



Головной научно-методический центр - Институт ядерной физики и технологий

Семинар «Измерения, анализ и оценка теплофизических характеристик свинца в жидком состоянии»

## Теплопроводность сплавов свинца Pb-Na и Pb-Bi-Na при температурах 350 – 800 °C

Круглов Александр Борисович, к.ф.-м.н., доцент  
Харитонов Владимир Степанович, к.т.н., доцент  
Паредес Леонардо Пирес, аспирант

23 марта, 2023 г.



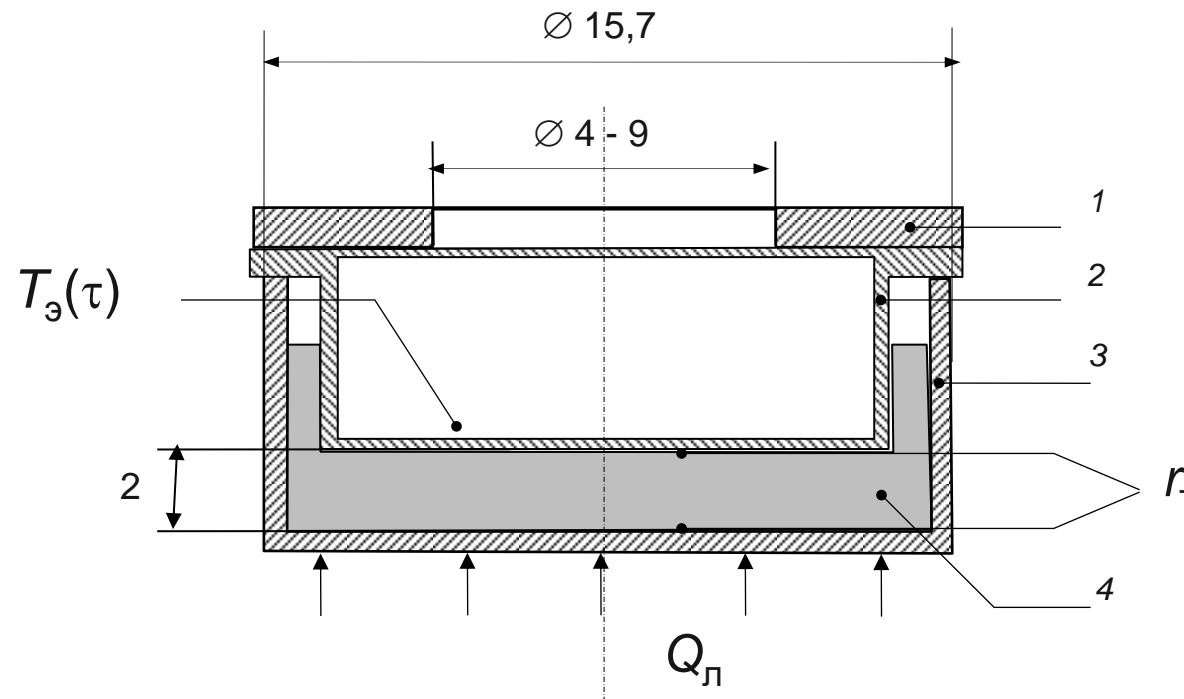
Работоспособность твэлов с нитридным топливом ограничивается термомеханическим взаимодействием топлива и оболочки. Один из путей решения этой проблемы заключается в использовании в конструкции твэла теплопроводящего жидкометаллического подслоя (ТЖМП) между топливом и оболочкой.

Перспективными для изготовления ТЖМП являются сплавы свинца с натрием и висмутом. Они обладают низкой вязкостью, хорошим смачиванием поверхностей стальных оболочек твэлов и нитридного топлива, пониженной температурой плавления, а также невысокой коррозионной активностью. Для обоснования применения данных сплавов в жидкометаллическом подслое твэлов необходимы, в том числе, достоверные данные по их теплофизическим свойствам.

Целью работ являлось исследование теплопроводности сплава эвтектики Pb-Bi с Na с содержанием Na 20 ат. %. (далее LBE-Na) и эвтектического сплава Pb-Na с содержанием Na 20 ат. % (далее Pb-Na) в актуальном для твэлов с ТЖМП диапазоне температур от 350 до 800 °С.

