

# Тема 7

Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя. Очистка от примесей теплоносителей на основе свинца. Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем. Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы.

# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя

На основании опыта эксплуатации свинцовых и свинец-висмутовых контуров для Ру БРЕСТ-ОД-300 **предложен вариант принципиальной схемы системы технологии теплоносителя**

Предложенный вариант предполагает использование следующих процессов:

- Водородную очистку контура от примесей на основе оксида свинца;
- Фильтрование теплоносителя для очистки от взвешенных примесей;
- Кислородное обогащение теплоносителя для поддержания заданного уровня его окислительного потенциала;
- Очистку защитного газа от аэрозолей;
- Контроль параметров теплоносителя.

# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя



Шлаки на  
трубопроводе



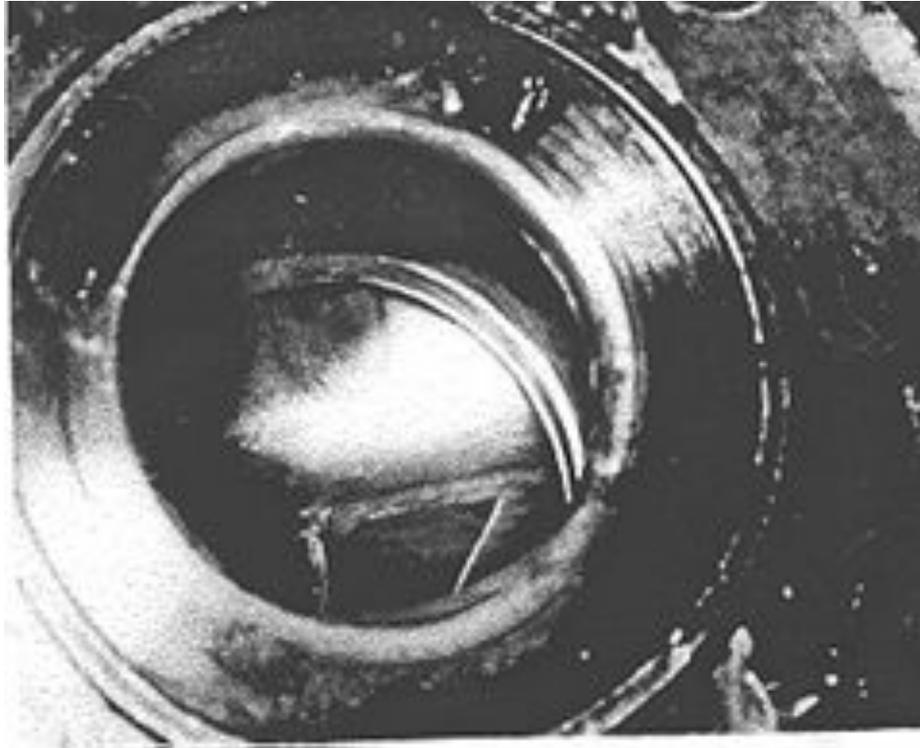
Отложения шлаков в  
контуре при испытаниях  
ГЦН в МОЦКТИ



Отложения шлаков  
в теплообменнике

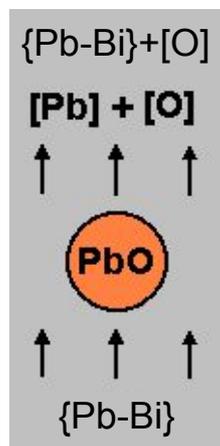
После введения в состав циркуляционных контуров систем технологии теплоносителей подобного состояния поверхностей контуров не наблюдалось

# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя



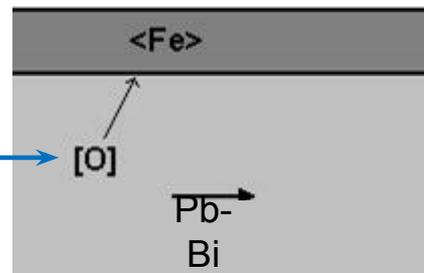
Труба, очищенная от шлаков после водородной регенерации

# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя

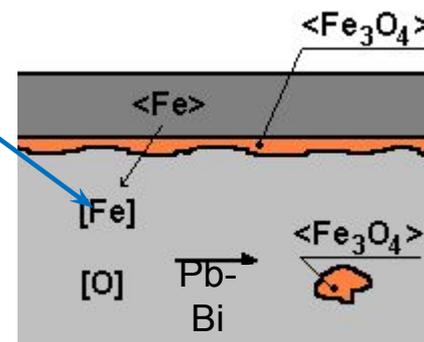


Растворенный кислород

Растворенное железо



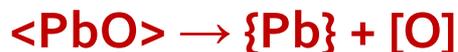
Исходное состояние поверхности стали (без защитной оксидной пленки)



Формирование защитной оксидной пленки.  
Окисление диффундирующих из стали примесей

Возможности метода:  
 $C_{[O]} = 1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-11} \% \text{ масс.}$

Для ЯЭУ принято:  
 $C_{[O]} = 1 \cdot 10^{-6} \div 4 \cdot 10^{-6} \% \text{ масс.}$



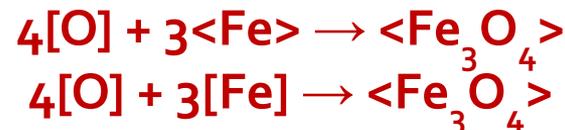
$$Q = K_p \cdot S \cdot (C_s - C_{[O]}), \quad K_p = f(T, Re, C_{[O]}),$$

где  $K_p$  – коэффициент скорости растворения;

$S$  – поверхность растворения;

$C_s$  – концентрация насыщения кислорода;

$C_{[O]}$  – концентрация кислорода в зоне растворения



# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя

## Скорость выхода кислорода из массообменного аппарата

Для массообменников (МА), работающих на принципе растворения оксидов, они определяются температурой теплоносителя и его расходом через аппарат. Полагая, что при любом расходе теплоносителя на выходе (в идеале) достигается состояние насыщения для данного температурного режима, имеем

$$Q_O^{MA} = g_{\text{тепл.}} \cdot \rho_{\text{тепл.}} \cdot C_O^S(t) \cdot 10^4,$$

где:  $C_O^S(t)$  - концентрация насыщения кислородом теплоносителя при температуре  $t$ , %масс;

$g_{\text{тепл.}}$  - расход теплоносителя через массообменник,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\rho_{\text{тепл.}}$  - плотность теплоносителя,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$Q_O^{MA}$  - производительность МА по кислороду,  $\left( \frac{\text{г кислорода}}{\text{ч}} \right)$

В рабочем диапазоне температур МА от  $390$  до  $540^\circ\text{C}$   $C_O^S(t)$  изменяется от  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  до  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  %масс. Задаваясь расходом теплоносителя  $g_{\text{тепл.}} \sim 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , имеем  $Q_O^{MA} \approx (10 \div 100) \left( \frac{\text{г кислорода}}{\text{ч}} \right)$ . При поддержании в МА минимальной температуры  $\sim 330 - 340^\circ\text{C}$

соответствующие потоки снизятся до значений  $Q_O^{MA} \approx (3,6 \div 4,5) \left( \frac{\text{г кислорода}}{\text{ч}} \right)$ . При

поддержании в МА максимальной температуры  $\sim 480 - 490^\circ\text{C}$  поток составит  $Q_O^{MA} \approx 50 \left( \frac{\text{г кислорода}}{\text{ч}} \right)$ .

# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя

## Расчет процесса внутри массообменного аппарата

Скорость растворения оксида свинца в свинце на единицу поверхности оксида может быть рассчитана в диффузионном приближении по формуле:

$$J = D \Delta C / \delta, \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с}),$$

где  $D$  - коэф. диффузии кислорода в свинце,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\Delta C = C^s - C^{\text{МА}}$  – концентрационный напор по толщине диффузионного слоя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\delta$  - толщина диффузионного пограничного слоя, м.

Последние два параметра зависят от гидродинамики внутри массообменного аппарата и могут быть оценены с использованием теории подобия для каналов простой геометрии.

# Поддержание заданного качества СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

## КОНТРОЛЬ КИСЛОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ТЖМТ

$$\lg \frac{a}{a_0} (\%) = 1,2 - 3400 / (T + 273)$$

$$E = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \frac{a}{a_0}$$

где:

$n$  – число электронов, участвующих в реакции;

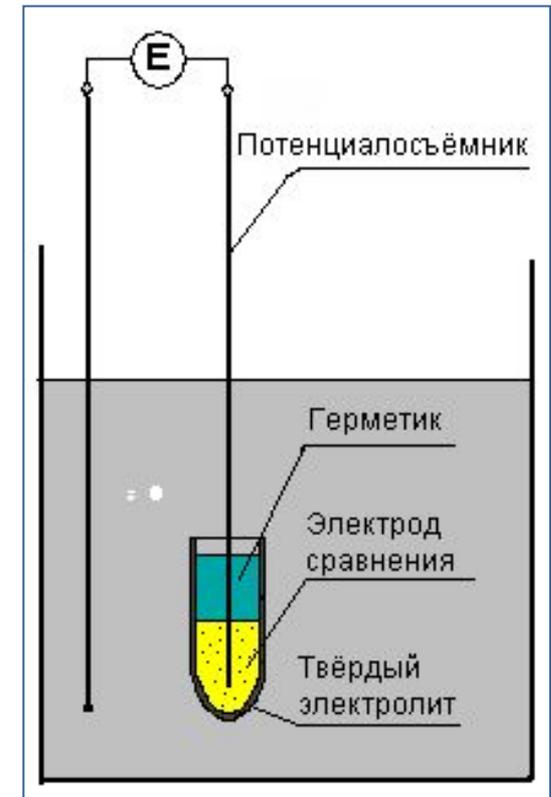
$F$  – число Фарадея;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура,  $K$ ;

$a$  – термодинамическая активность кислорода в **исследуемой среде**;

$a_0$  – термодинамическая активность кислорода в **эталоне сравнения**;



# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя

## КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

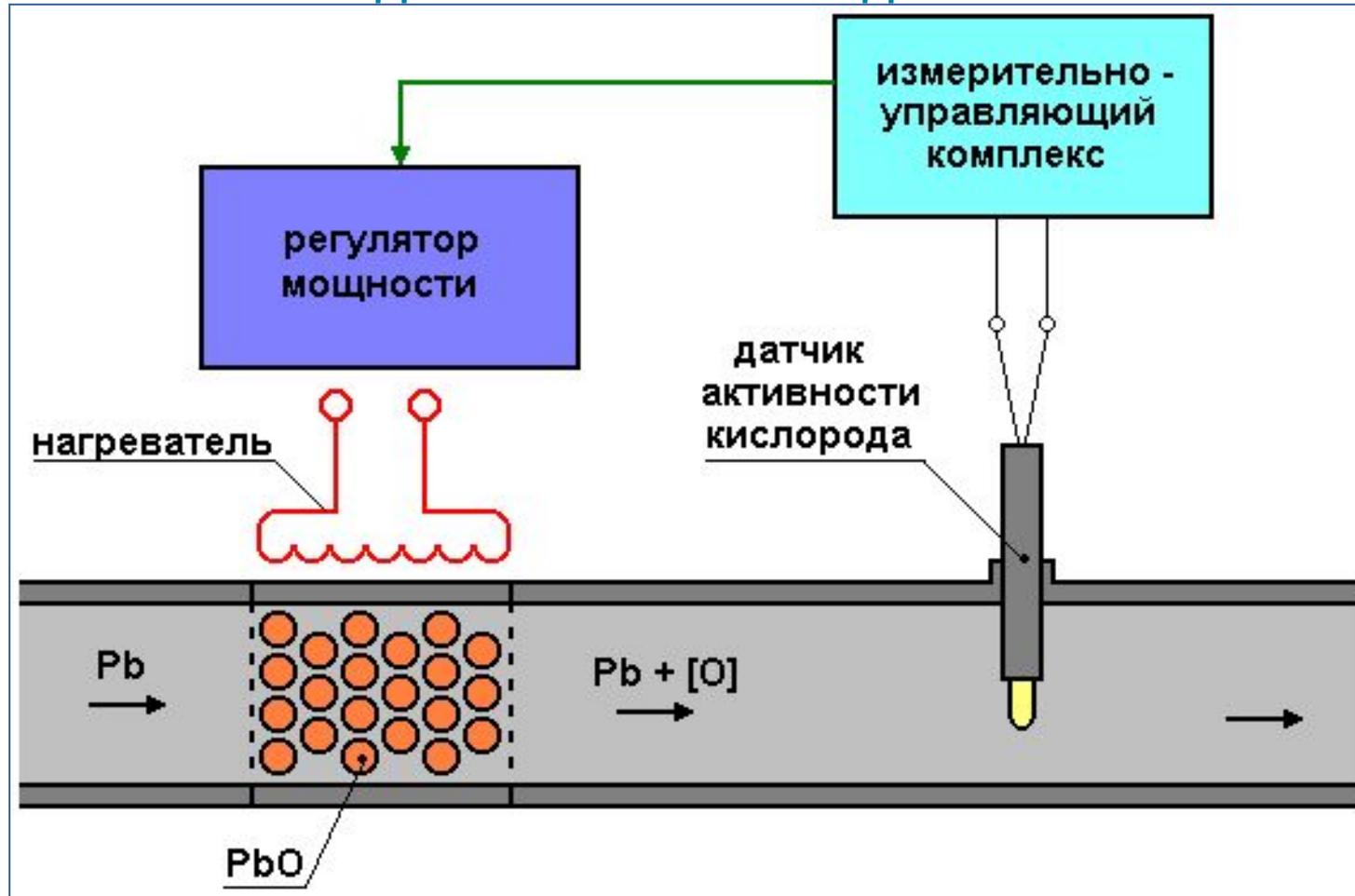
- Рабочая среда – Pb-Bi;
- Диапазон ТДА кислорода –  $10^{-6}$  - 1;
- Предел допускаемой относительной погрешности ЭДС датчика – 10 %;
- Диапазон рабочих температур – 350- 650 °С;
- Рабочее давление – 0 - 1,5 МПа;
- Скорость теплоносителя в основном контуре – 0 - 1 м/с;
- Скорость изменения температуры теплоносителя – до 100 °С/с;
- Вибрация и гидроудары;
- РЕСУРС работы – до 30 000 ч.



