценке регрессионных соотношений, в то же время в списке использованной литературы приведены ссылки на все экспериментальные работы, занесенные в базу данных ExTermD Госкорпорации «Росатом».



Чусов И.А. et al. Расчетные соотношения для определения термодинамических свойств свинцового теплоносителя // Вопросы Атомной Науки И Техники. Серия: Физика Ядерных Реакторов. 2019. № 2.

Обзор данных по теплопроводности жидкого свинца (1/2)



Источник	λ , Вт/[м·К]	Метод	$\delta\lambda$, %
Konno S., 1919	$16,4 + 32,5 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [628 – 874]	S6	-
Bidwell C.C., 1940	$24,3 + 21,9 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [659 – 887]	F	-
Rosental M.W., 1953	$17,3 + 151 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [616 – 755]	S6	-
Powell R.W., 1957	$15,8 + 108 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [623 – 873]	S6	-
Никольский Н.А., 1959	$13,6 + 115 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [673 – 1073]	S5	6
Юрчак Р.П., 1965	$16,7 + 15,2 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [605 – 1355]	N2	8
Дутчак Я.И., 1966	$16,3 + 66,8 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 870]	S6	-
Кржижановский Р.Е., 1970	$18,3 + 40,6 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 773]	S1	-
Осипенко В.П., 1970	$16,7 + 147 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 873]	S6	-
Duggin M.J., 1972	$15 - 23,4 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 880]	S1	5
Смирнов Б.П., 1974	$16,4 + 80,1 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [612 – 1024]	K	6
Банчила Л.Н., 1973	$20,5 + 30,6 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [1100 – 2000]	N2	10
Yamasue E., 2003	$20 - 61,5 \times 10^{-4} T$; [673 – 1373]	N3	2
Sklyarchuk V., 2005	$11,9 - 71,2 \times 10^{-4} T$; [610 – 1000]	N3	2
Савченко И.В., 2011	$3,289 + 0,0274 T - 7,87 \times 10^{-6} T^2$; [600,6 – 1300]	N4	5

S1 – абсолютный стационарный метод осевого потока тепла с активной боковой защитой;

S2 – абсолютный стационарный метод осевого потока тепла с пассивной боковой защитой;

S3 – абсолютный стационарный метод осевого потока тепла без боковой защиты;

S4 – абсолютный стационарный метод радиального потока тепла;

S5 – метод последовательных стационарных состояний;

S6 – относительный стационарный метод осевого потока тепла;

K – модифицированный метод Кольрауша [метод узкой перемычки между массивными блоками];

F – метод Форбса;

