

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

---

---

УДК 621.039.534

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, К.А. Махов, А.И. Шумилков, А.С. Черныш

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИСТЕННОГО СЛОЯ: СТЕНКА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА – СВИНЦОВЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Предмет, тема, цель работы:** В статье приведены результаты экспериментальных исследований пристенного слоя свинцового теплоносителя методом экспресс замораживания.

**Метод или методологию проведения работы;** Исследования проводились на высокотемпературном стенде методом экспресс-замораживания свинцового теплоносителя с изменением температуры потока свинца с 470 до 320<sup>0</sup>С за 2 с при содержании в нем термодинамически активного кислорода 10<sup>-3</sup> и экспериментов с изменением температуры потока свинца с 550 до 320<sup>0</sup>С с тем же темпом охлаждения при содержании в нем термодинамически активного кислорода 10<sup>-1</sup>-10<sup>0</sup> и наличии твердой фазы оксидов свинца.

**Результаты и область их применения;** Впервые экспериментально определены триботехнические характеристики пристенного слоя потока свинцового теплоносителя. Зафиксировано наличие в пристенном слое образования частиц примесей, вероятно, пропитанных теплоносителем и представляющих дисперсную систему с соответствующими свойствами. Подтверждено наличие несмачивания в зоне контакта жидкого и твердого металлов. Определены шероховатости поверхности стенки из стали 08X18H10T при внеконтурной пассивации и контурной пассивации, а также в процессе эксплуатации в контакте с потоком свинцового теплоносителя. Результаты проведенных исследований важны для реакторных контуров энергоблоков АЭС с установками БРЕСТ и СВБР со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

*Ключевые слова:* свинцовый теплоноситель, пристенный слой, оксидные покрытия, метод экспресс замораживания, нерастворенные примеси, отложения примесей, микротвердость, шероховатость

### Введение

Традиционные методы исследования состояния поверхностей конструкционных материалов после испытаний в потоке свинцового теплоносителя предусматривают дренирование теплоносителя из полостей циркуляционного контура с размещенными в нем образцами или извлечение образцов из объема теплоносителя. После этого проводится удаление с поверхностей контакта твердого и жидкого металлов, шлаков и теплоносителя (если они оставались на поверхности контакта) и изготовление образцов (шлифов и др.) для проведения соответствующих исследований. Традиционные методы позволяют получить полную и представительную информацию о наличии или отсутствии коррозионных, эрозионных и других повреждений поверхностей. Они позволяют получить представительную информацию о характеристиках оксидных покрытий на поверхностях образцов, обладающих защитными (пассивирующими), антифрикционными и электроизолирующими свойствами.

Недостатком таких методов является невозможность получения объективной информации о состояниях пристенного слоя в потоке свинцового теплоносителя при различных его режимах течения и содержаниях в нем примесей. Состояние пристенного, приграничного слоя стали, несмачиваемого высокотемпературным (450-550<sup>0</sup>С) свинцовым теплоносителем, определяет процессы коррозии, эрозии, формирования и разрушения защитных покрытий

[1], гидродинамические и теплофизические характеристики потока [2] в этой области, что подтверждается расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями.

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексева проводятся исследования пристенной области: конструкционный материал – свинцовый теплоноситель – методом экспресс-замораживания, что позволяет расширить информацию о процессах, происходящих в этой области.

### Методы проведения исследований

Сущность проведения эксперимента заключалась в следующем. Организуется циркуляция высокотемпературного свинцового теплоносителя через U-образную трубу  $\varnothing 14$  мм с толщиной стенки 2 мм, выполненной из стали 08 X18H10T с установленными на ее поверхности и в потоке свинцового теплоносителя термопарами. Трубка имеет съемную секцию электрообогрева и теплоизоляцию, которые демонтируются в момент, предшествующий замораживанию (рис. 1).