Датчик зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений  
(№ 25282-03) Сертификат Госстандарта России RU. С.31.002 А №15464

# Поддержание заданного качества свинцового теплоносителя

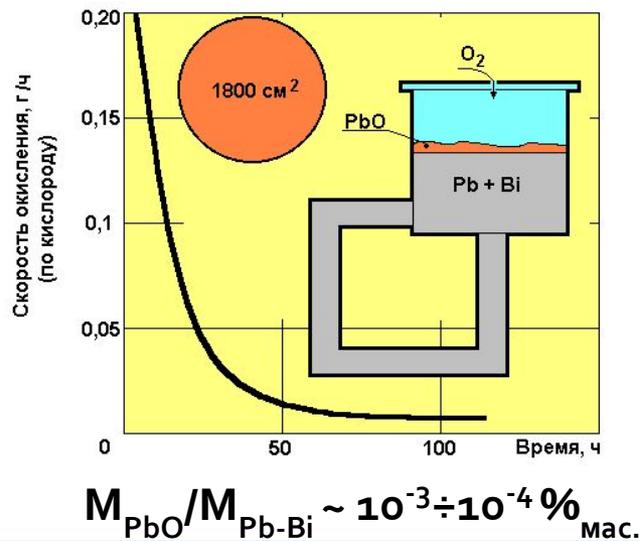
## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ТЖМТ



# Очистка от примесей теплоносителей на основе свинца

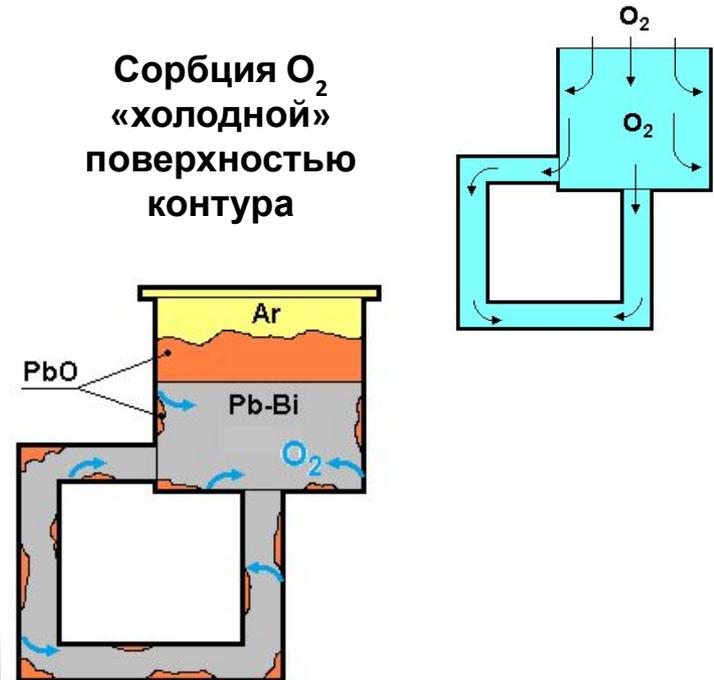
## ОБРАЗОВАНИЕ ШЛАКОВ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ СТЕНДА (ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВОЗДУХОМ)

А) без удаления сплава из циркуляционного контура – минимальное накопление шлаков



Минимизация контакта теплоносителя с кислородом воздуха решает задачу по предотвращению образования шлаков на основе оксида PbO.

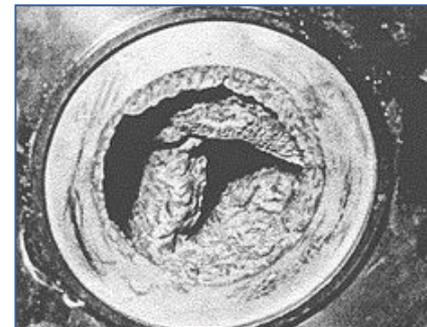
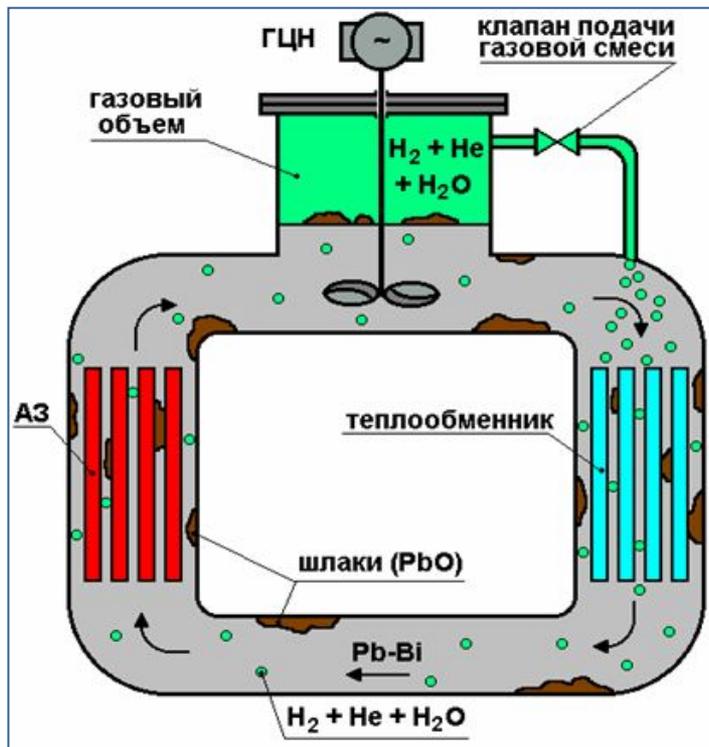
Б) при удалении сплава из циркуляционного контура максимальное накопление шлаков



$$M_{PbO}/M_{Pb-Bi} \sim 10^{-2} \div 5 \% \text{ масс.}$$

# Очистка от примесей теплоносителей на ОСНОВЕ СВИНЦА

## ОЧИСТКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИМИ ГАЗОВЫМИ СМЕСЯМИ



Периодическая очистка теплоносителя и поверхностей контура от отложений водородосодержащими газовыми смесями **после ремонтных работ и перегрузки топлива**

# Очистка от примесей теплоносителей на основе свинца

Экспериментально была получена зависимость скорости вывода кислорода из расплава ЖМТ при взаимодействии с водородосодержащей смесью:

$$K_B = 252.5 \cdot 10^3 \cdot P_{H_2} \cdot C^{0.18} \cdot \exp\left(-\frac{62000}{RT}\right),$$

где:  $K_B$  – константа скорости взаимодействия водорода с расплавом ЖМТ, г<sub>о</sub>/ч·м<sup>2</sup>;

$C$  – концентрация кислорода, вес.%;

$P_{H_2}$  – парциальное давление водорода, атм.

Парциальное давление водорода в смеси зависит от температуры и концентрации кислорода и может быть определено из выражений:

$$\text{Для (Pb)} \lg a = \lg \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} - 1.52 \frac{10^3}{T} - 2.18, \text{ а – активность кислорода}$$

$$\lg P_{H_2O} = 5.986 - \frac{2232.6}{T} \text{ парциальное давление паров воды, атм}$$

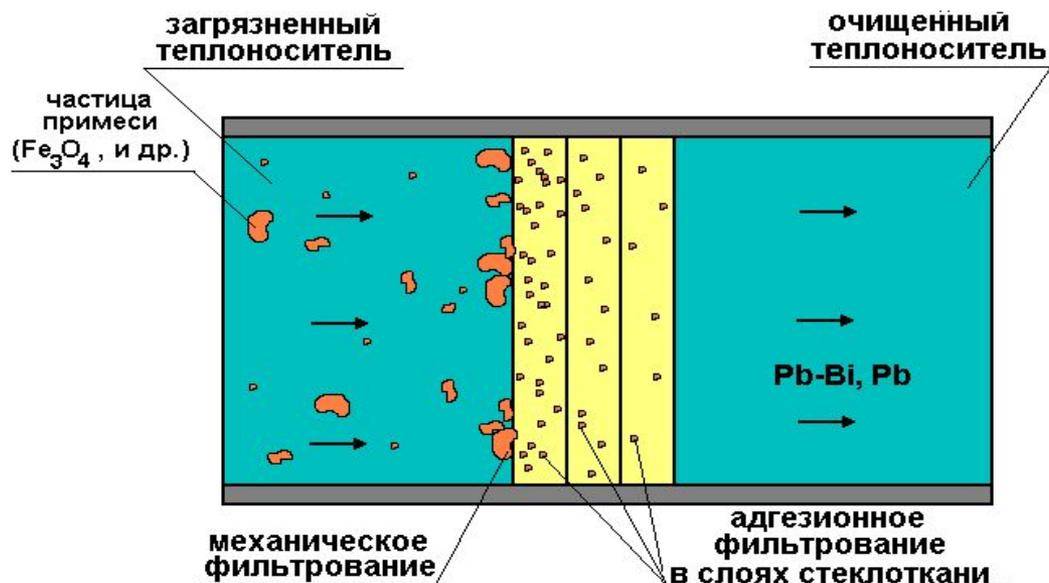
Количество провзаимодействовавшего кислорода на поверхности раздела газ-свинец  $M = K_B S \tau$ , где  $S$  – площадь поверхности взаимодействия;  $\tau$  – время взаимодействия

# Очистка от примесей теплоносителей на основе свинца

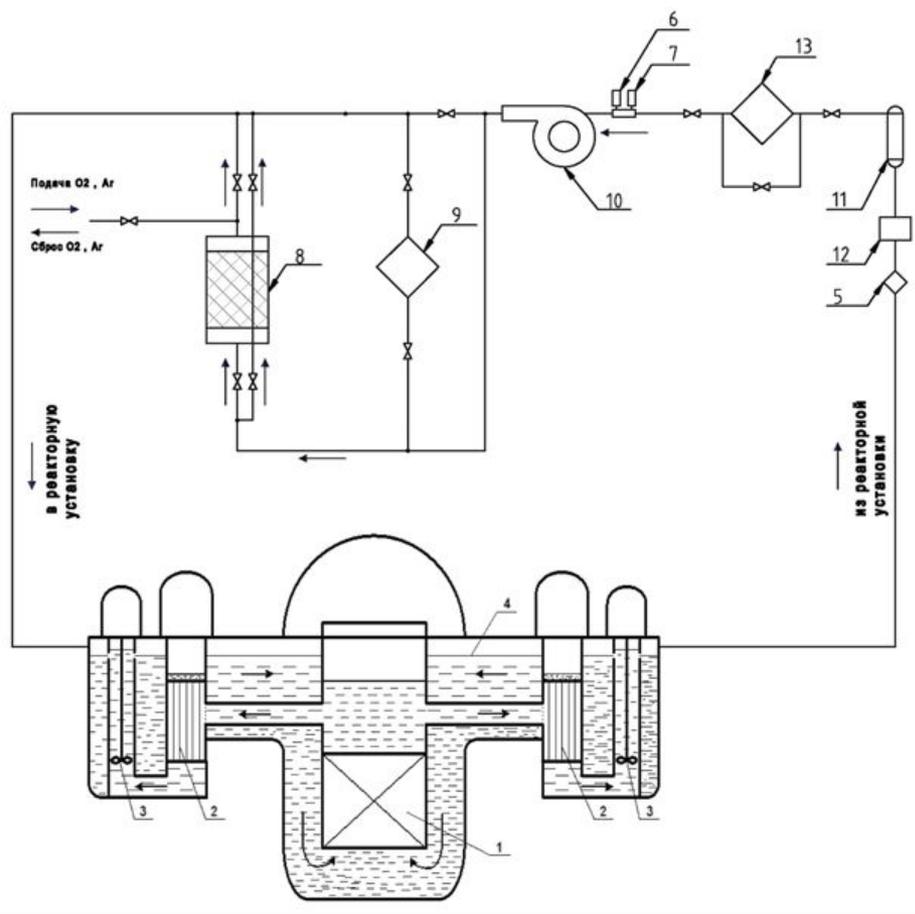
## ФИЛЬТРАЦИЯ ТЖМТ

**Фильтр непрерывной очистки** предназначен для очистки ТЖМТ от механических примесей, образующихся в первом контуре в результате взаимодействия ТЖМТ с конструкционными сталями.

**Принцип действия фильтра** основан на непрерывном удержании в объёме фильтрующего материала взвешенных примесей независимо от природы их образования, концентрации и размеров.