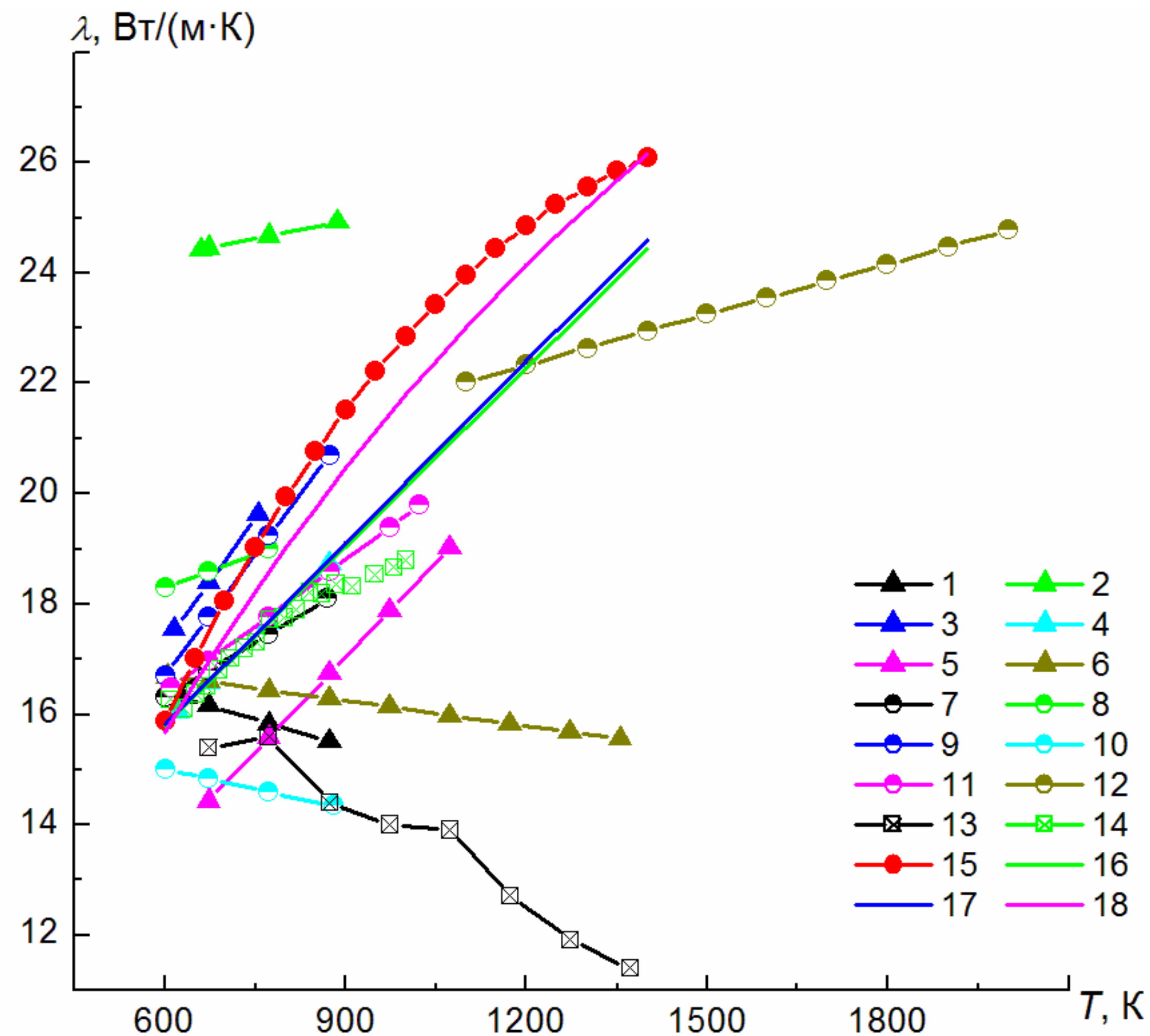
N1 – нестационарный метод продольных температурных волн;

N2 – нестационарный метод радиальных температурных волн;

N3 – нестационарный метод нагретой нити;

N4 – нестационарный импульсный метод.

Обзор данных по теплопроводности жидкого свинца (2/2)



Источник	λ , Вт/[м·К]	№ кривой	$\delta\lambda$, %
Konno S., 1919	$16,4 + 32,5 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [628 – 874]	1	-
Bidwell C.C., 1940	$24,3 + 21,9 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [659 – 887]	2	-
Rosental M.W., 1953	$17,3 + 151 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [616 – 755]	3	-
Powell R.W., 1957	$15,8 + 108 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [623 – 873]	4	-
Никольский Н.А., 1959	$13,6 + 115 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [673 – 1073]	5	6
Юрчак Р.П., 1965	$16,7 + 15,2 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [605 – 1355]	6	8
Дутчак Я.И., 1966	$16,3 + 66,8 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 870]	7	-
Кржижановский Р.Е., 1970	$18,3 + 40,6 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 773]	8	-
Осипенко В.П., 1970	$16,7 + 147 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 873]	9	-
Duggin M.J., 1972	$15 - 23,4 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601 – 880]	10	5
Смирнов Б.П., 1974	$16,4 + 80,1 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [612 – 1024]	11	6
Банчила Л.Н., 1973	$20,5 + 30,6 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [1100 – 2000]	12	10
Yamasue E., 2003	$20 - 61,5 \times 10^{-4} T$; [673 – 1373]	13	2
Sklyarchuk V., 2005	$11,9 - 71,2 \times 10^{-4} T$; [610 – 1000]	14	2
Савченко И.В., 2011	$3,289 + 0,0274 T - 7,87 \times 10^{-6} T^2$; [600,6 – 1300]	15	5