# Экспериментальная установка и измерительная ячейка (ИЯ)

Измерения коэффициента теплопроводности сплавов свинца выполнялись на установке LFA 457 с использованием ИЯ из стали 12Х18Н10Т. Донышко ИЯ нагревалось импульсом лазерного излучения  $Q_{\text{л}}$ . Изменение во времени средней температуры поверхности крышки  $T_{\text{э}}(\tau)$  регистрировалось с помощью инфракрасного датчика.



1 – диафрагма; 2, 3 – крышка и донышко ИЯ; 4 – расплав металла;  $r_{\text{т}}$  – термическое сопротивление контактов расплава и поверхностей ИЯ

Выплавка сплавов проводилась в НИЯУ «МИФИ» в перчаточном боксе в атмосфере аргона с контролируемым содержанием кислорода и влаги (менее 20 ppm) из свинца марки С1, висмута В00 и натрия марки «ч», очищенных от оксидных пленок. Массы компонент сплавов измерялись с точностью  $\pm 0,01$  г. Фактическое содержание натрия в отливках составило  $20 \pm 0,5$  ат. %.

Отливка сплавов проводилась в кварцевую трубку с внутренним диаметром 14 мм, из которой было возможно извлечь слиток без разрушения трубки.

Эксперименты начинались с нагрева и кратковременной выдержки рабочего объема в форвакууме при температуре 400 °С. Затем в атмосфере аргона рабочий объем установки нагревался до 700 – 800 °С и выдерживался при этой температуре в течение 30-и минут. Во время выдержки выполнялся контроль уменьшения и стабилизации термических сопротивлений контактов сплава с поверхностью ячейки  $r_T$  на уровне, существенно меньшем термического сопротивления слоя сплава свинца в измерительной ячейке.

Измерения теплопроводности сплавов свинца в измерительной ячейке проводились с шагом в  $50^{\circ}\text{C}$  в интервале от  $350$  до  $800^{\circ}\text{C}$  в режимах нагрева и охлаждения. Для проверки воспроизводимости результатов производилось не менее трех измерений при каждой температуре и оценивался разброс данных, который не превышал  $\pm 2\%$ .

Для последующего определения коэффициента теплопроводности свинца использовались термограммы экспериментов, в которых значения теплопроводности не изменялись в процессах охлаждения и нагрева.

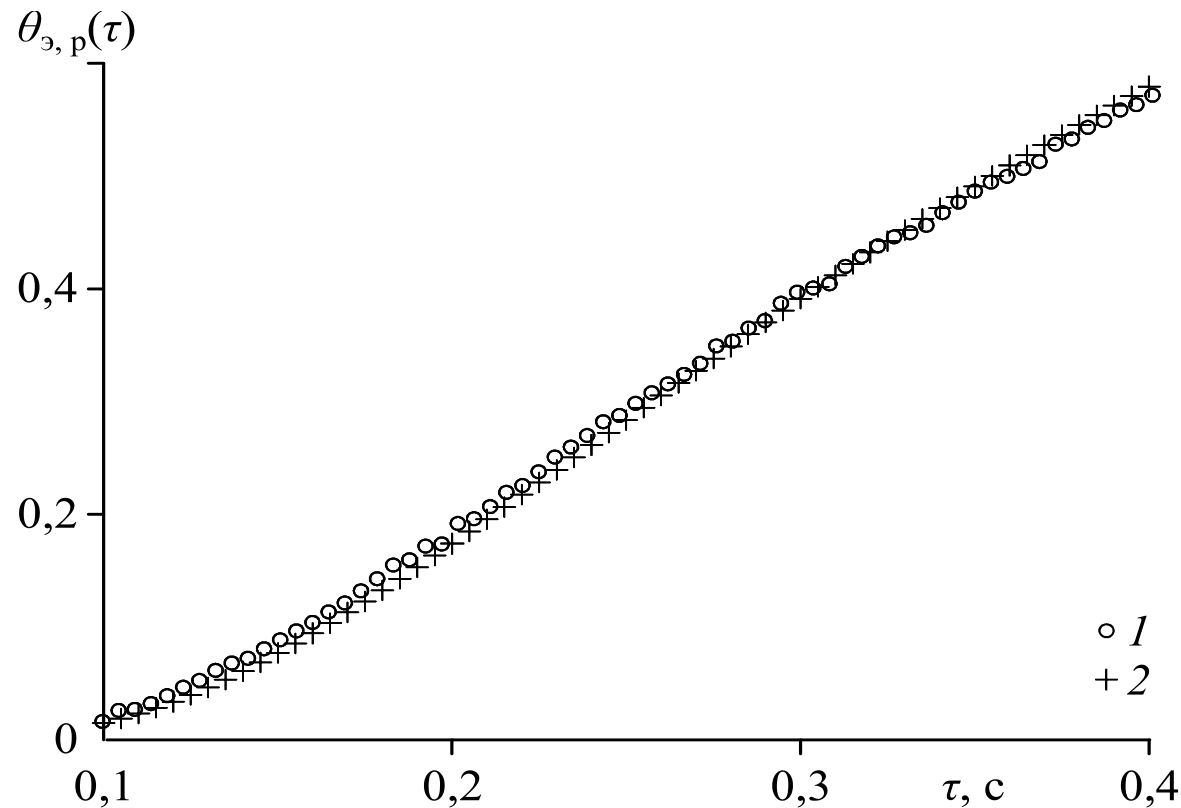
Моделирование теплопередачи в измерительной ячейке проводилось с помощью разработанной в среде FlexPDE численной модели теплопередачи для зависящей от времени энергии излучения лазера с постоянной в пределах донышка ячейки плотностью теплового потока.