# Очистка от примесей теплоносителей на основе свинца



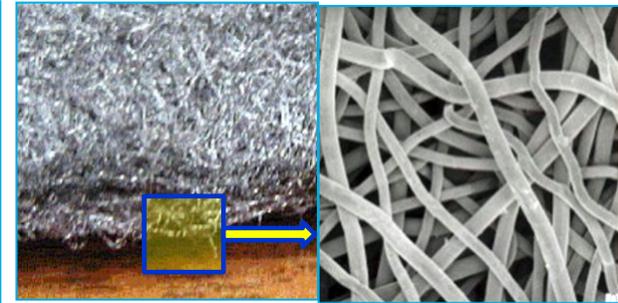
Принципиальная схема  
размещения средств контроля  
и регулирования состава  
защитного газа

1 – активная зона; 2 – парогенератор; 3-главный циркуляционный насосный агрегат;  
4 – поверхность раздела теплоносителя и газа; 5 – высокотемпературный газовый  
фильтр; 6 – датчик кислорода в газе; 7 – датчик водорода в газе; 8 – дожигатель  
водорода; 9 – увлажнитель; 10 – вентилятор; 11 – бак дренажного конденсата; 12 –  
холодильник (конденсатор); 13 – низкотемпературный газовый фильтр

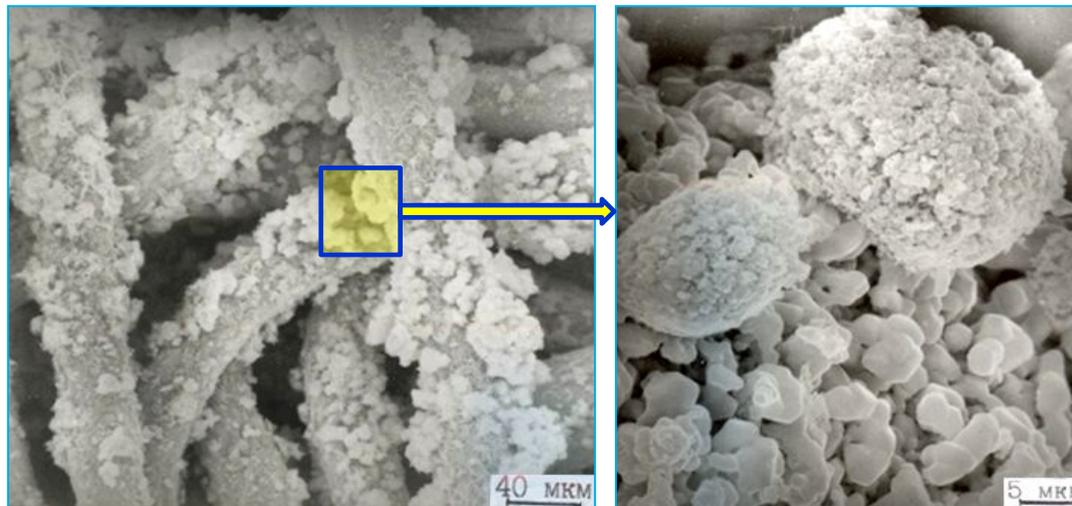
# ОЧИСТКА ЗАЩИТНОГО ГАЗА ОТ АЭРОЗОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ (1 / 2)



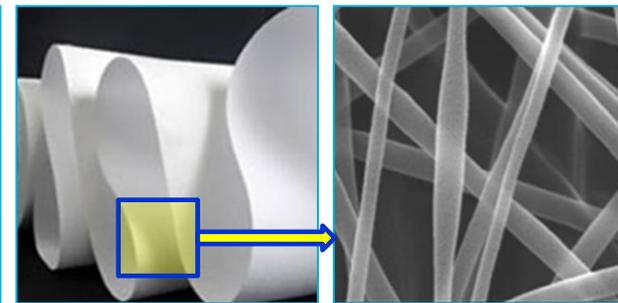
Дисперсный состав и концентрация аэрозолей



Высокотемпературный фильтроматериал



Микрофотографии аэрозольных частиц свинца, уловленных металлической ватой

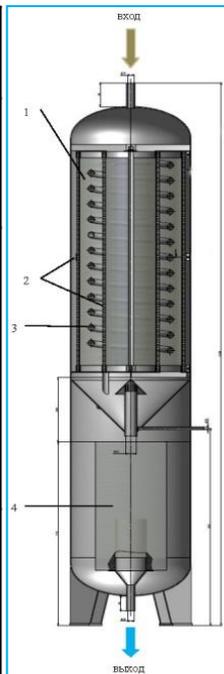


Низкотемпературный фильтроматериал

# ОЧИСТКА ЗАЩИТНОГО ГАЗА ОТ АЭРОЗОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ (2 / 2)

## Двухступенчатый фильтр очистки газа

Наименование характеристики	Показатель
Номинальная производительность, не менее, м <sup>3</sup> /ч	<b>10</b>
Аэродинамическое сопротивление потоку воздуха, не более, Па начальное	<b>300</b>
максимально допустимое	<b>1500</b>
Эффективность очистки для частиц $d \geq 0,3$ мкм, не менее, %	<b>99,9</b>



Экспериментальные исследования газового фильтра на стенде СИАФ-1

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

## Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем

Реакция образования магнетита в свинце



$$(dc(\text{Fe}_3\text{O}_4)/dt)_p = K^{\rightarrow} c(\text{Fe})^3 c(\text{PbO})^4 - K^{\leftarrow} c(\text{Fe}_3\text{O}_4) c(\text{Pb})^4$$

Кинетическая константа равновесия исходной реакции  $K = K^{\rightarrow}/K^{\leftarrow}$

Изменение концентрации магнетита в свинце (моль/моль)

$$dc(\text{Fe}_3\text{O}_4)/dt = K^{\rightarrow}(c(\text{Fe})^3 c(\text{PbO})^4 - c(\text{Fe}_3\text{O}_4)/K) + 4\chi_{\text{ox}}(c(\text{Fe}_3\text{O}_4)_w - c(\text{Fe}_3\text{O}_4))/D_k$$

$c(\text{Fe})$ ,  $c(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ ,  $c(\text{PbO})$  – концентрации железа, магнетита и оксида свинца в потоке теплоносителя;

$c(\text{Fe}_3\text{O}_4)_w$  – концентрация магнетита в свинце у стенки канала;

$D_k$  – гидравлический диаметр канала;

$K^{\rightarrow}$  – константа скорости реакции;

$\chi_{\text{ox}}$  – коэффициент массоотдачи магнетита от стенки канала

Аналогичные зависимости получены для изменения концентрации железа и оксида свинца в теплоносителе

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

$$dc(\text{Fe}_3\text{O}_4)/d\tau = K^{\rightarrow}(c(\text{Fe})^3 c(\text{Pb O})^4 - c(\text{Fe}_3\text{O}_4)/K) + 4\chi_{\text{ox}}(c(\text{Fe}_3\text{O}_4)_w - c(\text{Fe}_3\text{O}_4))/D_k$$

$$dc(\text{Fe})/d\tau = -3K^{\rightarrow}(c(\text{Fe})^3 c(\text{Pb O})^4 - c(\text{Fe}_3\text{O}_4)/K) + 4\chi_f (c(\text{Fe})_w - c(\text{Fe}))/D_k$$

$$dc(\text{PbO})/d\tau = -4K^{\rightarrow}(c(\text{Fe})^3 c(\text{Pb O})^4 - c(\text{Fe}_3\text{O}_4)/K) + 4\chi_o (c(\text{PbO})_w - c(\text{PbO}))/D_k$$

where  $c(\text{Fe})$ ,  $c(\text{PbO})$  – concentrations of iron and lead oxide in coolant flow;

$(c(\text{Fe}_3\text{O}_4)_w)$  – concentration of magnetite close to the wall surface;

$D_k$  – the channel hydraulic diameter;

$K$  – the equilibrium constant of reaction;

$K^{\rightarrow}$  – the constant of rates of direct reactions;

$\chi_{\text{ox}}$  – the mass transfer coefficient in the channel for magnetite.

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

Коэффициент  $\chi$  для круглых каналов определяется исходя из известной критериальной зависимости теплообмена:

$$Nu_d = 5 + 0,025 Pe_d^{0,8},$$

где  $Pe_d = UD_k/D_i$ ;

$$\chi_i = Nu_d D_i/D_k,$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии примеси в теплоносителе (здесь индекс  $i$  характеризует вид примеси);

$D_k$  – диаметр канала;

$U$  – скорость теплоносителя в канале.

Уравнение для термодинамической константы равновесия реакции образования магнетита в свинце:

$$k = \frac{a(Fe_3O_4)}{(a(Fe))^3 (a(PbO))^4}$$

$$k = \exp(-\Delta G^0/RT)$$

$$\Delta G^0 = -0,2921 \cdot 10^6 + 0,6 T, \text{ Дж/моль}$$

Соотношение кинетической и термодинамической констант равновесия

$$K = k / k_x$$

$$k_x = c(Fe)_s^3 c(PbO)_s^4 / c(Fe_3O_4)_s$$

# Описание ансамбля частиц

Плотность распределения массы частиц по размерам (закон Беннета)

$$\varphi(l) = a/l_e (l/l_e)^{a-1} \exp(-(l/l_e)^a) \quad (1)$$

где  $l_e$  и  $a$  – постоянные для данной дисперсной системы.

Плотность распределения есть производная по размеру частиц от функции распределения массы частиц по их размерам

$$\varphi(l) = dD(l)/dl \quad (2)$$

$D(l)$  представляет собой отношение массы фракции частиц размером  $l$  к общей массе взвешенных частиц.

Нормальный закон Гаусса

$$\varphi(l) = \exp(-(l - l_e)^2/(2 \sigma^2))/(\sigma \sqrt{2\pi}) \quad (3)$$

Логарифмически нормальный закон

$$\varphi(l) = \exp(-\ln(l/l_e)^2/(2 (\ln\sigma)^2))/(\ln\sigma l \sqrt{2\pi}) \quad (4)$$

Концентрация частиц размером от  $l$  до  $l+dl$  ( $1/m^3$ )

$$dn(l) = c \varphi(l) dl / m(l) \quad (5)$$

$c$  - концентрация всех частиц ( $кг/м^3$ );  $m(l)$  - масса одной частицы.

# Описание ансамбля частиц

Масса сферической частицы

$$m = \pi l^3 \rho_p / 6 \quad (6)$$

Изменение размера частицы

$$dl = (1/3)(6/(\pi\rho_p))^{1/3} m^{-2/3} dm \quad (7)$$

$$dn(m) = c \varphi(l) l dm / (3m^2). \quad (8)$$

Плотность распределения частиц по массам (спектр масс),  $1/(m^3 \text{ кг})$

$$f(m) = dn(m)/dm = c \varphi(l) l / (3m^2) \quad (9)$$

Плотность распределения массы взвеси по массам частиц ( $1/m^3$ )

$$g(m) = dc/dm = f(m) m \quad (10)$$

так как справедливо соотношение  $dc = dn m$ .

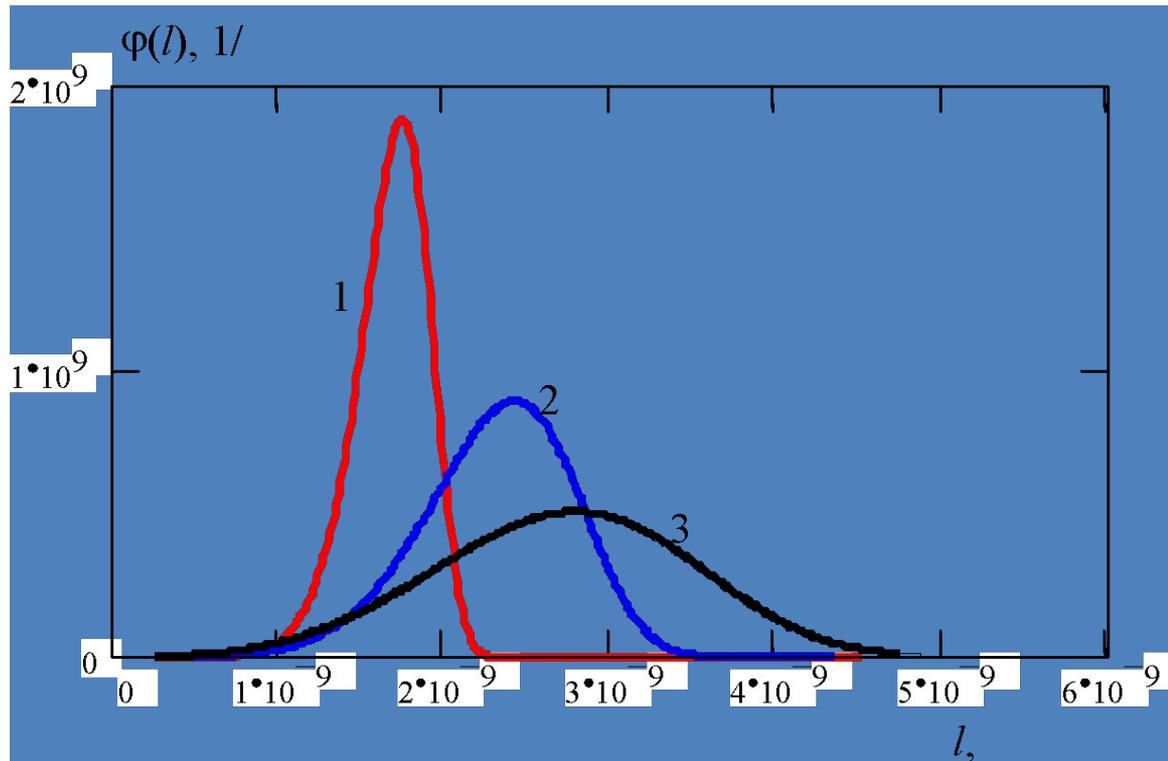
При известной величине  $g(m)$  или  $f(m)$  дисперсной системы можно рассчитать плотность распределения ее частиц по размерам

$$\varphi(l) = 3 m^2 f(m)/(c l) = 3 m g(m)/(c l) \quad (11)$$

При этом суммарная концентрация частиц определяется интегрированием

$$c = \int_0^{\infty} f(m) m dm \quad (12)$$

# Описание ансамбля частиц



Плотности распределения исходной массы взвесей (зародышей частиц) по размерам частиц по закону Беннета для различных определяющих параметров: 1 -  $a = 9$ ,  $l_e = 1,77 \cdot 10^{-9}$  м; 2 -  $a = 6$ ,  $l_e = 2,5 \cdot 10^{-9}$  м; 3 -  $a \approx 34$ ,  $l_e = 3 \cdot 10^{-9}$  м

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

## Эволюция дисперсной системы

Кинетическое уравнение коагуляции

$$\frac{df(m)}{d\tau} = \frac{1}{2} \int_0^m \beta(m-m') f(m-m') f(m') dm' - \int_0^{\infty} \beta(m, m') f(m) f(m') dm' +$$
$$+ \frac{I1(m) + I2(m)}{m \cdot dm} - k_o(m) f(m) \frac{S}{V} - kz(m) f(m)$$

$m, m'$  – массы соударяющихся частиц;

$\beta$  – ядро кинетического уравнения;

$S$  и  $V$  – площадь поверхности, омываемой теплоносителем, и объём рассматриваемого участка проточной части циркуляционного контура;

$k_o(m)$  – коэффициент отложения частиц на поверхности каналов;