Рекомендованные значения температуропроводности и теплопроводности

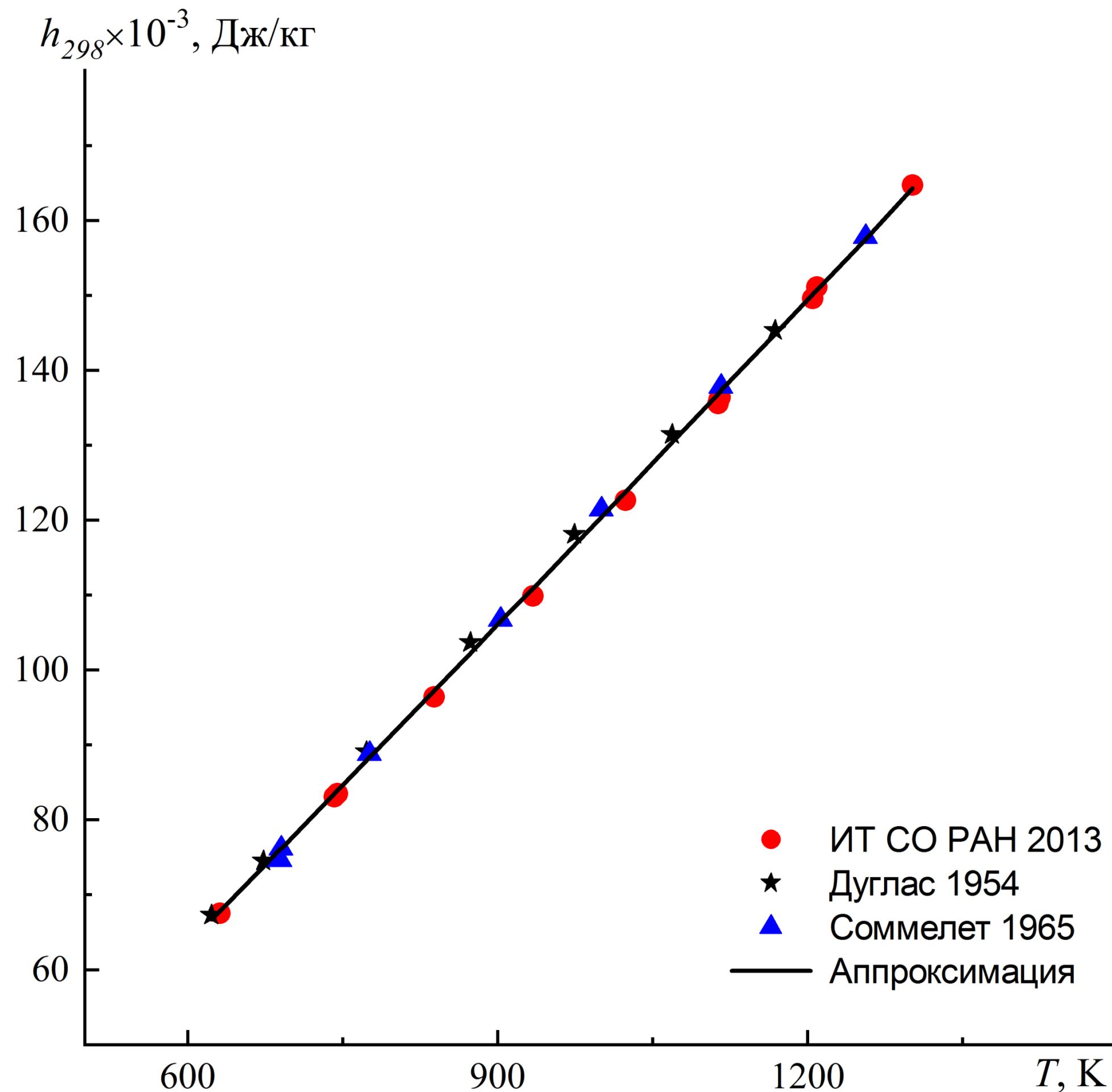
- Для расчета тепло- и температуропроводности расплава свинца в температурном интервале 630–1300 К рекомендовано использовать уравнения, являющиеся результатом аппроксимации измерений ИТ СО РАН

$$a(T) = -1,8 \times 10^{-6} + 2,23 \times 10^{-8} T - 5,3 \times 10^{-12} T^2$$

$$\lambda(T) = -2,4 + 0,0355 T - 1,02 \times 10^{-5} T^2$$

- Используемая измерительная методика аттестована в ГСССД для применения к жидким металлам и проверялась на легкоплавких металлах в жидком состоянии
- Результаты измерений ИТ СО РАН в пределах суммарных неопределенностей хорошо согласуются с результатами других экспериментальных исследований, выполненных в последние годы
- Неопределенность **рекомендованных** значений определена как суммарная систематическая погрешность измерений и составляет 6%

Рекомендованные значения энтальпии (1/2)