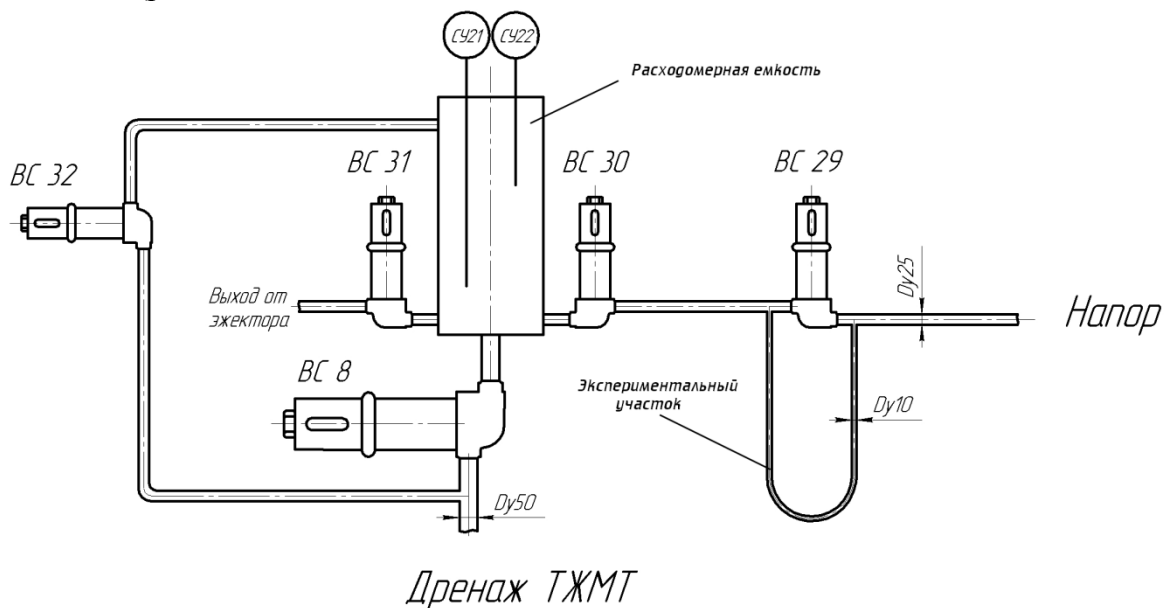


Рис. 1. Схема экспериментального участка

Емкость с водой и льдом подводится снизу к U-образной трубке с погружением этой трубки под уровень смеси воды и льда, при этом фиксируется скорость изменения температуры свинца в трубке. После этого теплоноситель дренируется из циркуляционного контура и вырезаются участки U-образной трубки с застывшим в ней свинцом, а также участки трубопровода контура со сдренированным теплоносителем.

Проводилось определение шероховатости следующих поверхностей:

- стального образца, после извлечения из нее слитка свинца;
- стального образца из участка контура со сдренированным теплоносителем, через который осуществлялась циркуляция свинца;
- стального образца, запассивированной на воздухе при тех же температурах, при которых находилась U-образная трубка;
- стального образца из трубки в состоянии поставки;
- поверхности свинцового слитка, извлеченного из U-образной трубки.

Определялась микротвердость свинца в ядре «замороженного» потока, микротвердость в образованиях примесей в пристенной области и в стали.

Параметры серий экспериментов:

- продолжительность циркуляции свинцового теплоносителя через U-образную трубку: 50, 75, 100 ч соответственно;

- расход свинцового теплоносителя через U-образную трубку: 0,27 м<sup>3</sup>/ч; 0,27 м<sup>3</sup>/ч; 0,55 м<sup>3</sup>/ч соответственно;
- среднерасходная скорость потока свинца: 1 м/с; 1 м/с; 2 м/с соответственно;
- температура свинцового теплоносителя: 470<sup>0</sup>С; 470<sup>0</sup>С; 550<sup>0</sup>С соответственно;
- термодинамическая активность кислорода в расплаве свинца: 10<sup>-3</sup>; 10<sup>-3</sup>; 10<sup>-1</sup>-10<sup>-0</sup>

Во всех случаях U-образные трубки изготавливались из стали 08Х18Н10Т Ø14х2 мм в состоянии поставки. Первые две серии экспериментов проводились на стенде ФТ-3 НГТУ при термодинамической активности кислорода 10<sup>-3</sup>. Время эксплуатации стенда ФТ-3 до врезки U-образной трубки составляло 1000-1500 ч. Третья серия экспериментов проводилась на стенде 2009-302ФТ-НКНГТУ при термодинамической активности кислорода в свинце 10<sup>-1</sup>-10<sup>-0</sup> при гарантированном наличии твердой фазы оксидов свинца в потоке теплоносителя в циркуляционном контуре. Время эксплуатации стенда 2009-302ФТ-НКНГТУ более 1000 часов.

### Обсуждение результатов

График изменения температуры свинца в экспериментальном участке (рис. 2) показывает, что через время около 2 с после начала процесса охлаждения экспериментального участка свинец гарантированно переходил в твердое, замороженное состояние, в котором, по мнению авторов, в значительной мере сохраняется структура пристенной области, учитывая малую температуру фазового перехода при застывании свинца.