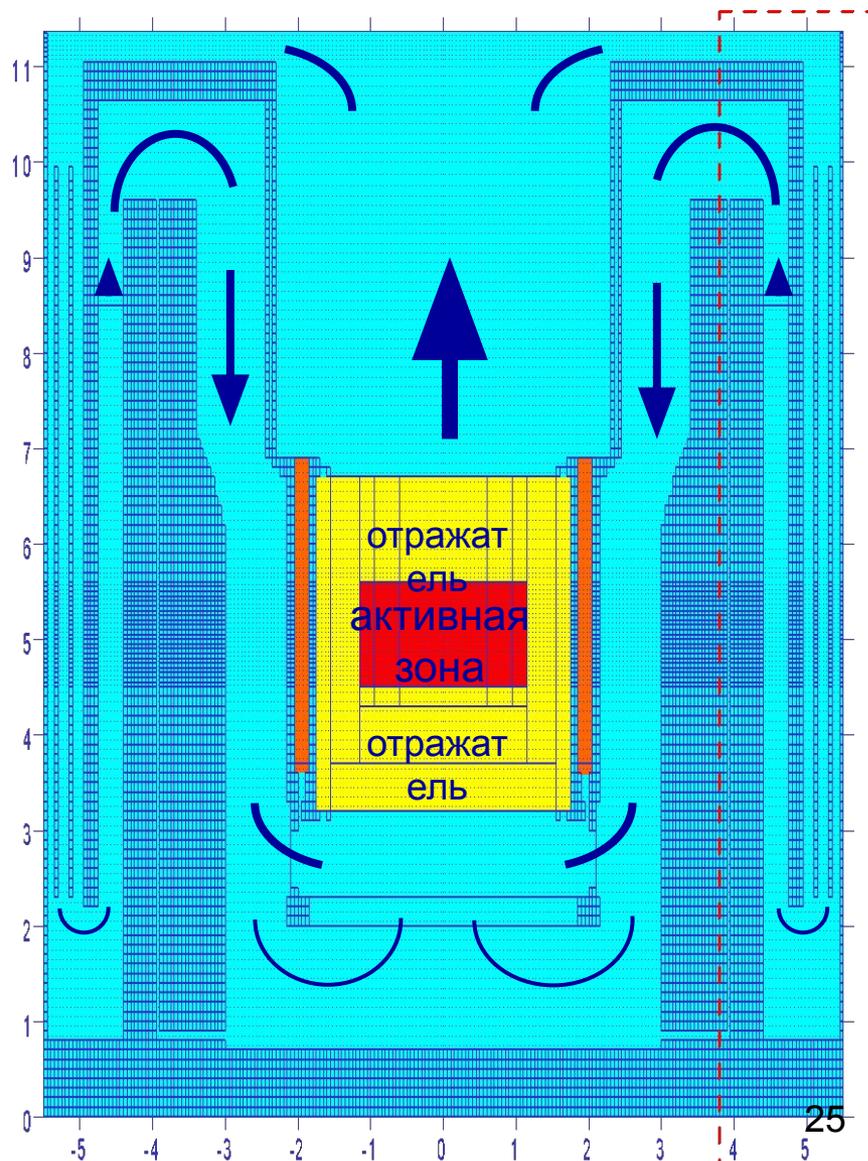
$kz(m)$  – коэффициент, характеризующий осаждение частиц в застойных зонах;

$I1(m), I2(m)$  – интенсивности объемного и эрозийного источников взвеси для частиц массой  $m$ , кг/(м<sup>3</sup> · с).

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

## Моделирование массопереноса продуктов коррозии в первом контуре РУ БРЕСТ-300

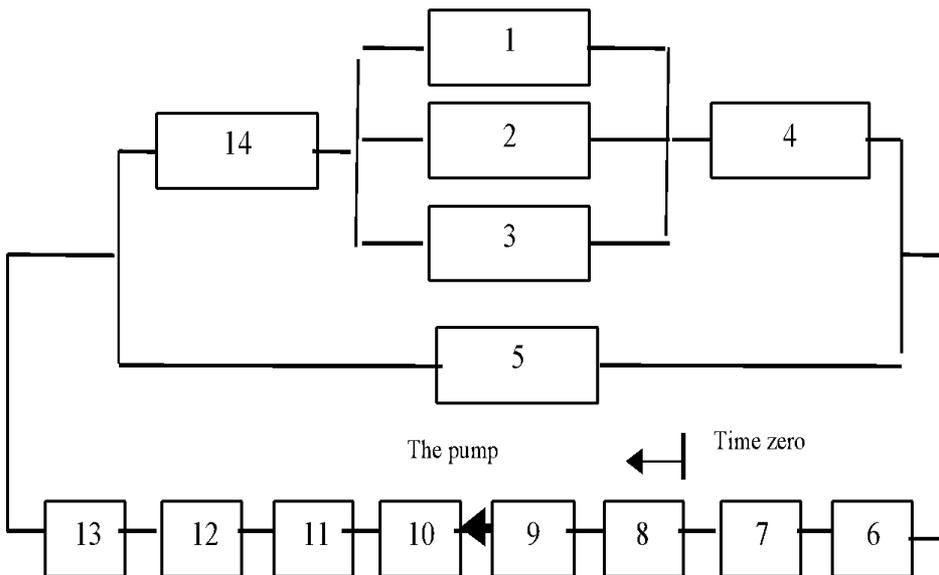
- Выделен гидравлический тракт с циркуляцией основной массы теплоносителя.
- Замкнутый контур условно разбивается на участки, характеризующиеся постоянными геометрическими и гидродинамическими параметрами.
- Участки моделируются прямыми круглыми каналами.
- Используется лагранжева система координат.
- Определено время прохождения теплоносителя в каждом участке контура, геометрические параметры, гидродинамические и температурные режимы на каждом участке.
- Длительность прохода свинца по контуру 136,7 с.



# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

## Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в первом контуре РУ БРЕСТ-300

Расчеты проводились применительно к первому контуру установки БРЕСТ-300. Для этого в контуре выделен гидравлический тракт с циркуляцией основной массы теплоносителя. Основной тракт состоит из ряда участков, отличающихся геометрическими и гидродинамическими характеристиками. Участки моделируются прямыми круглыми каналами.



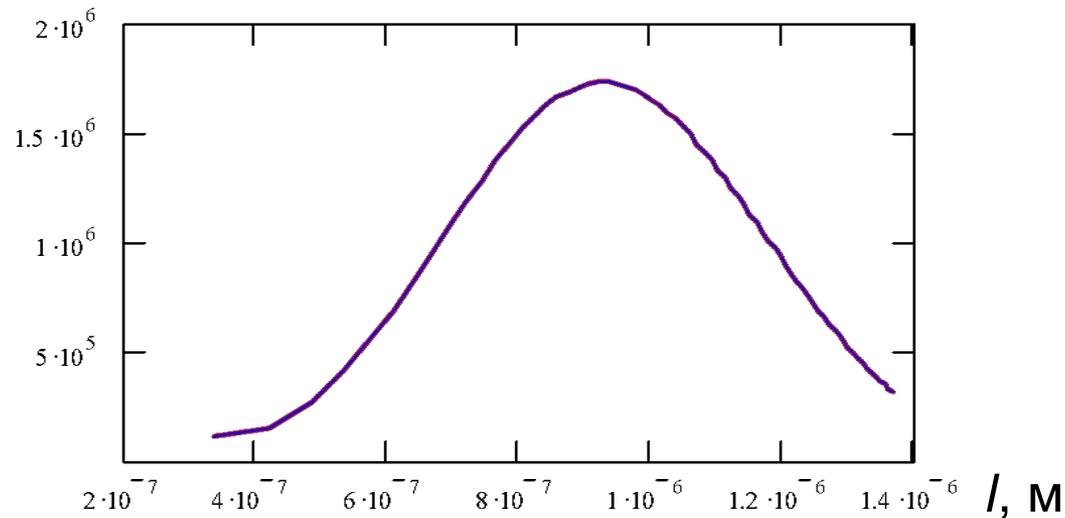
	Название участка	Время пребывания теплоносителя, с	Время от начала отсчета, с
1	Активная зона 1	0,659	112,27
2	Активная зона 2	0,679	112,50
3	Активная зона 3	0,764	112,73
4	Верхний торцевой отражатель	0,857	113,59
5	Боковой отражатель	50	117,35
6	Подъемный участок	15,76	133,11
7	Патрубки ПГ	3,59	136,7
8	ПГ	9,26	9,26 начало цикла
9	Вх. коллект. насоса	0,76	10,2
10	Вых. коллект. насоса	3,21	13,23
11	Бассейн	63,16	76,39
12	Опускной участок	30,59	107,34
13	Напорная камера	3,87	111,21
14	Нижний торцевой отражатель	0,83	112,04

Схема расположения участков основного контура циркуляции установки БРЕСТ-300

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем

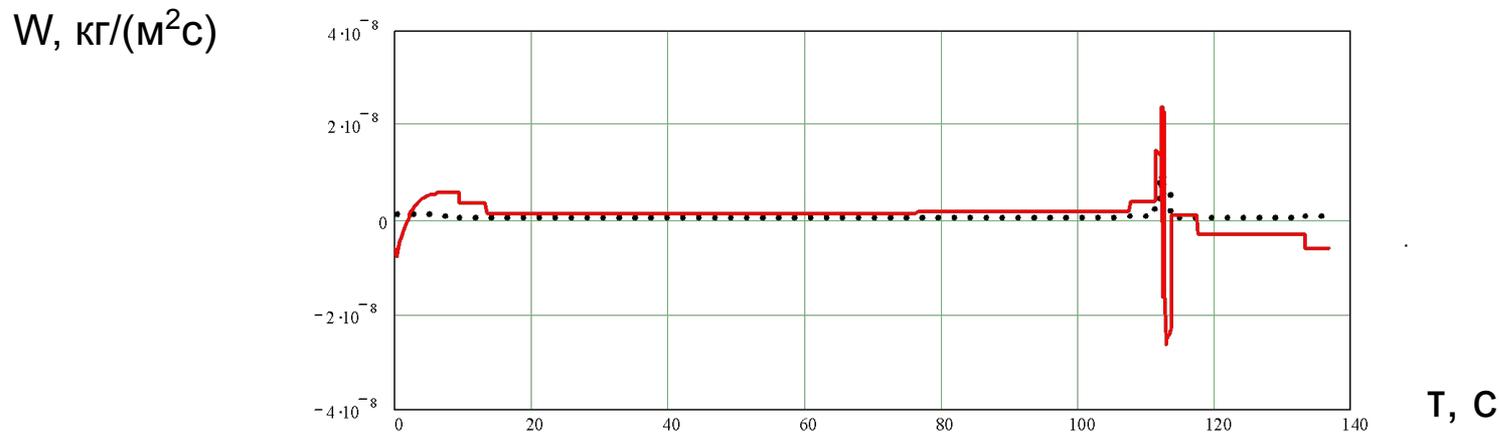
$\phi(l)$ , 1/м



Плотность распределения массы взвесей по размерам частиц через 200 проходов свинца по контуру

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

## Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем



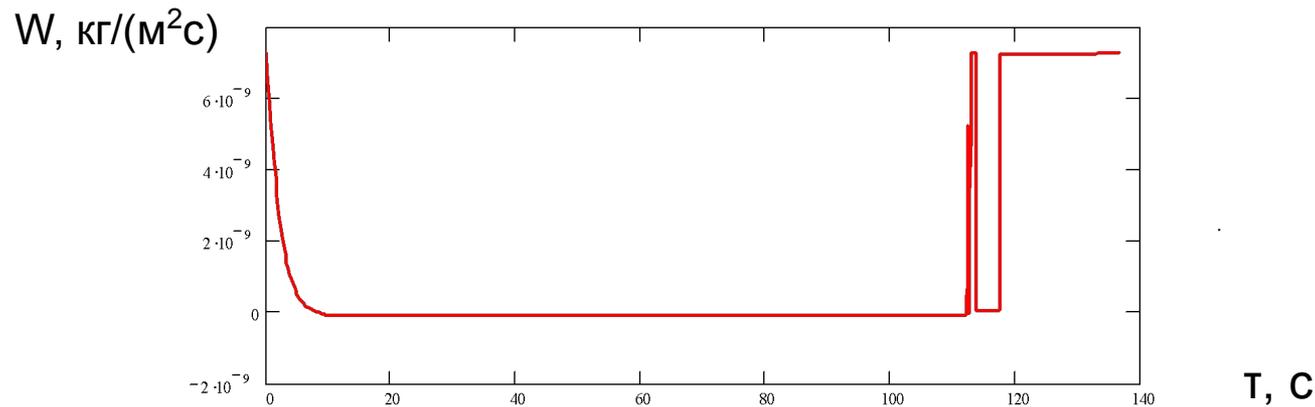
Распределение потоков магнетита на поверхность проточной части по длине циркуляционного контура установки БРЕСТ-300 (сплошная – осаждение из раствора, пунктир – осаждение частиц)

Начальное значение толщины оксидной пленки по всей поверхности контура принято равным 10 мкм. Отрицательные значения потока соответствуют диссоциации магнетита. На входном участке активной зоны происходит накопление магнетита на поверхности каналов. В экстремальной точке скорость роста слоя может достигать 180 мкм/год. На выходе из активной зоны происходит накопление отложений за счет осаждения частиц магнетита со скоростью около 55 мкм/год, но в то же время – уменьшение толщины оксидного слоя за счет диссоциации магнетита со скоростью около 170 мкм/год.

Имеет место диссоциация магнетита на входе в парогенератор со скоростью около 50 мкм/год.

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

## Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем

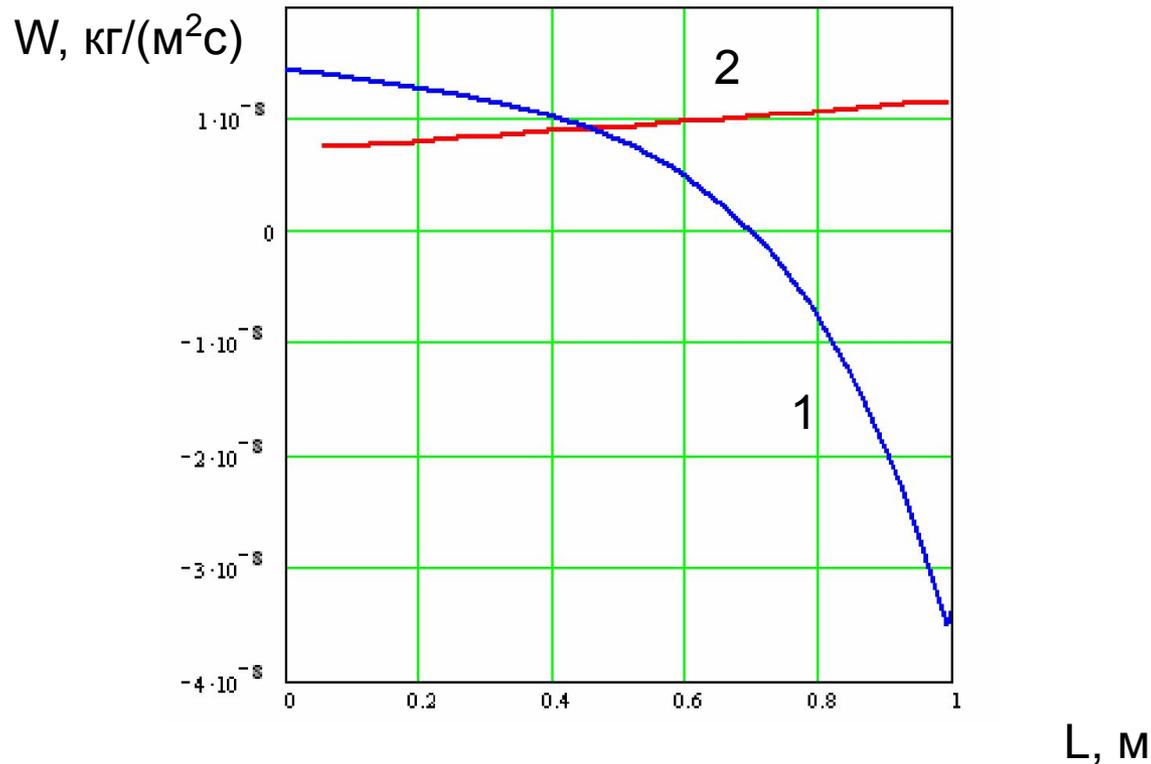


Распределение потоков железа, выходящего из стали, по длине по длине циркуляционного контура установки БРЕСТ-300

Максимальный выход железа из стали имеет место на выходе каналов активной зоны. В экстремальной точке поток железа достигает  $7 \cdot 10^{-9}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), что соответствует уменьшению толщины стальной стенки со скоростью около 30 мкм/год. Примерно такая же скорость растворения стали будет сохраняться во всей высокотемпературной зоне контура (550°С) до входа теплоносителя в парогенератор.