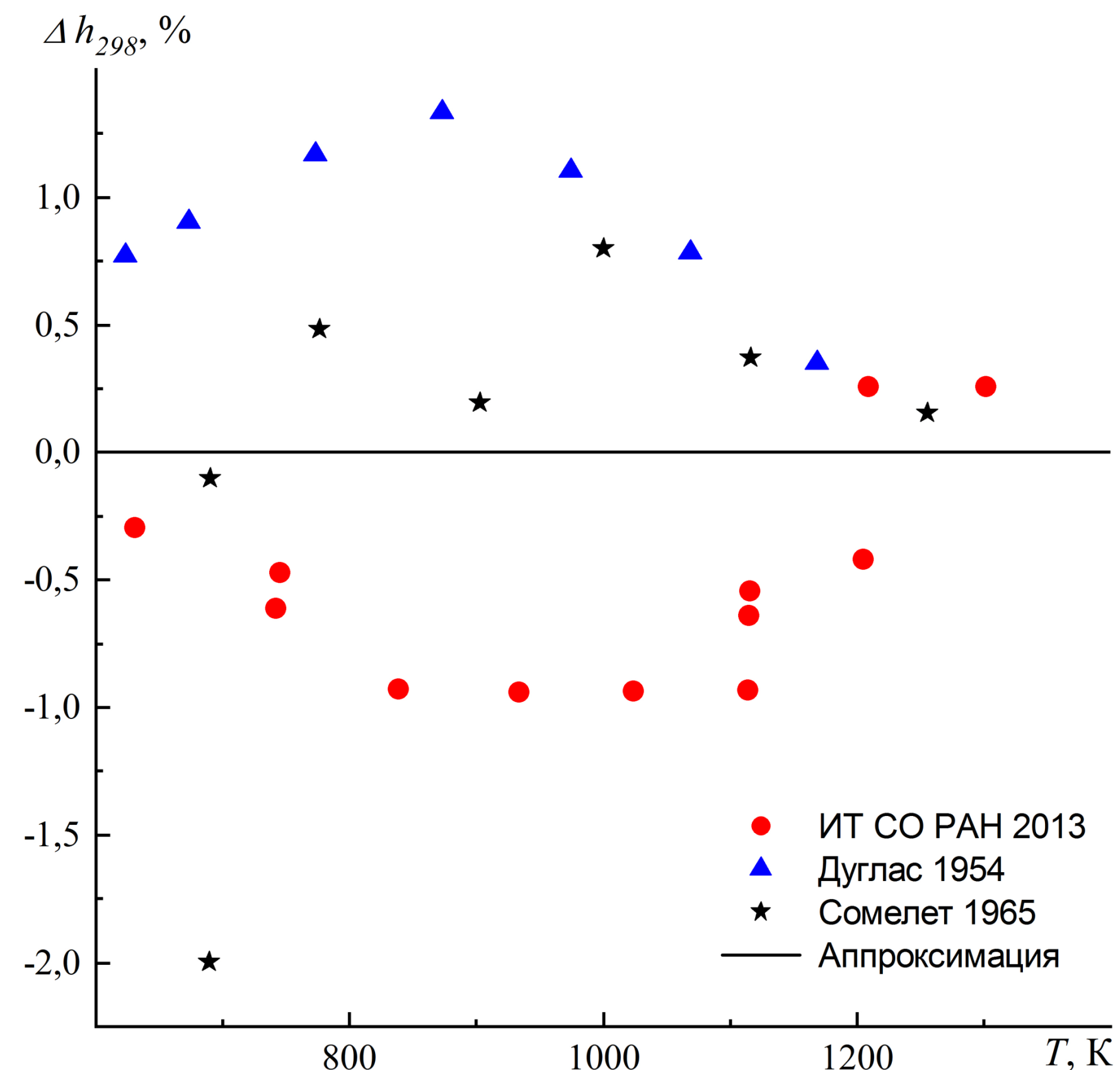
- Неопределенности измерений для наборов данных ИТ СО РАН, Sommelet и Douglas близки
- **Рекомендованные** значения получены путем совместной обработки результатов ИТ СО РАН, Sommelet и Douglas
- Степень аппроксимационного полинома подбиралась, используя критерий Фишера
- Аппроксимация