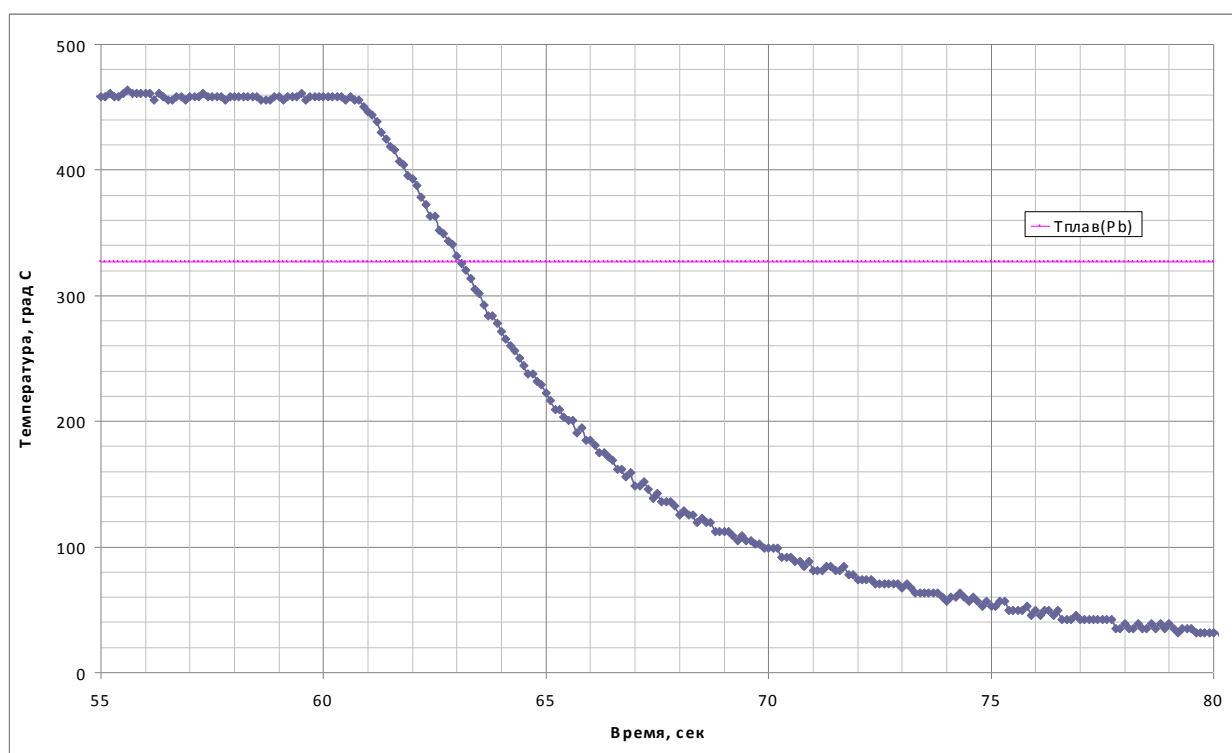


Рис. 2. График скорости охлаждения экспериментального участка

После вырезки и продольной разрезки образцов из U-образной трубки слитки свинца легко извлекались из стальных оболочек, что свидетельствует о несмачивании стальных стенок свинцом.

На внешних, контактировавших со стенкой поверхностях свинцовых слитков во всех сериях экспериментов зафиксированы газовые (газопаровые) пузыри с линейными размерами до 1 мм (рис. 3) и в редких случаях – до 1 см (рис. 4). Отпечатки пузырей имели статически разный характер: от отпечатков с шириной и глубиной одного порядка (около 1 мм), напоминающих «кратеры» до отпечатков с глубиной существенно меньше диаметрального

размера, похожих на «вмятины». Этот факт может объясняться разбросом в размерах пузырей, разницей их положения относительно поверхности свинцового слитка, составом газовой (газопаровой) смеси или др.