Выполненный расчетный анализ показал, что на **начальном временном интервале нагрева**  $0,5 \cdot \tau_{0,5} \leq \tau \leq \tau_{0,5}$  ( $\tau_{0,5}$  - время достижения половины подогрева) **термограмма процесса определяется в основном**  $\lambda_m$  и  $r_T$ , геометрией ячейки и слабо зависит от теплоотдачи от ее поверхности.



# Определение коэффициента теплопроводности сплава

Теплопроводность сплавов  $\lambda_M$  определялась в результате минимизации среднеквадратичного отклонения нормированной расчетной термограммы  $\theta_p(\tau) = (T_p(\tau) - T_p(0))/\Delta T_{pmax}$  от экспериментальной  $\theta_э(\tau)$  на начальном временном участке  $0,1 \leq \tau \leq 0,4$  с



Экспериментальная (1) и расчетная (2) термограммы для сплава Pb-Na при  $T = 600$  °C

Погрешность измерений теплопроводности расплавов металлов импульсным методом определяется погрешностями данных, используемых в расчетной модели теплового процесса в ячейке

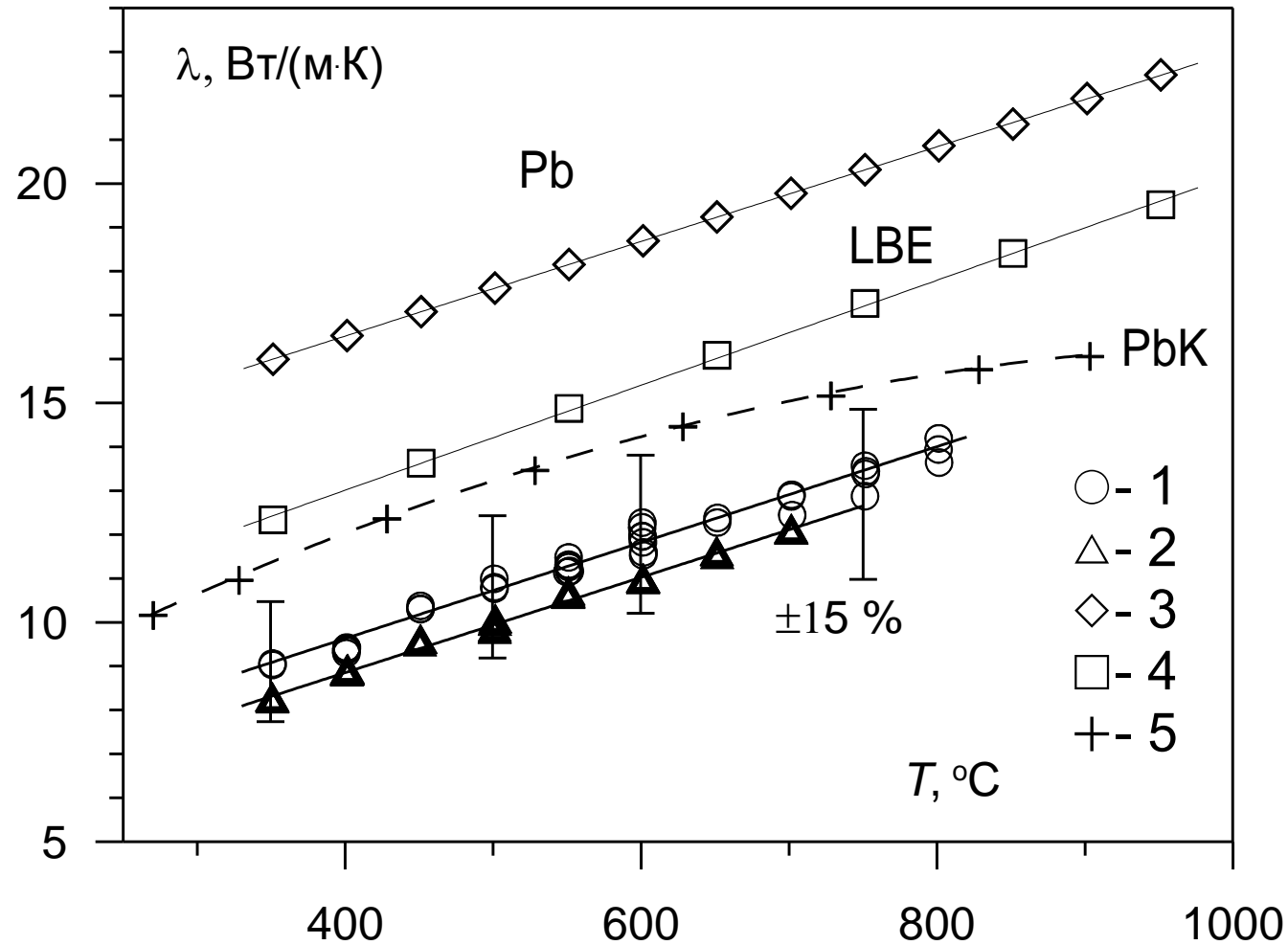
$$\lambda_{рв} = \Lambda(r_T, c_p, \rho_p, \lambda_{ст}, c_{ст}, \rho_{ст}, \Delta\rho, \Delta\rho_{кр}, \Delta_d, \alpha).$$

Для жидкого свинца было получено, что погрешность измерений  $\varepsilon_\lambda$  не превышает 9 %.

В случае сплавов было необходимо учесть дополнительные погрешности, вносимые приближенностью расчетных оценок плотности  $\Delta\rho/\rho = 4$  % и теплоемкости сплавов  $\Delta c/c = 10$  %.