$$h_{298,15\text{ K}}(T) = -23090 + 143,7 T,$$

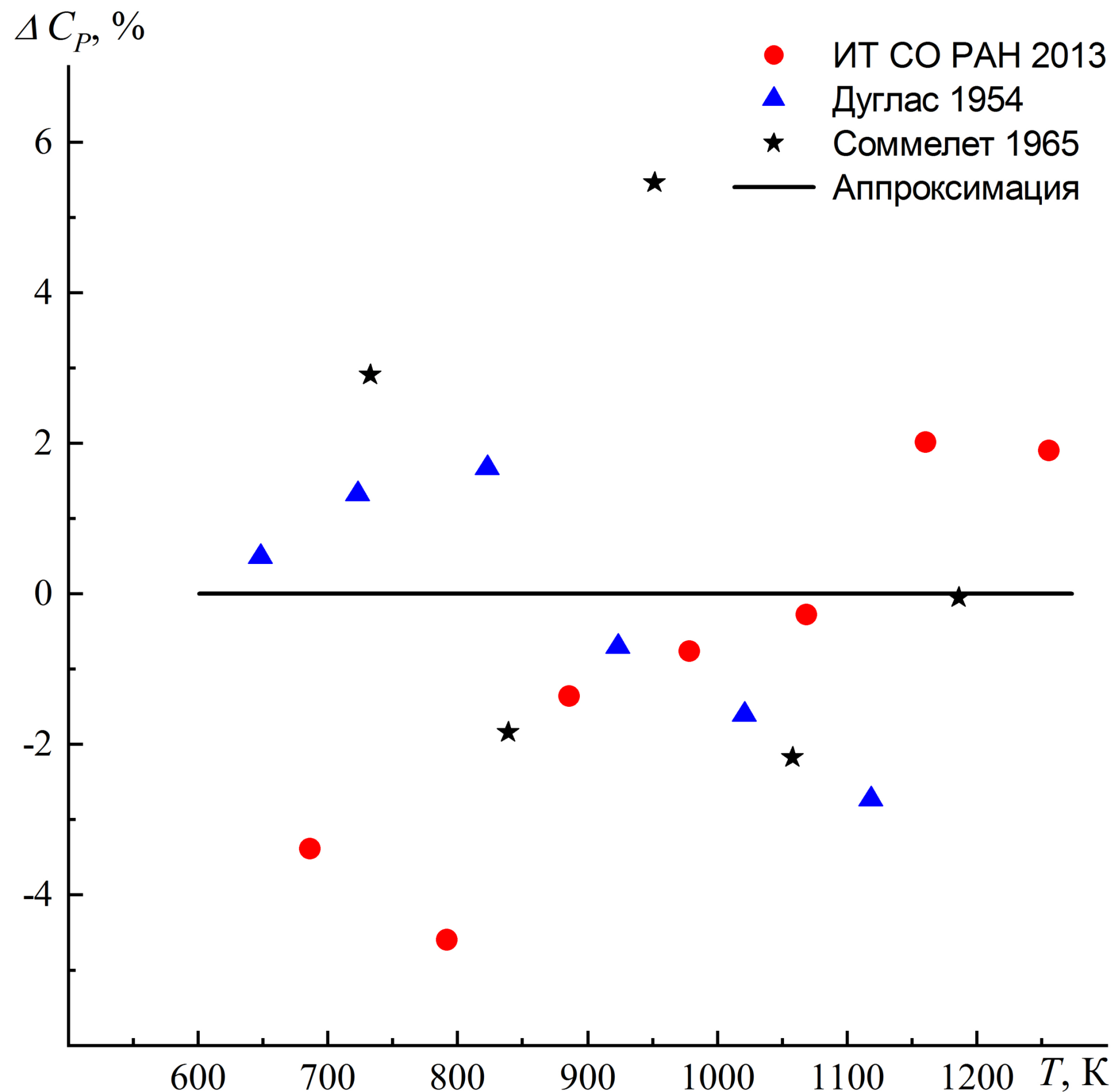
где T – в К

Рекомендованные значения энтальпии (2/2)

Отклонение измеренных значений
энтальпии от аппроксимации



В качестве неопределенности
рекомендованных значений
энтальпии предложено
использовать максимальное
относительное отклонение - 2 %



$$C_p(T) = 143,7 \text{ Дж/кг/К}$$

- Среднеквадратичное отклонение полученных значений от аппроксимации составило ~ 2,5%
- Предполагая, что отклонения имеют случайный характер, можно определить границы доверительного интервала для аппроксимации. Для вероятности 95% они составят $\pm 5\%$
- Максимальное относительное отклонение значений не превосходит 5,5% (неопределенность рекомендованных значений)

Заключение (1/3)



✓ Область применения СД

- Рекомендованные зависимости и табличные данные применимы в интервале температур 630 – 1300 К.