Рис. 3. Газовые (газопаровые) «вмятины» на поверхности свинца

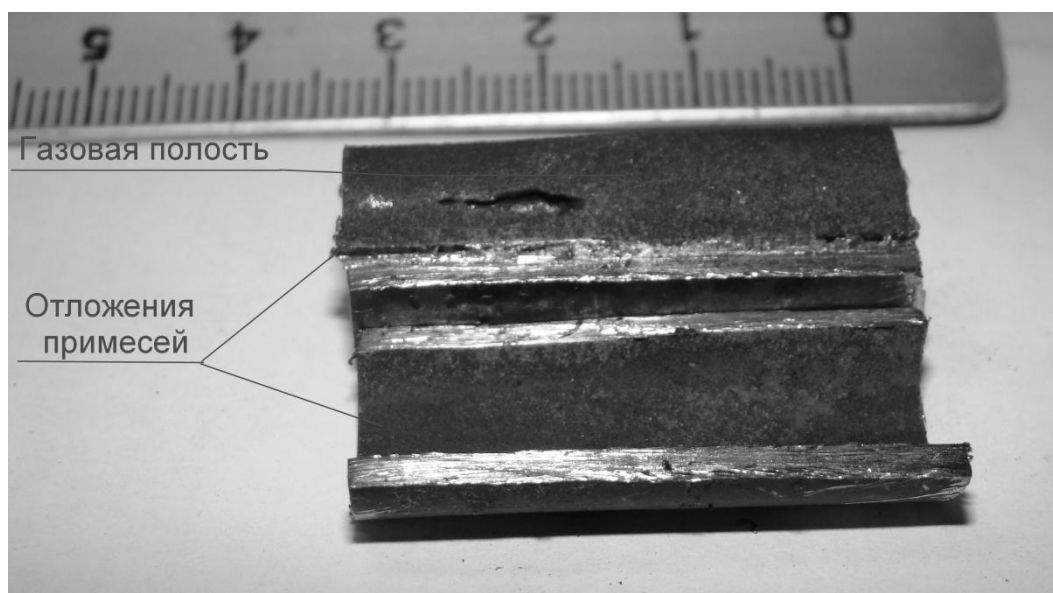
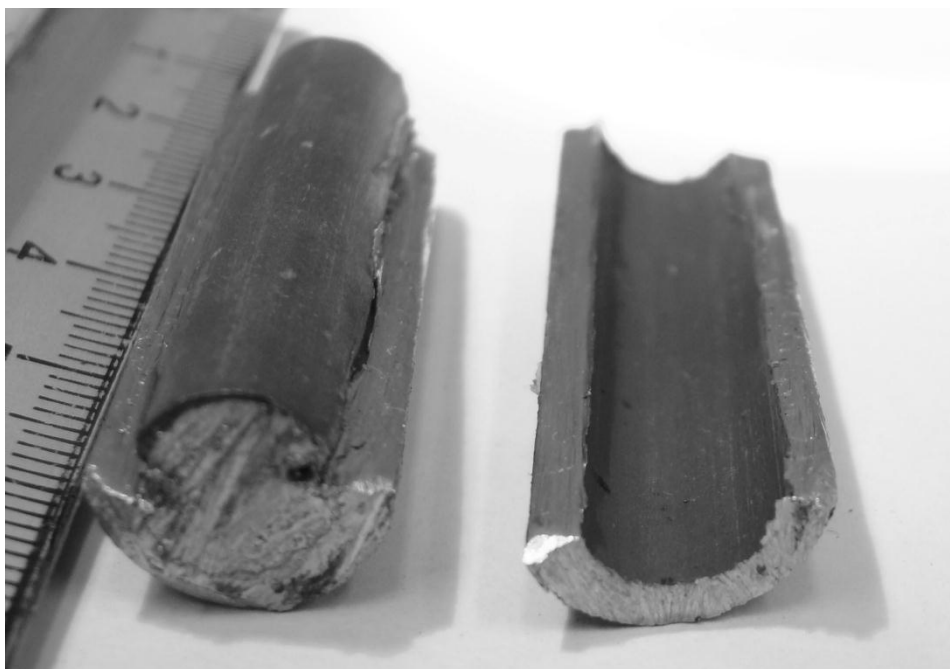


Рис. 4. Газовые (газопаровые) «кратеры» в свинце

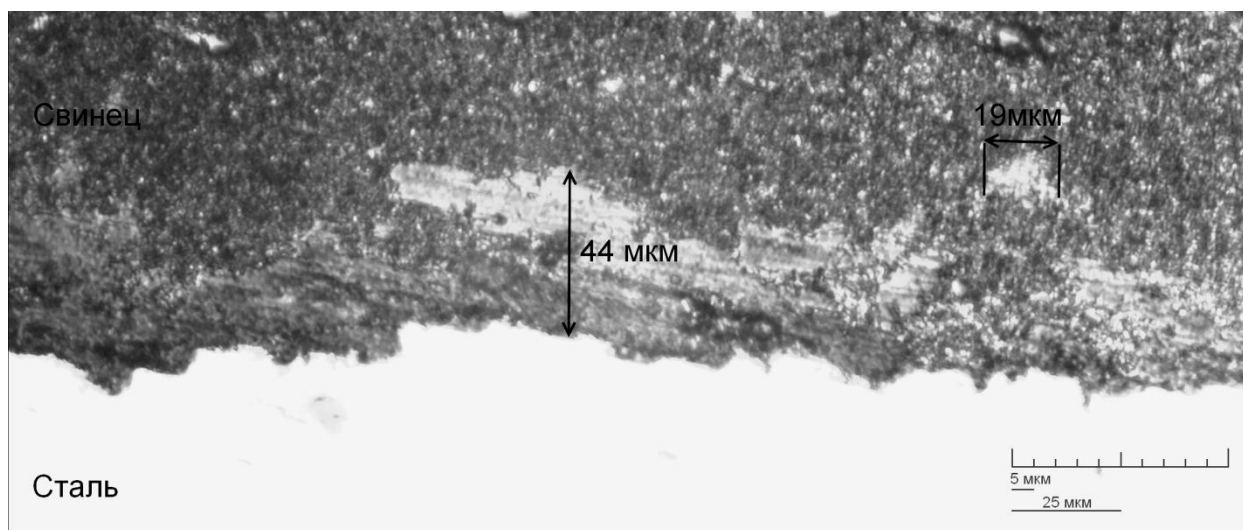
При отделении слитка свинца от трубы зафиксированы слои примесей черного и темно-красного цветов, находящиеся на поверхности стенки трубы и поверхности слитка свинца и сцепленные с ними (рис. 5). На поверхности свинца обнаружены участки без визуально фиксируемых покрытий примесями, «чистые».