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

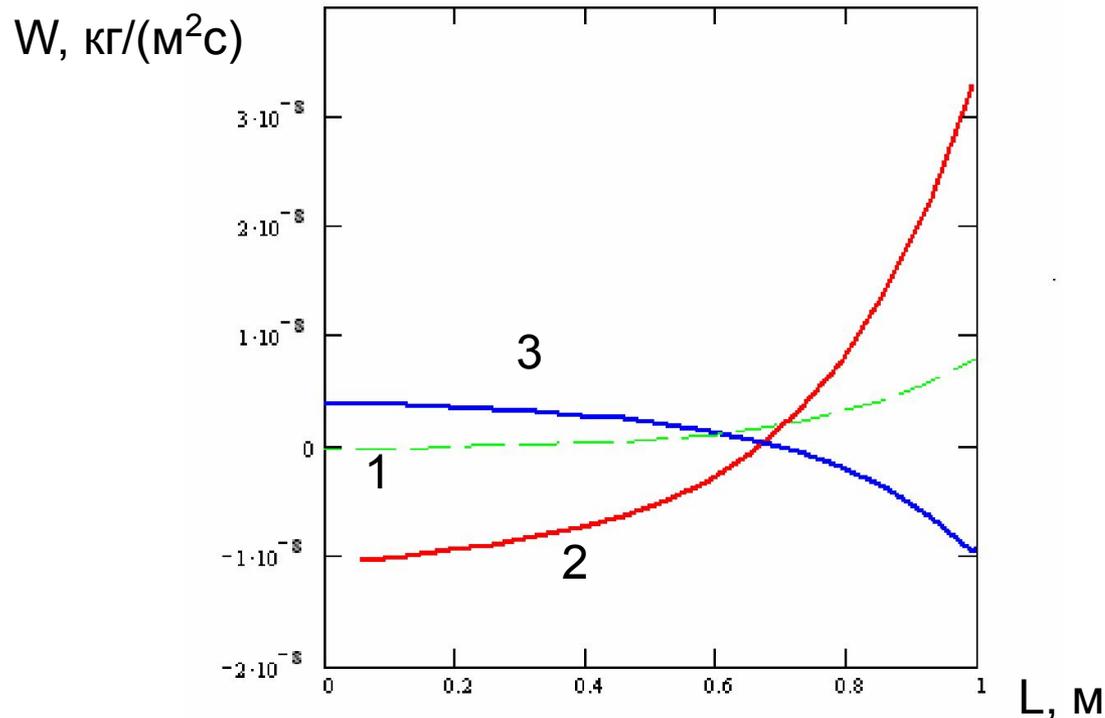
Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем



Распределение потоков магнетита и частиц по длине каналов активной зоны (1 – осаждение из раствора, 2 – осаждение частиц)

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

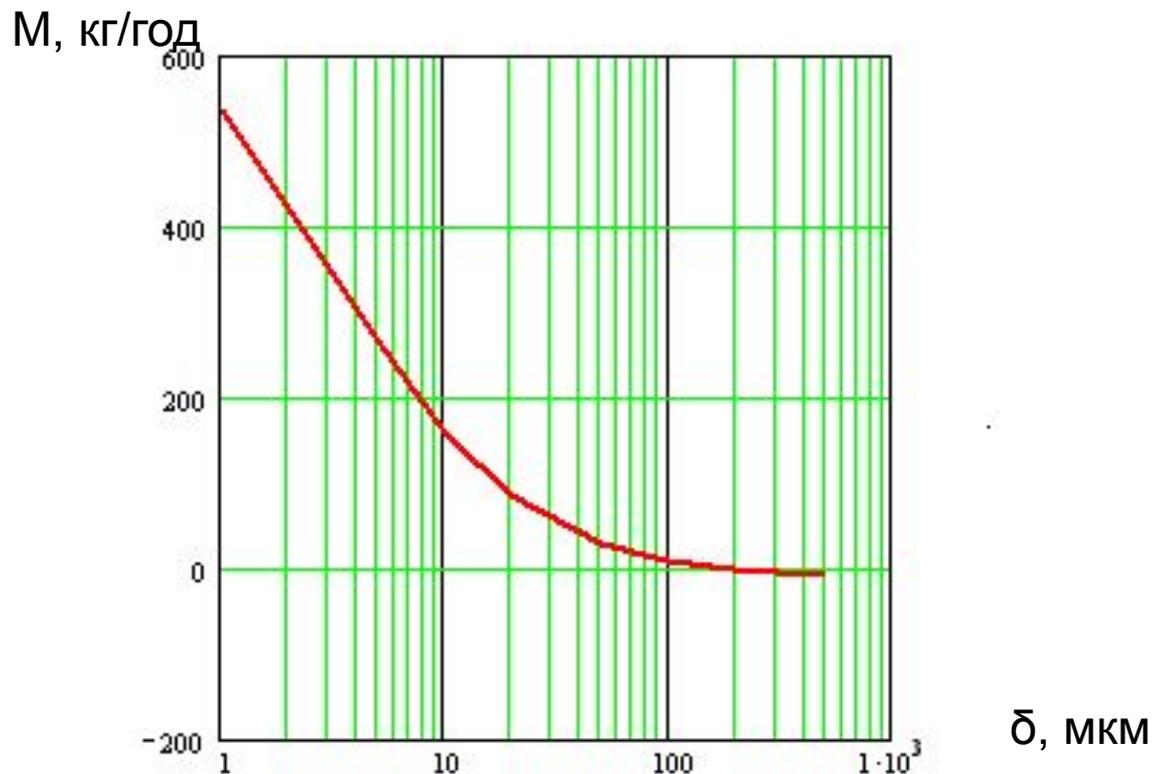
Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем



Распределение потоков железа, выходящего из стали (1) и поступающего в теплоноситель (2), а также кислорода (3) из теплоносителя в оксидное покрытие по высоте активной зоны

# Теория и расчет массопереноса продуктов коррозии в контурах со свинцовым теплоносителем

Моделирование массопереноса продуктов коррозии стали в контурах со свинцовым теплоносителем



Выход железа из стали в зависимости от толщины оксидной пленки в первом контуре БРЕСТ-300

# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы

Уравнение движения стенки пузырька в жидкости

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{\left( p' - p_{\infty} - \frac{2\sigma_{lv}}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R} \right)}{\rho}$$

где  $R$ ,  $\dot{R}$ ,  $\ddot{R}$ , – радиус, скорость и ускорение движения стенки пузырька;

$p'$  – давление в пузырьке газа;  $p_{\infty}$  – давление в свинце;

$\sigma_{lv}$  – поверхностное натяжение;

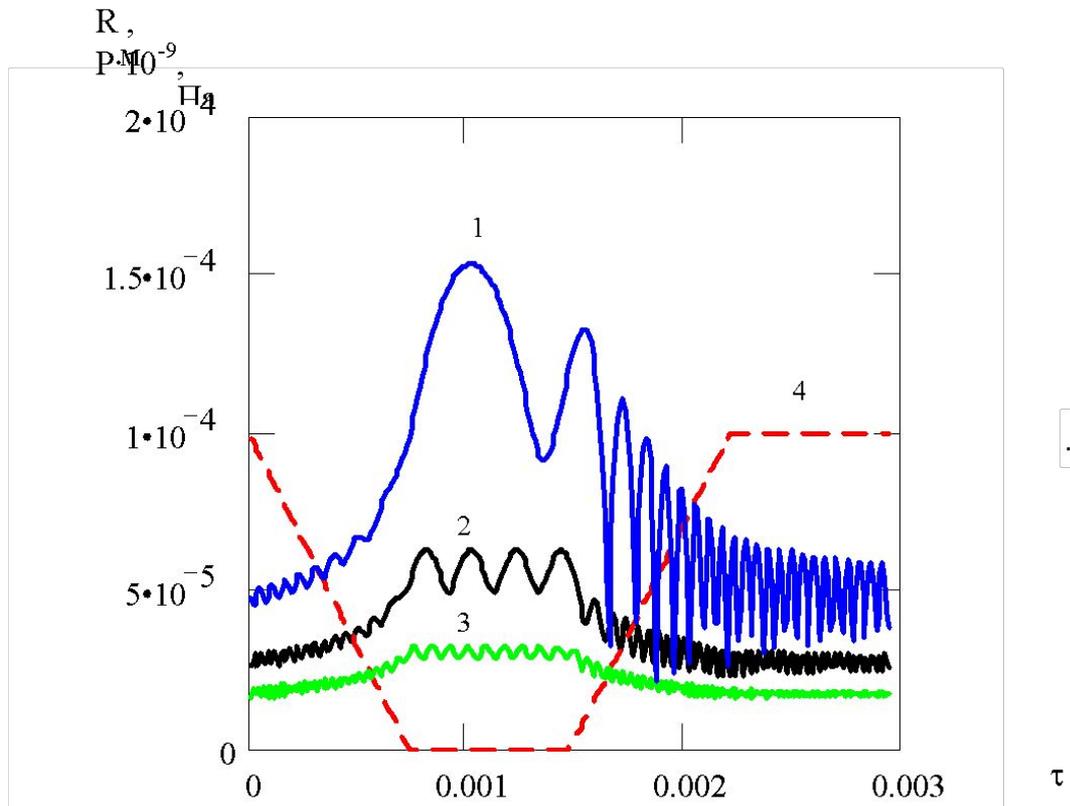
$\eta$  – вязкость жидкости;

$\rho$  – плотность жидкости.

$$\dot{R} = (2(p' - p_{\infty})/3\rho)^{0,5} \quad \text{при постоянном давлении } p_{\infty}$$

# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы

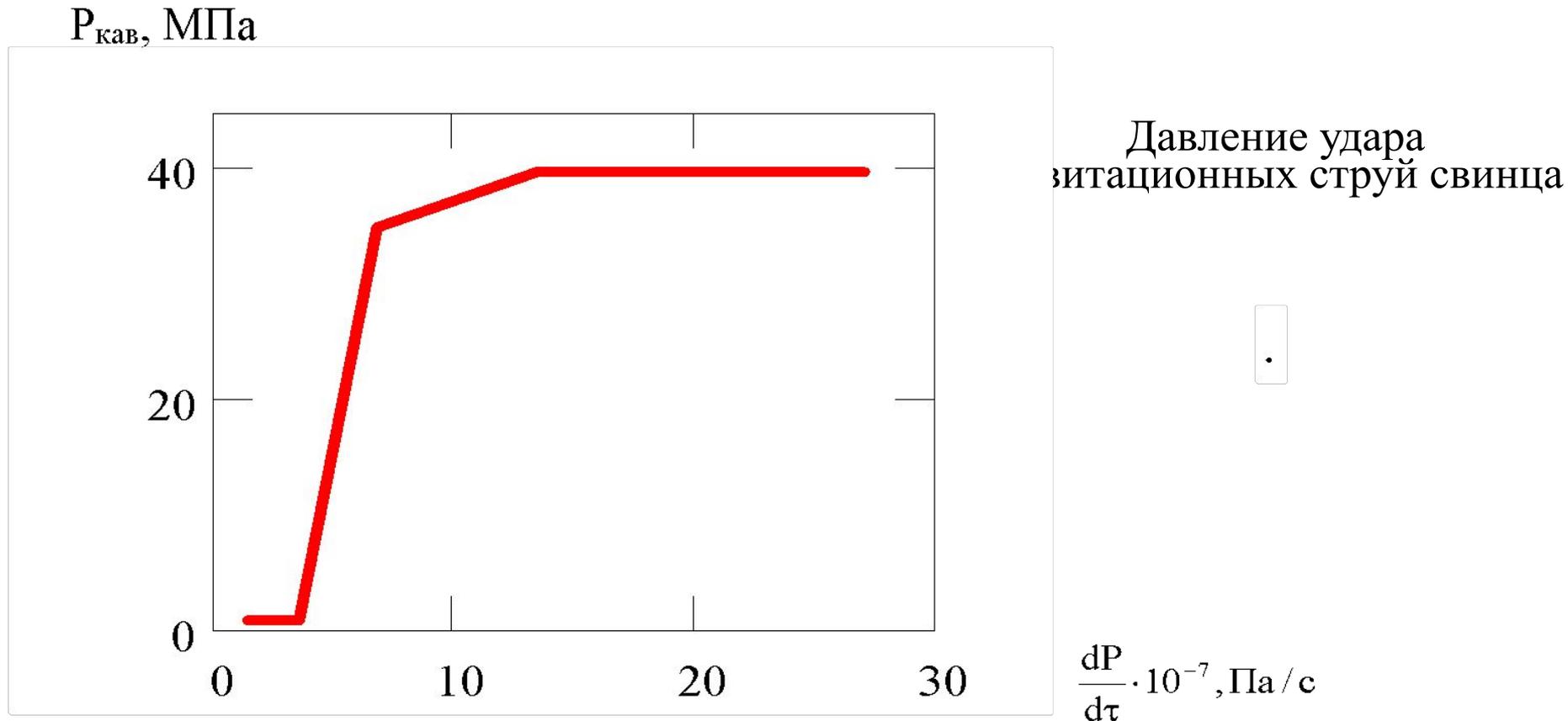
Изменение радиуса пузырьков газа в свинце при обтекании выступа на образце стали