✓ Рекомендованные данные

$$h_{298,15\text{ K}}(T) = -23090 + 143,7 T$$

Неопределенность определения энтальпии, оцененная как максимальное относительное отклонение от набора наиболее надежных экспериментальных данных, составила 2 %

$$C_p(T) = 143,7 \text{ Дж/кг/К}$$

Неопределенность определения теплоемкости, оцененная как максимальное относительное отклонение, составила 5,5%

Заключение (2/3)



$$a(T) = -1,8 \times 10^{-6} + 2,23 \times 10^{-8} T - 5,3 \times 10^{-12} T^2$$

$$\lambda(T) = -2,4 + 0,0355 T - 1,02 \times 10^{-5} T^2$$

- Неопределенность определения теплопроводности и температуропроводности, определенная как суммарная систематическая погрешность измерений, составила 6%
- ✓ **Сведения о методиках оценки, на основе которых подготовлены СД**
- Справочные данные подготовлены на основе анализа существующих экспериментальных данных. **Рекомендованные** температурные зависимости и оценки их неопределенности получены путем совместной обработки результатов наиболее надежных экспериментальных исследований.

Заключение (3/3)



Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ
(ГСССД)

Инв. № 5469-Н.4о.241.19.21.1068-3/СД

Разрешаю на депонирование
Зам. директора ИБРАЭ РАН
О.В. Цацулина
«20» 09 2021 г.

УДК

ТАБЛИЦЫ РЕКОМЕНДУЕМЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ В ОБЛАСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ, ЭНТАЛЬПИЯ,
ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЖИДКОГО СВИНЦА
В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ 630... 1300 К

И СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ В ОБЛАСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

ПЛОТНОСТЬ СВИНЦА
В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ 273,15... 1500 К

ГСССД -2021

Авторы: И. В. Савченко
Н. А. Прибатурин
В. Ф. Стрижов
Н. А. Мосунова
С. И. Лежнин

Москва
2021

© Российская Федерация, от имени которой
выступает Госкорпорация «Росатом», 2021

Госкорпорация «Росатом»

КОМИССИЯ ПО АТТЕСТАЦИИ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

АТТЕСТАЦИОННЫЙ ПАСПОРТ
СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

регистрационный номер РСДАЭ 1-2021 от 29 сентября 2021 г.

Настоящий аттестационный паспорт устанавливает область применения справочных данных «Теплопроводность, температуропроводность, энтальпия и теплоемкость жидкого свинца», которые указаны в приложении к настоящему аттестационному паспорту.

Аттестационный паспорт предоставлен Федеральному государственному бюджетному учреждению науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии наук (ИБРАЭ РАН).

Юридический адрес: 115191, Россия, г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52.

Настоящий аттестационный паспорт действует при соблюдении условий Приложения, являющегося неотъемлемой частью.

Срок действия аттестационного паспорта 29 сентября 2031 г.

Руководитель службы ССДАЭ
Главный метролог
Госкорпорации «Росатом» Обысов Н.А.

Председатель Комиссии по аттестации справочных данных Жердев Г.М.

1

2 Рекомендуемые значения теплопроводности и температуропроводности жидкого свинца в температурном интервале (630–1300) К

Таблица 4 — Рекомендуемые значения теплопроводности и температуропроводности жидкого свинца в температурном интервале (630–1300) К

T, К	α , м ² /с×10 ⁻⁶	$\delta\alpha$, м ² /с×10 ⁻⁶	λ , Вт/(м·К)	$\delta\lambda$, Вт/(м·К)
630	10,1	0,6	15,9	1,0
640	10,3	0,6	16,1	1,0
650	10,5	0,6	16,4	1,0
660	10,6	0,6	16,6	1,0
670	10,8	0,6	16,8	1,0

Рекомендуемые значения температуропроводности жидкого свинца рассчитаны по формуле:

$$\alpha(T) = -1,8 \times 10^{-6} + 2,23 \times 10^{-8} T - 5,3 \times 10^{-12} T^2, \quad (10)$$

где T – температура в К, α – температуропроводность в м²/с.

Рекомендуемые значения теплопроводности жидкого свинца рассчитаны по формуле:

$$\lambda(T) = -2,4 + 0,0355 T - 1,02 \times 10^{-5} T^2, \quad (11)$$

где T – температура в К;

λ – теплопроводность в Вт/м·К.

Неопределенность определения теплопроводности и температуропроводности, определенная как суммарная систематическая погрешность измерений, составила 6%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации «Росатом» (в рамках Государственного контракта № Н.4о.241.19.21.1068 от 14.04.2021 г.)