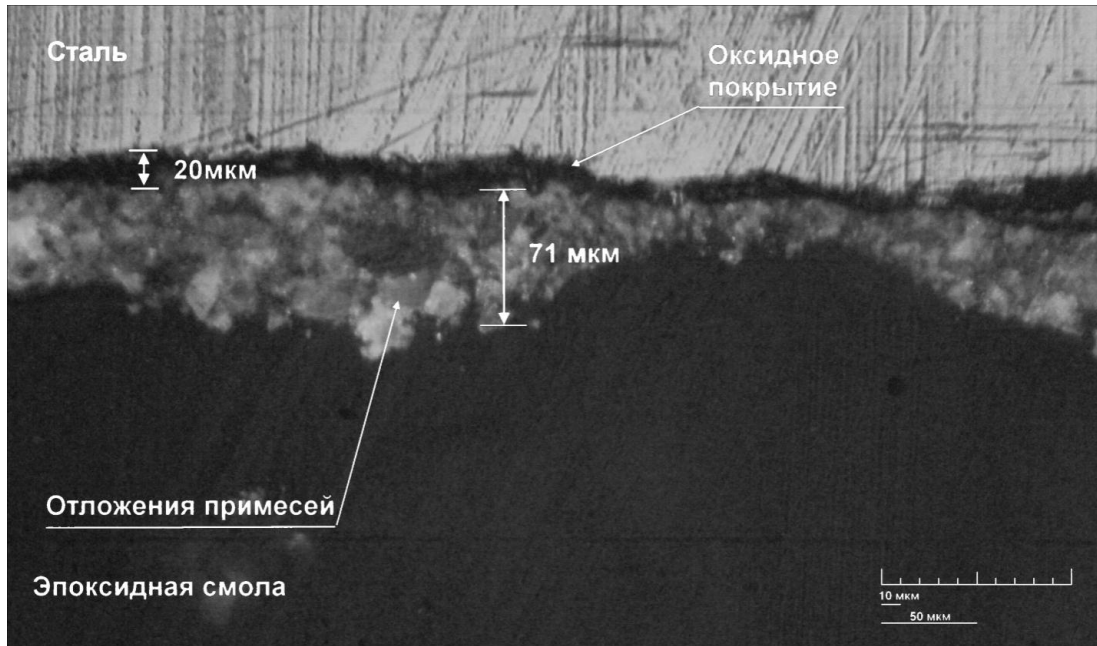
**Рис. 5. Внешний вид поверхности трубки и слитка свинца после отделения**

Наличие примесей на поверхностях контакта свинца со стенкой свидетельствует о наличии граничной внешней поверхности свинца с поверхностными свойствами, на которой или вблизи которой концентрируются примеси, поступающие из ядра потока теплоносителя и удерживаемые в пристенной области при установившемся режиме течения. Эксперименты показали, что пристенная область обогащена нерастворимыми примесями, содержащими кислород и являющимися источниками подпитки кислородом оксидных покрытий на стальных поверхностях.

Результаты анализа шлифов продольных разрезов слитков свинца (рис. 6 и рис. 7) показывали следующее: при испытаниях на циркуляции свинца в течение 50 и 75 ч при  $T=470^{\circ}\text{C}$ ,  $a=10^{-3}$  отсутствует визуально фиксируемое оксидное покрытие на стальной поверхности; отложения примесей вблизи границы раздела фаз «теплоноситель – конструкционный материал» имеют неравномерный характер (до 50-60 мкм); фиксируются частицы примесей, отстоящие от стенки трубки на расстоянии до 100 мкм.