Начальный радиус пузырька  $R_0$ :  
1 – 50 мкм; 2 – 30 мкм; 3 – 20 мкм;  
изменение давления в жидкости (кривая 4).

$$\frac{dP}{d\tau} = 14 \cdot 10^7 \text{ Па} / \text{с}$$

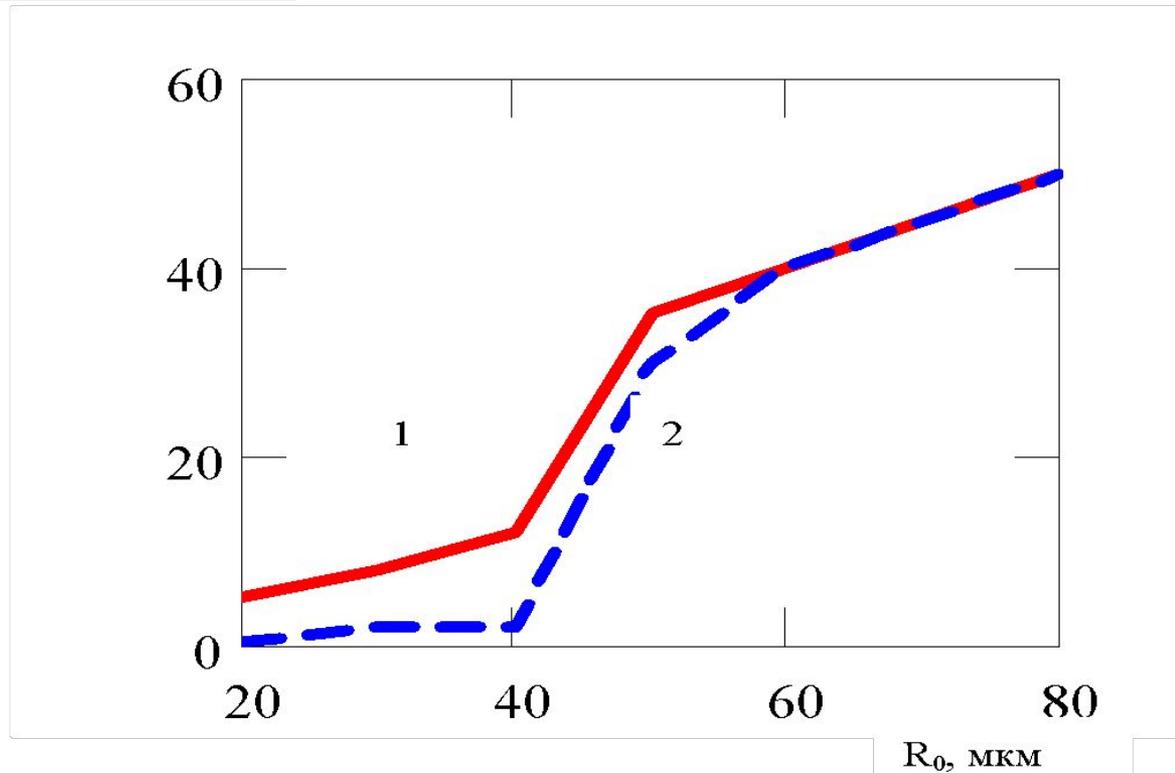
# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы



Зависимость от скорости изменения давления в теплоносителе для  $R_0=50$  мкм.

# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы

$P_{\text{кав}}$ , МПа



Давление удара  
кавитационных струй  
свинца

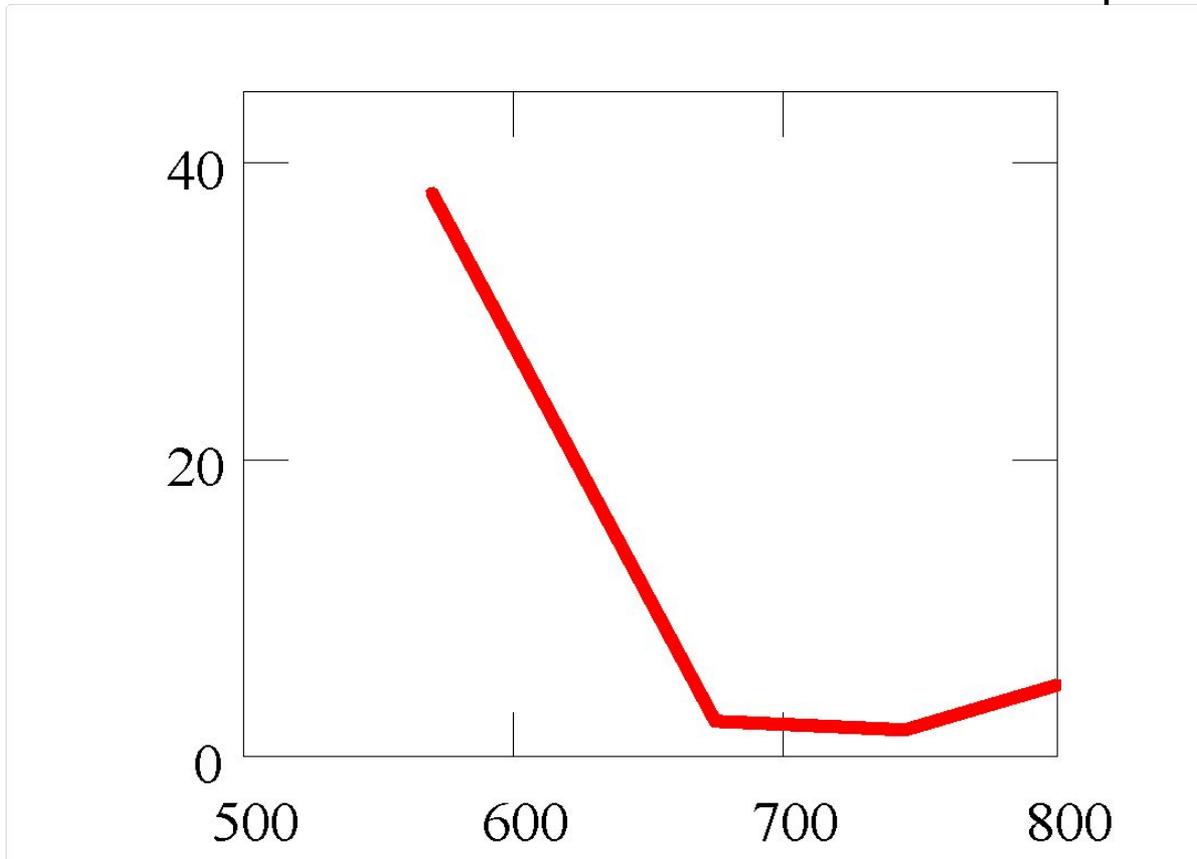
Зависимость от размера пузырьков газа: 1 –  $\frac{dP}{d\tau} = 14 \cdot 10^7 \text{ Па} / \text{с}$

2 –  $\frac{dP}{d\tau} = 7 \cdot 10^7 \text{ Па} / \text{с}$

# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы

$\sigma$ , МПа

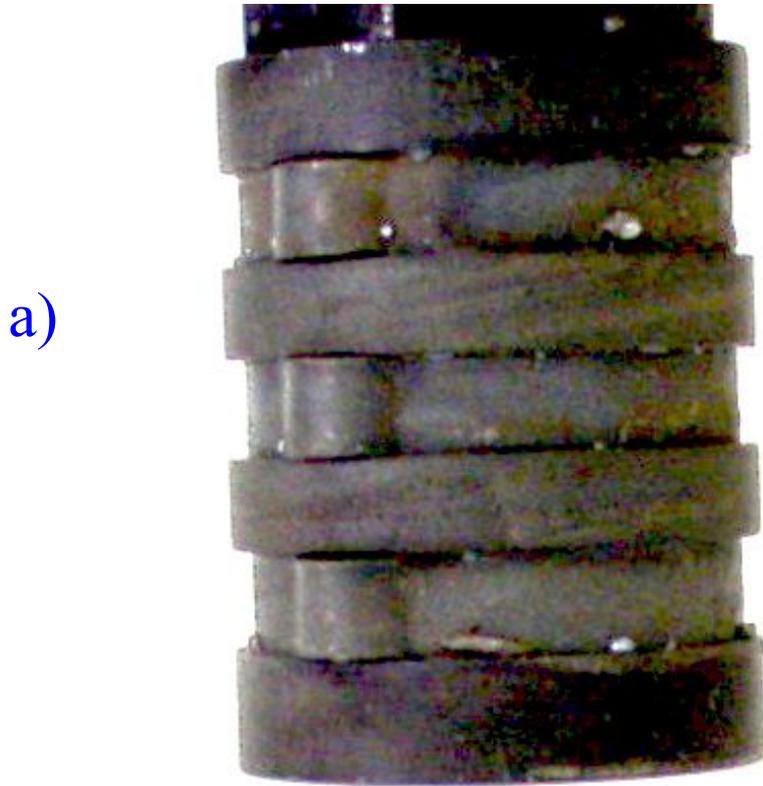
Зависимость предела  
прочности оксида железа от  
температуры



t, °C



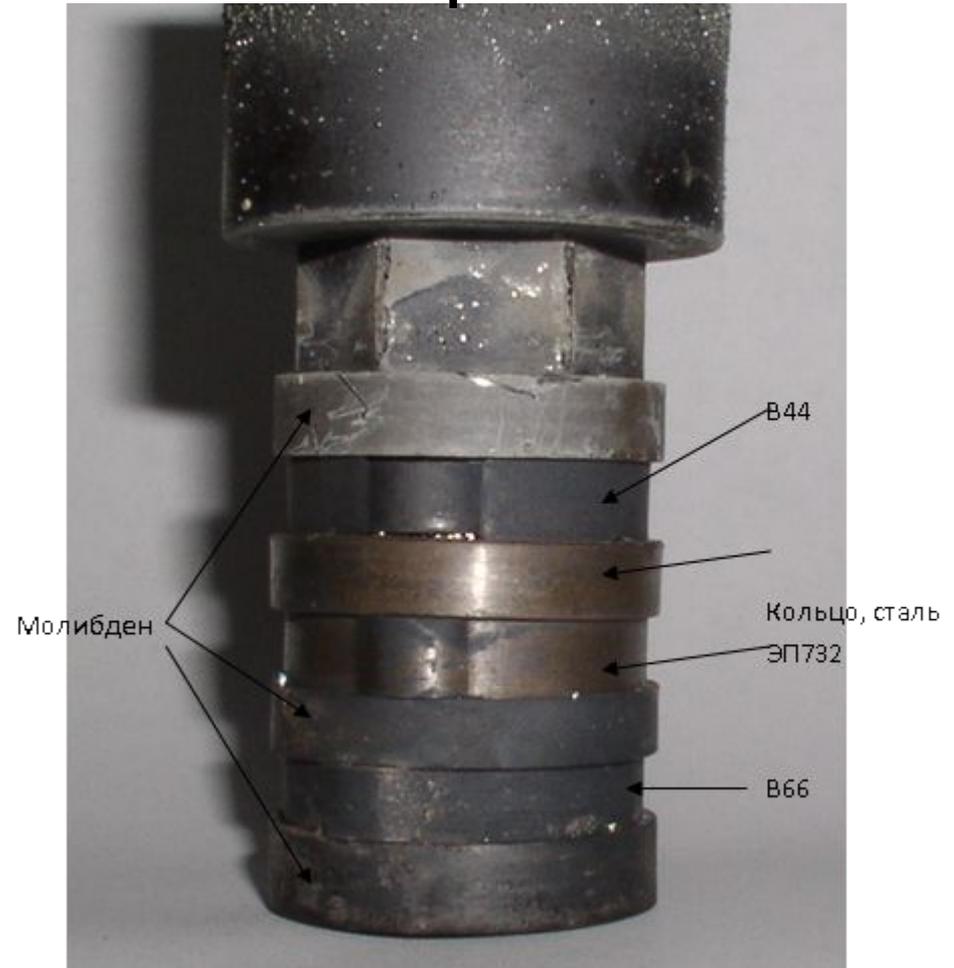
# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы



Вид на места расположения кавитационных каверн за выступами на эрозионных образцах при 900 об/мин и 650<sup>0</sup>С:

а) после испытаний в свинце; б) после отмывки в натрии.

# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы



Вид на места расположения кавитационных каверн за  
выступами на эрозионных образцах после испытаний в свинце  
при 1200 об/мин и 650<sup>0</sup>С.