В результате расчетов по модели было получено, что неопределенность результатов измерений теплопроводности исследованных сплавов  $\varepsilon_\lambda < 15$  %.

# Результаты измерений теплопроводности сплавов



Теплопроводность сплавов свинца: 1 – Pb-Na, 2 – LBE-Na, 3 – Pb, 4 – LBE (Кириллов, 2008), 5 – Pb-K (ИТ СО РАН, НГУ, 2020)

Теплопроводность исследованных сплавов Pb-Na и LBE-Na заметно ниже, чем у Pb и LBE. Так при температуре 600 °С коэффициент теплопроводности сплава Pb-Na меньше по сравнению со свинцом почти на 40 %. Фактором, определяющим теплопроводность жидкого металла, является рассеяние электронов на неупорядоченной структуре жидкого металла, поэтому снижение теплопроводности сплавов может быть связано с формированием ближнего порядка в виде кластеров, в которых оказывается запертой значительная часть электронов проводимости.

Сплав	$\lambda$ , Вт/(м·К); $T$ , °С
Pb-Na	$\lambda(T) = 0,011 \cdot T + 5,27$
LBE-Na	$\lambda(T) = 0,011 \cdot T + 4,51$

- Импульсным методом в диапазоне температур 350 – 800 °С получены новые экспериментальные данные по теплопроводности сплава эвтектики Pb-Bi с Na с содержанием Na 20 ат. % и эвтектического сплава Pb-Na с содержанием Na 20 ат. %.
- Анализ источников погрешности используемой методики показал, что неопределенность результатов измерения теплопроводности сплавов свинца не превосходит 15%.