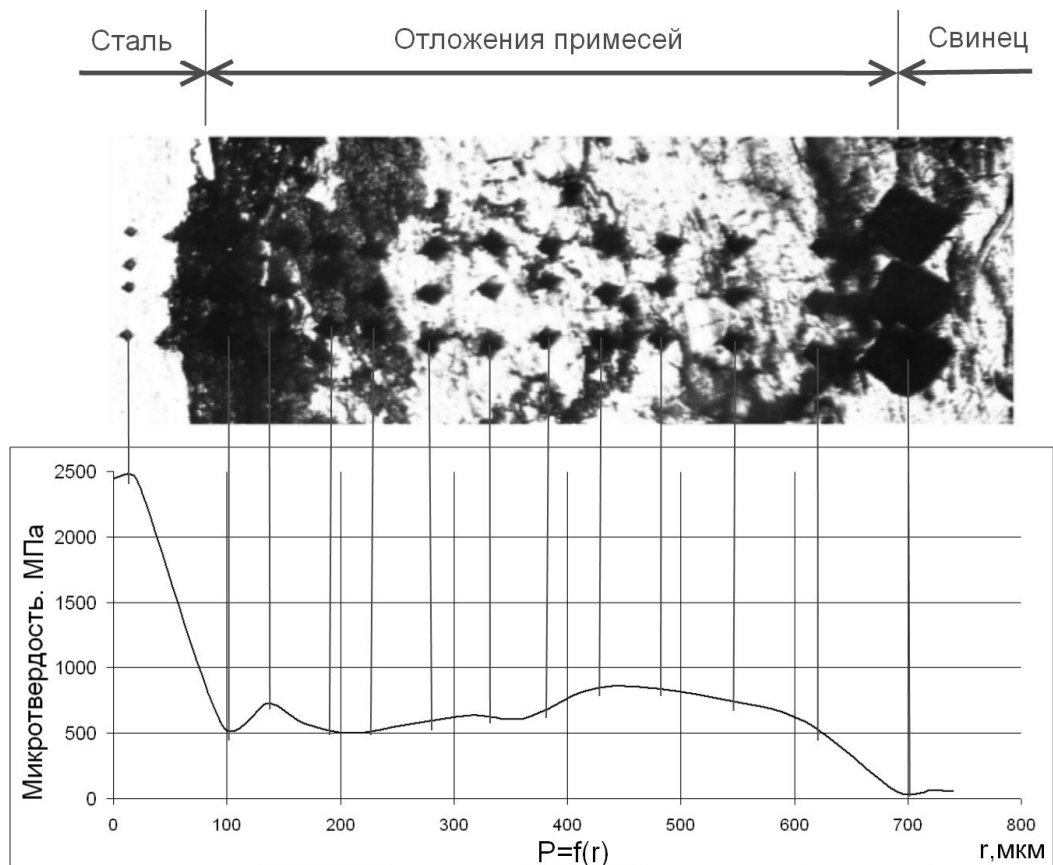


**Рис. 6. Отложения примесей, в пристенной области ( $Q=0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $T=470^{\circ}\text{C}$ ,  $a=10^{-3}$ ,  $t=50 \text{ ч}$ ), 400-кратное увеличение**



**Рис. 7. Отложения примесей, сцепленные с конструкционным материалом ( $Q=0,55 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $T=550^\circ\text{C}$ ,  $a=10^0$ ,  $t=100 \text{ ч}$ ), 200-кратное увеличение**

Измерение микротвердости структур, составляющих пристенную область по методу Виккерса (рис. 8) показало, что микротвердость пристенной области (от 500 до 900 МПа) на порядок ниже микротвердости стали (2400 МПа) и на порядок выше микротвердости застывшего свинца (50 МПа).



**Рис. 8. Результаты измерения микротвердости структур пристенной области (нагрузка  $P=20 \text{ г} = 0,0196 \text{ кгс}$ , время выдержки  $t=15 \text{ с}$ )**

Можно сделать вывод о том, что фракция примесей в пристенной области, находящаяся ближе к оксидному покрытию, имеет меньшую (в среднем на 150 МПа) микротвердость, чем образования примесей, прилегающих к свинцовому теплоносителю и пропитанным им. Это может свидетельствовать о разной степени рыхлости этих слоев, что совпадает с данными других исследователей [1].

Шероховатость поверхностей стальной трубки в состоянии поставки, оксидированной на воздухе, находившейся в потоке свинца после его дренирования в контакте со стальным слитком и шероховатость поверхности извлеченного из трубки свинцового слитка, существенно различны (рис. 9 и рис. 10).