# Эрозионное воздействие свинца на конструкционные материалы

## Эрозия сталей при обтекании выступа на образце

Выступ высотой 2 мм с кривизной радиусом 2,5 мм, набегающий поток свинца со скоростью 1,6 м/с при 650<sup>0</sup>С в течение 10 ч и активности кислорода  $a_o = 1$  (1200 об\мин):

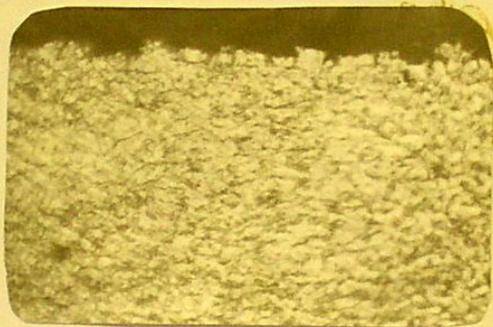
а) сталь ЭП302 (очаг глубиной до 60 мкм), ×200

б) сталь 10Х9НСМФБ (частичное выпадение зерен на глубину 5-10 мкм), ×500

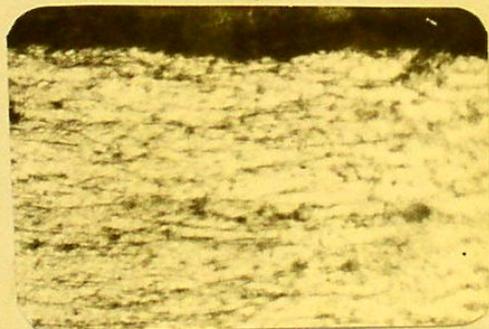
в) сталь ЭП823 (небольшие неровности на глубину 2-4 мкм), ×500



а)



б)



в)

# ЗАДАЧИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОРПУСА АТОМНОГО РЕАКТОРА И ОБОРУДОВАНИЯ РУ С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ Pb и Pb-Bi

## Pb-Bi

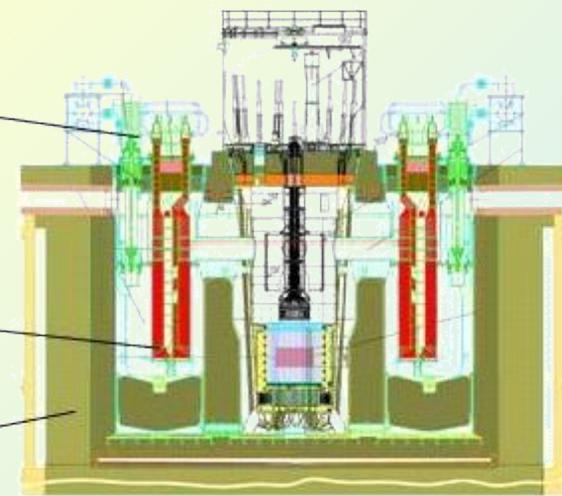
### Парогенератор

- Коррозионная стойкость в пароводяной среде при ресурсе до 400 тыс. час.
- Коррозионная стойкость в жидком Pb и Pb-Bi.

### Корпус + ВКУ

- Коррозионная стойкость в жидком Pb и Pb-Bi.
- Радиационная стойкость при повреждающих дозах до 20-30 сна.

## Pb



**СВБР-100**

**Брест - 300<sup>42</sup>**

# РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ Pb и Pb-Bi

## АПЛ пр. 705

- Разработка конструкционных материалов: аустенитной кремнистой стали 10X15H9C3B1 (ЭП 302), низколегированных кремнистых сталей 15X1CMФБ, 10X1C2M
- Отработка технологии теплоносителя
- Предварительное окисление тракта теплоносителя в газовых и жидкометаллических средах;
- Периодическая обработка сплава Pb-Bi водородом с последующим добавлением кислорода

**Pb-Bi,**  
 **$T_{max} = 465^{\circ}\text{C}$**

## СВБР-100

- Применение сталей
- 10X15H9C3B1 (ЭП 302) (ВКУ)
- биметаллические трубы в парогенераторе 10X15H9C3B+ 03X21H32M3B (ЭП 302 + ЧС-33)
- Поддержание концентрации  $\text{O}_2$  в Pb-Bi на уровне  $10^{-6} \%$

**Pb-Bi,**  
 **$T_{max} = 490^{\circ}\text{C}$**

## БРЕСТ-300

- Применение сталей: аустенитной кремнистой стали 10X15H9C3B1 (ЭП 302), 16X12BMCФ5P (ВКУ), 9%-хромистой стали с кремнием 10X9HCMФБ, аустенитной кремнистой стали X18H13C2AMBФ5P (трубы парогенератора)
- Поддержание концентрации  $\text{O}_2$  в Pb на уровне  $10^{-6} \%$

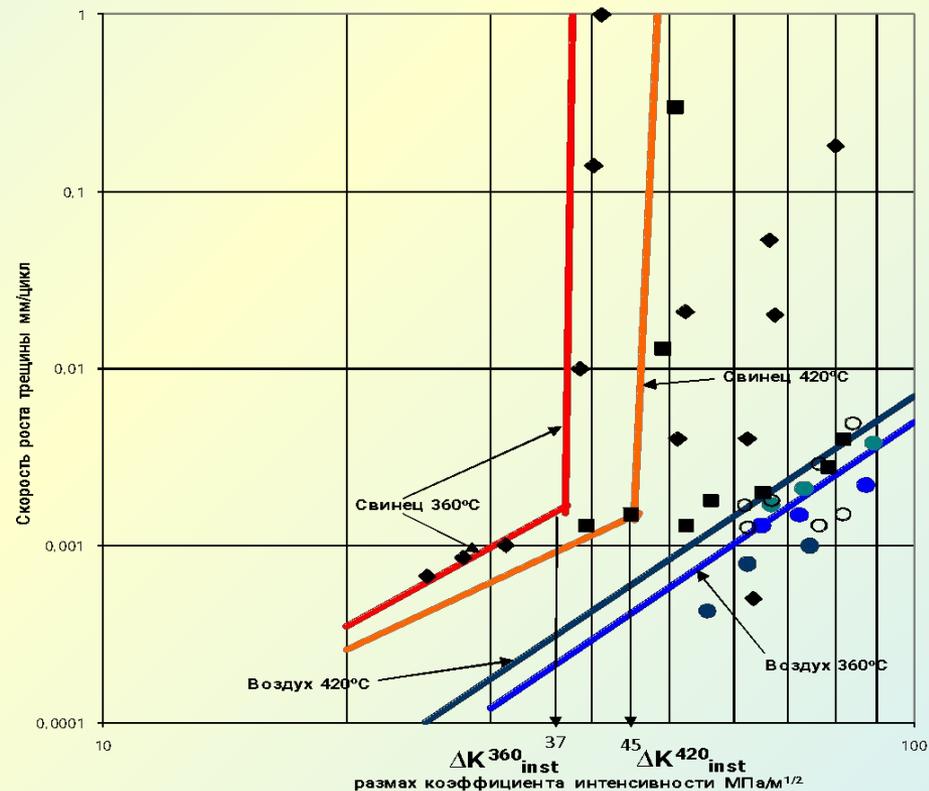
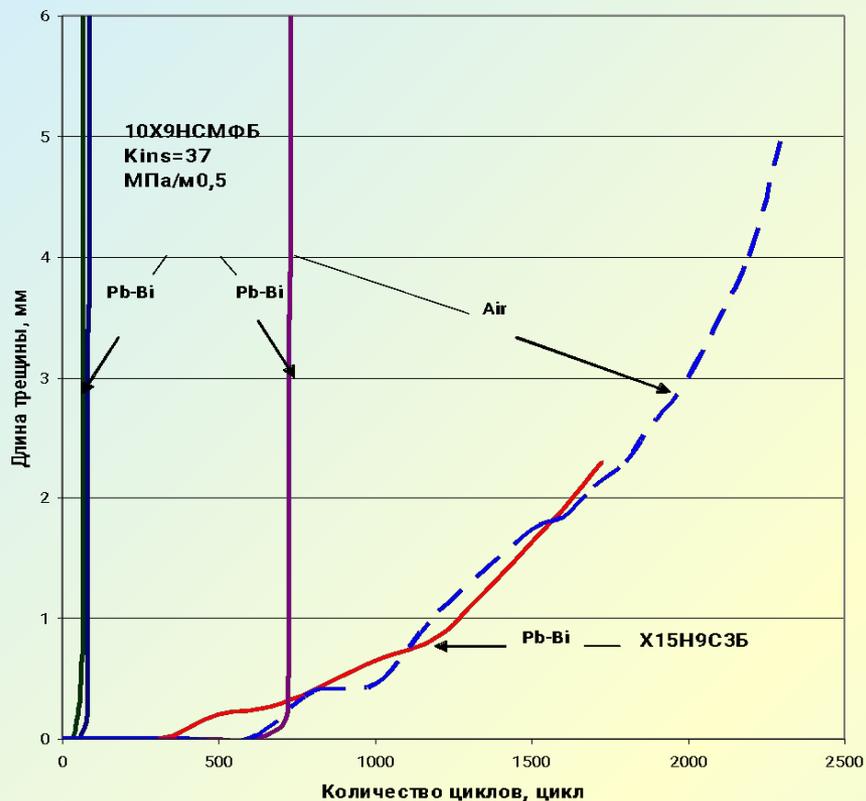
**Pb,**  
 **$T_{max} = 550^{\circ}\text{C}$**

## БРЕСТ-1200

- Разработка конструкционных материалов: аустенитной кремнистой стали 04X15H11C3MT (ВКУ)
- 9%-хромистой стали с кремнием 10X9HCMФБ аустенитной кремнистой стали X18H13C2AMBФ5P (трубы парогенератора).
- Поддержание концентрации  $\text{O}_2$  в Pb на уровне  $10^{-6} \%$

**Pb,**  
 **$T_{max} = 550^{\circ}\text{C}$**

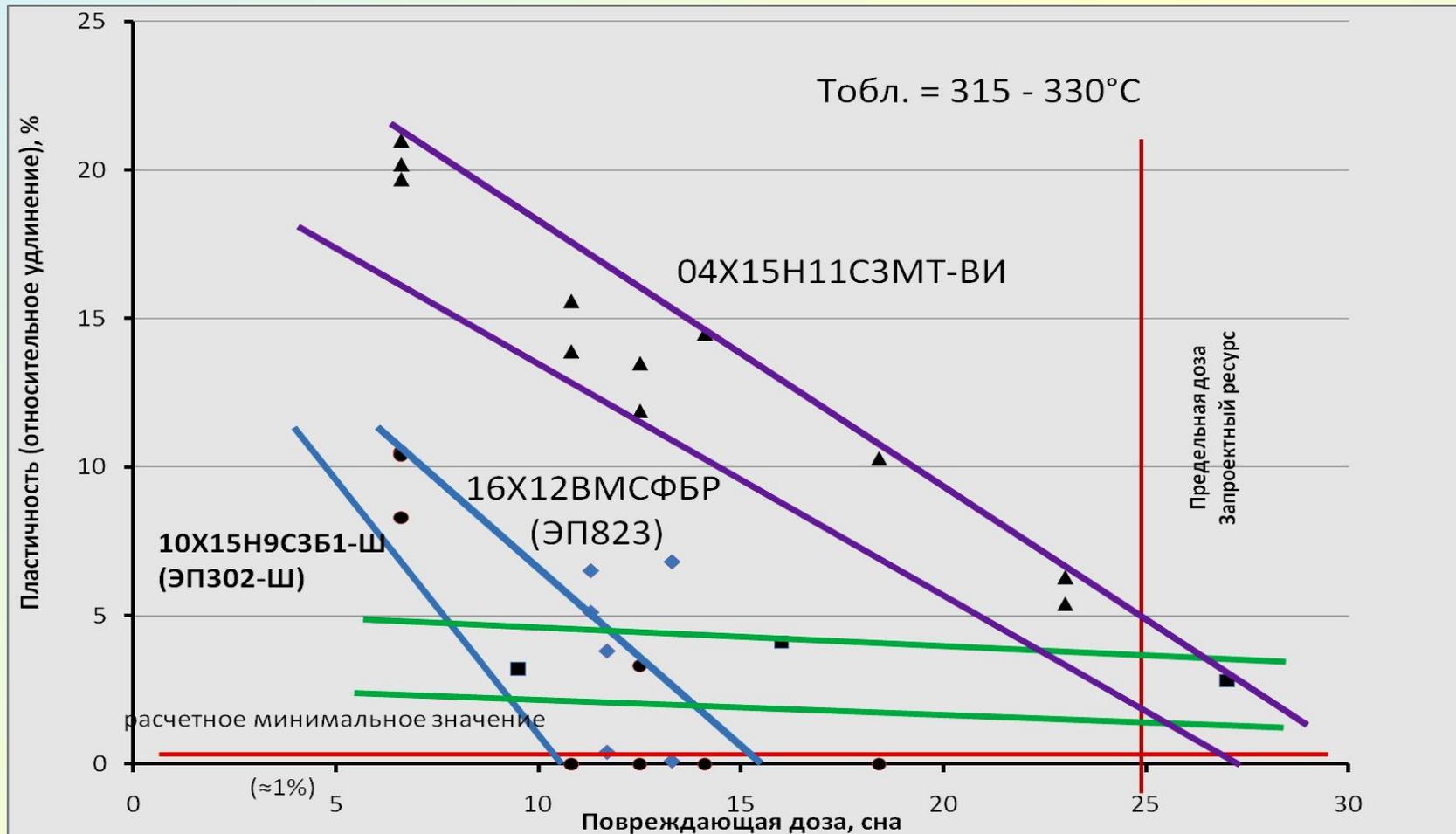
# АДСОРБЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Кинетика трещины при температуре 360°C, для хромистой стали 10X9HSMФБ и аустенитной стали 10X15H9C3Б (ЭП 302) в жидкометаллическом теплоносителе и на воздухе

Обобщенная зависимость роста усталостных трещин в стали 10X9HSMФБ(α) в свинце и на воздухе при различных температурах. (■ – свинец 420°C, ◆ - свинец 360°C, 44  
○ - воздух 420°C, ● - воздух 360°C.)