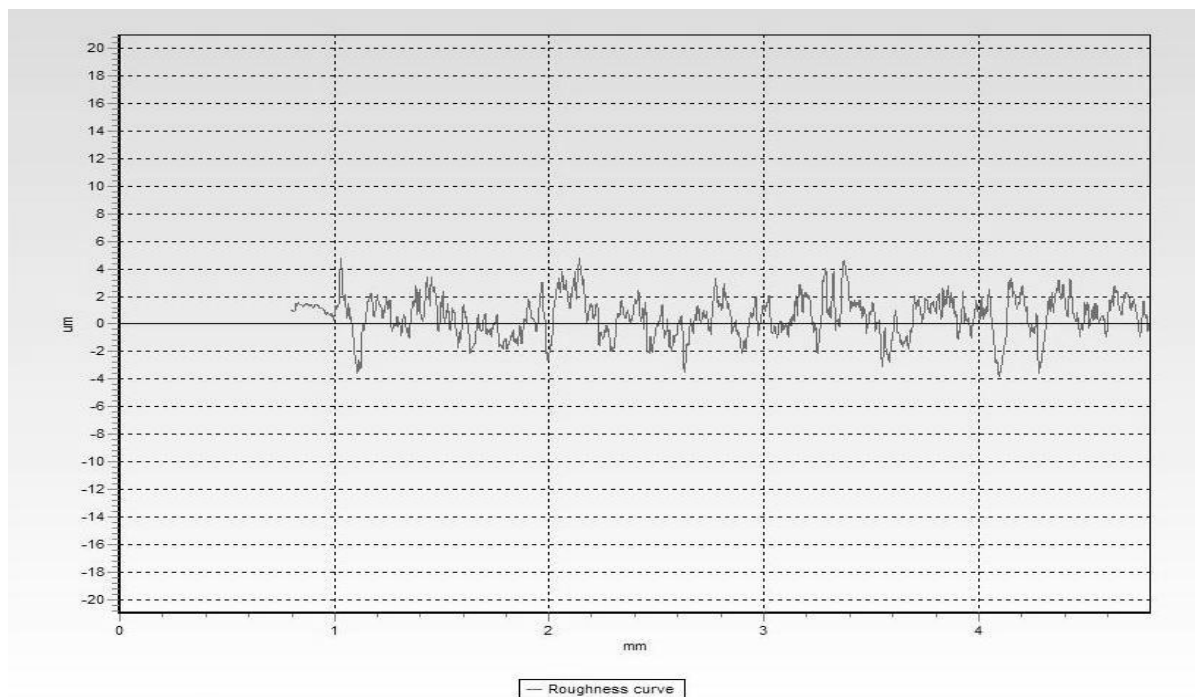


Рис. 9. Шероховатости поверхности трубки до эксперимента

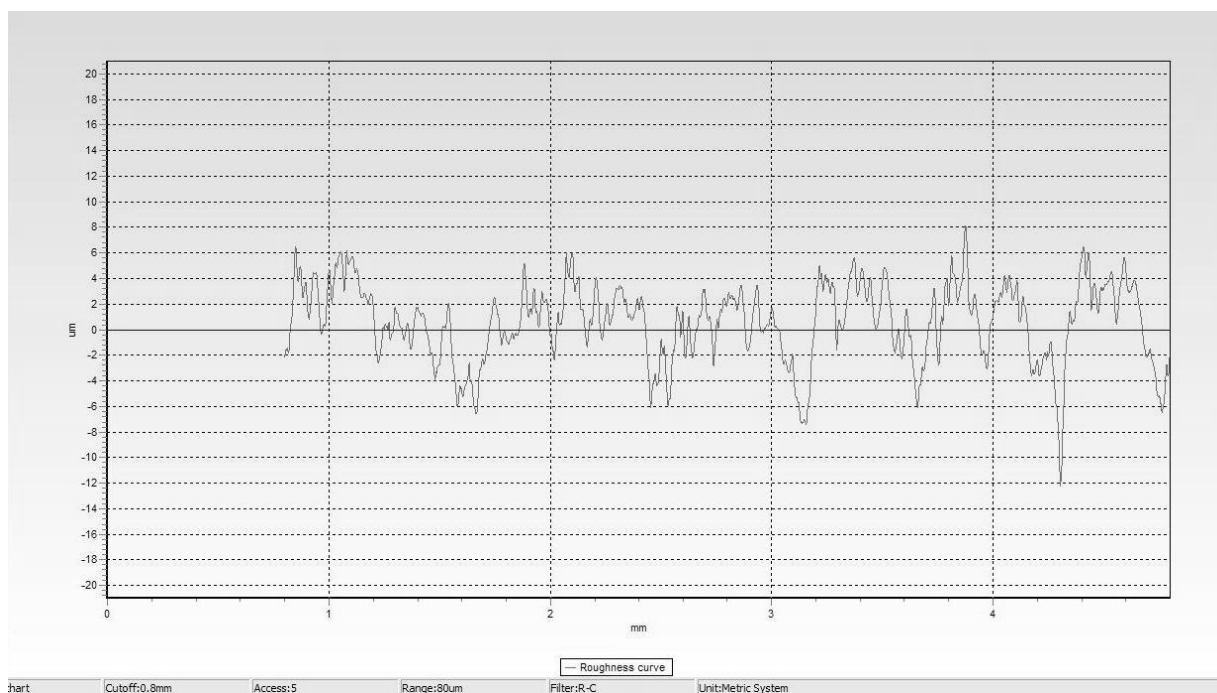


Рис. 10. Шероховатость поверхности трубки после эксперимента  
( $T=470^{\circ}\text{C}$ , 50 часов,  $a=10^{-3}$ ,  $Q=0,27\text{м}^3/\text{ч}$ )

Сводные данные по результатам измерения шероховатости поверхностей по результатам трех серий экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение результатов измерения шероховатости образцов  
по результатам трех серий экспериментов**

1. Поверхность трубки до эксперимента

	50 ч, 75 ч 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$	100 ч, 550 <sup>0</sup> С, $a=10^0$
Ra(ср), мкм	1,079	0,8758
Rz(ср), мкм	6,9383	4,9485

2. Поверхность трубки, выдержанной на воздухе при  $T=550^0\text{C}$ ,  $t=100$  ч

	100 ч 550 <sup>0</sup> С, воздух
Ra(ср), мкм	0,9304
Rz(ср), мкм	4,9311

3. Поверхность трубки после отделения

	50 ч, 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$ , $Q = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$	75 ч, 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$ , $Q = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$	100 ч, 550 <sup>0</sup> С, $a=10^0$ , $Q = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Ra(ср), мкм	2,139333	2,54225	2,7638
Rz(ср), мкм	12,39	14,17	12,6167

4. Поверхность свинца после отделения

	50 ч, 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$ , $Q = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$	75 ч, 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$ , $Q = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$	100 ч, 550 <sup>0</sup> С, $a=10^0$ , $Q = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Ra(ср), мкм	2,369667	2,313	2,7539
Rz(ср), мкм	12,24667	11,77	13,4477

5. Поверхность трубки после дренирования

	50 ч, 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$ , $Q = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$	75 ч, 470 <sup>0</sup> С, $a=10^{-3}$ , $Q = 0,27 \text{ м}^3/\text{ч}$	100 ч, 550 <sup>0</sup> С, $a=10^0$ , $Q = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Ra(ср), мкм	2,1692	2,1528	4,7166
Rz(ср), мкм	11,1086	12,294	20,4900

В процессе эксплуатации контура со свинцовым теплоносителем возможно существенное увеличение шероховатости стенок циркуляционного контура, вследствие отложений примесей, что может приводить к увеличению гидравлического сопротивления циркуляционного контура.

### Выводы

Результаты экспериментов показали следующее:

1. В пристенной зоне поток свинцового теплоносителя через 100 ч циркуляции при средней скорости потока 2 м/с, температуре 550<sup>0</sup>С, термодинамической активности кислорода  $10^{-1}$ - $10^{-0}$  фиксируется образование дисперсной фазы примесей неравномерной толщины до 500 мкм.

При циркуляции свинцового теплоносителя в течение 50 и 75 ч при средней скорости потока 1 м/с, температуре 470<sup>0</sup>С, термодинамической активности кислорода  $10^{-3}$  толщина отложений примесей на поверхности конструкционных материалов достигает нескольких десятков микрон

2. В пристенной зоне во всех случаях фиксируются «отпечатки» газовых пузырей с линейными размерами до 1 мм, в редких случаях – до 1 см.



3. Длительная циркуляция свинцового теплоносителя в каналах, независимо от их исходной шероховатости, приводит к увеличению шероховатости каналов вследствие образования на их поверхностях нерастворенных частиц примесей, что подтверждается соответствующими профилограммами и другими видами анализа. Увеличение шероховатости, в свою очередь, приводит к увеличению гидравлического сопротивления циркуляционного контура.

*Работа проводилась в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года», а также в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

#### Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М. : ИздАТ, 2007. – 434 с.
2. **Молодцов, А.В.** Характеристики теплообмена от свинцового теплоносителя в оборудовании ЯЭУ при эксплуатационном содержании в нем примесей: дисс. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук / Молодцов А.В. – Н. Новгород, 2007.

*Дата поступления  
в редакцию 07.02.2014*

**A.V.Beznosov, T.A.Bokova, K.A.Mahov, A.I.Shumilkov, A.S.Chernysh**

#### **EXPERIMENTAL STUDIES BOUNDARY LAYER: A WALL CONSTRUCTION MATERIAL - LEAD-COOLED FAST BREEDER REACTOR**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** The article presents the results of experimental studies of the boundary layer by lead coolant Express freezing.

**Design/methodology/approach:** Studies were conducted on the high bench by express freezing lead coolant temperature changes lead to flow 470gradC to 320gradC for 2 seconds when the content in it is thermodynamically active oxygen  $10^{-3}$  and experiment with changes in temperature lead to flow 550 gradC to 320 gradC with the same rate of cooling at Content it  $10^{-1}$ - $10^0$  thermodynamically active oxygen in the presence of a solid phase of lead oxides.

**Findings:** First experimentally determined tribological characteristics of the boundary layer flow lead coolant . Reported the presence of a boundary layer particle formation of impurities , probably representing impregnated coolant and dispersed system with the corresponding properties . Confirmed the presence of non-wetting in the contact zone of liquid and solid metals. Defined surface roughness of the steel wall at 08Cr18Ni10Ti vnekonturnoy passivation contour and passivation , as well as during use in contact with the coolant flow lead .

**Research limitations/implications:** The results of these studies are important for reactor circuits NPPs with BREST and MTBF with lead and lead-bismuth coolant.

*Key words:* lead coolant boundary layer, oxide coating, the method of rapid freezing, insoluble impurities, deposition of impurities, microhardness, surface roughness.