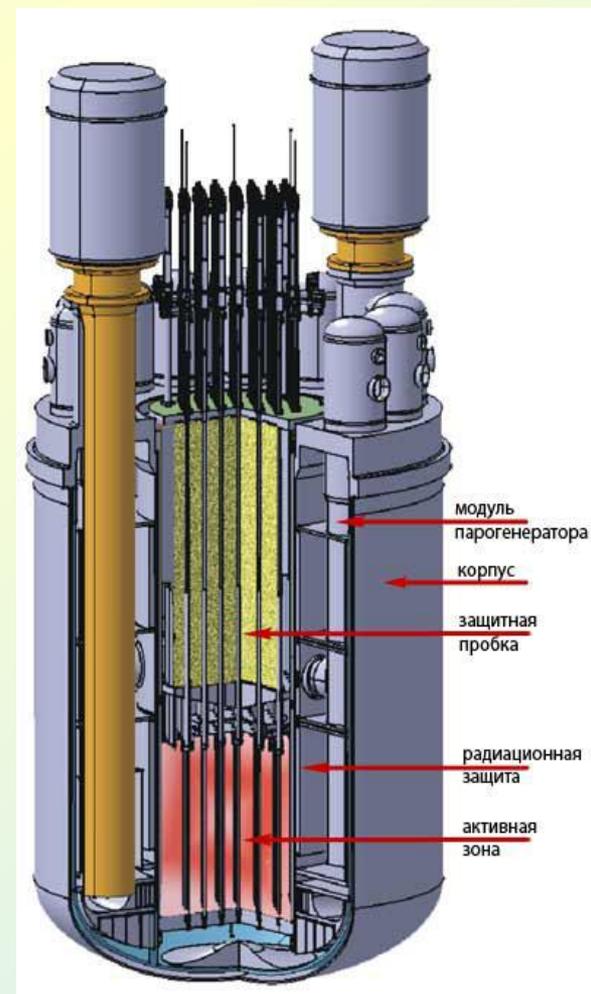
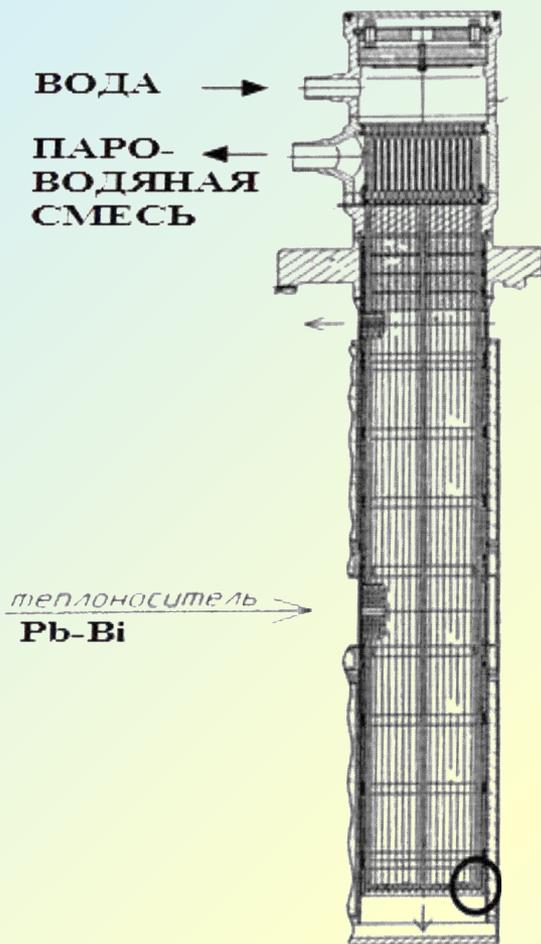
# РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВКУ РЕАКТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ



Пластичность стали в зависимости от повреждающей дозы, (сна)

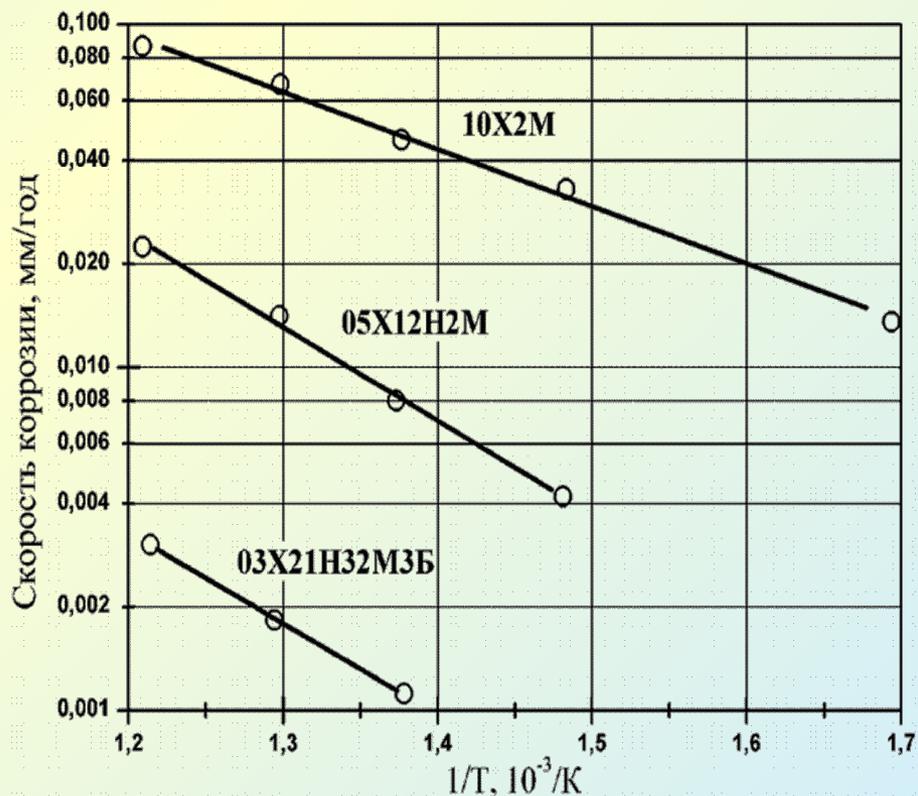
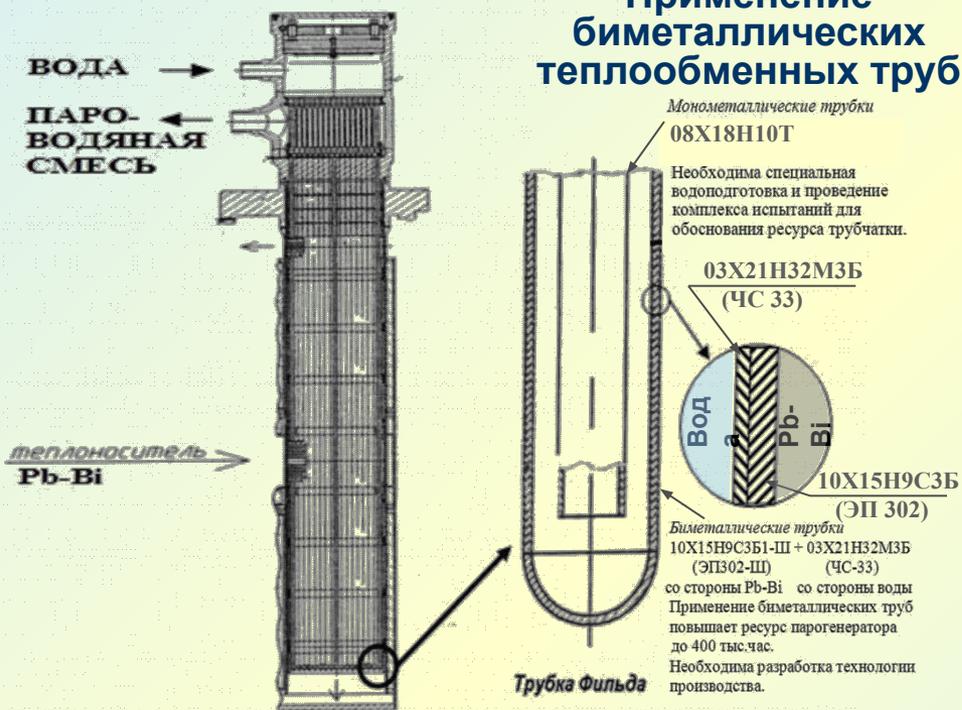
## ВАЖНЫЙ ВЫВОД:

С целью обеспечения безопасности работы установок на быстрых нейтронах с теплоносителями свинец и свинец-висмут следует **ИСКЛЮЧИТЬ** применение в составе этих установок сталей ферритного класса в контакте с жидкими металлами



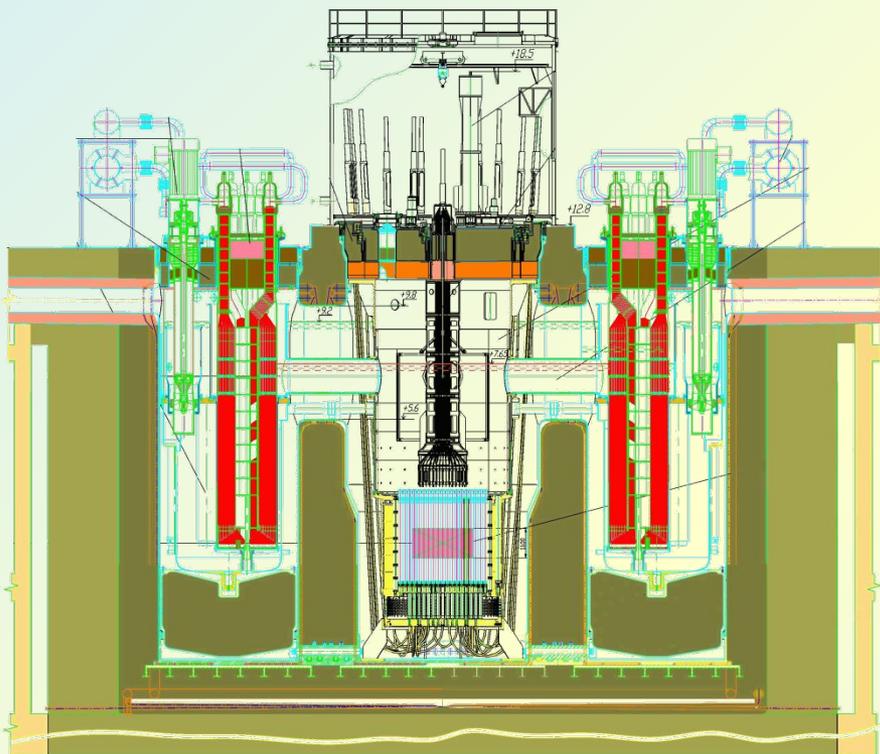
# ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЯЖЕЛЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Особенности: одновременное воздействие жидкого металла и пароводяной среды.



Общая коррозия в пароводяной среде основных конструкционных материалов теплообменных труб парогенераторов

# РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ БРЕСТ-ОД-300, БРЕСТ-1200



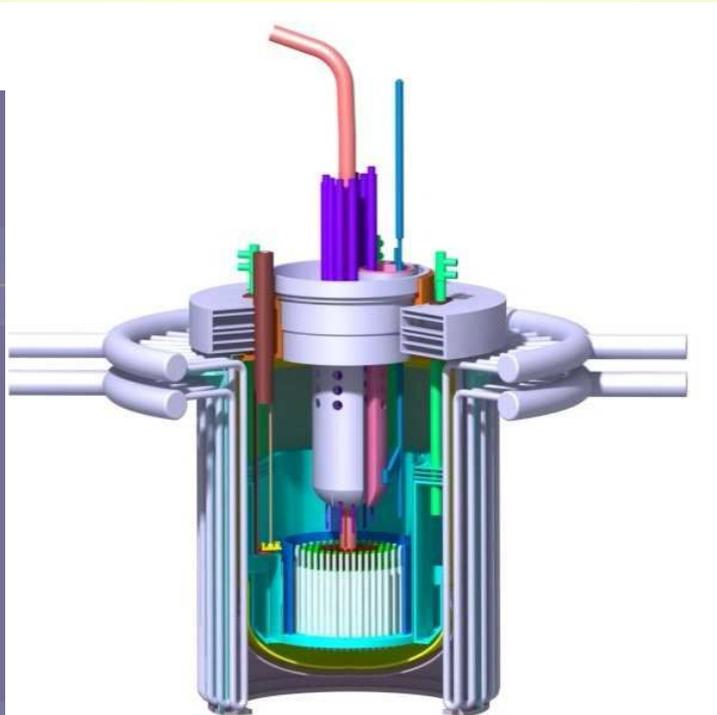
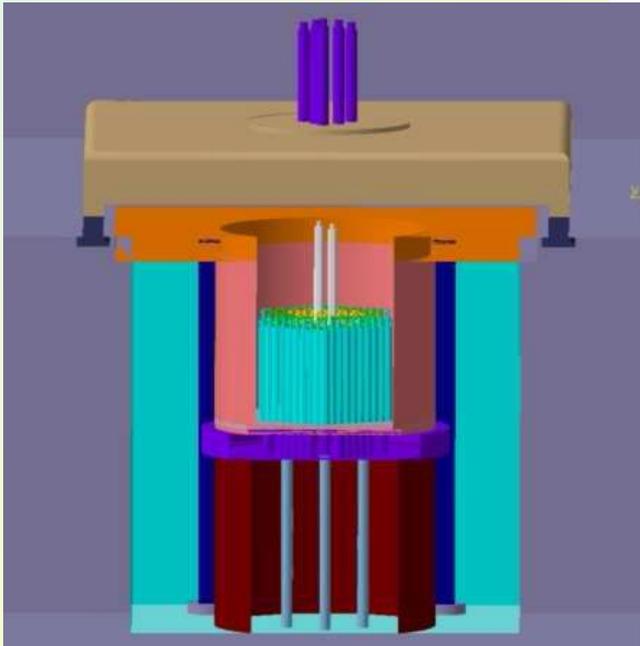
Общий вид установки БРЕСТ-ОД-300

Эксплуатационное воздействие на конструкционные материалы реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями близко.

Это определяет возможность применения одинаковых материалов для реакторных установок проектов СВБР-100, БРЕСТ-ОД-300 и БРЕСТ-1200. При этом, однако, надо учитывать более высокую температуру эксплуатации установок со свинцовым теплоносителем –  $550^{\circ}\text{C}$  вместо  $475^{\circ}\text{C}$ .

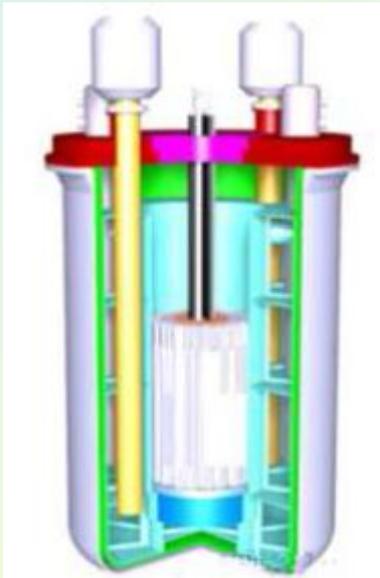
*the structural illustration of Lead Alloy-based Zero Power Reactor CLEAR-0*

Parameter	Values	
<b>Core</b>	Thermal power (MW)	10
	Activity height (m)	0.8
	Activity diameter (m)	1.05
	Fuel ( $^{235}\text{U}$ enrichment)	UO <sub>2</sub> (19.75%)
<b>Cooling system</b>	Primary coolant	LBE
	Total LBE mass (t)	~530
	Inlet/Outlet temperature (°C)	260/390
	Coolant drive type	Natural circulation
	Second coolant	Water
	Heat sink	Air cooler
<b>Material</b>	Cladding	316 Ti
	Structure	316L



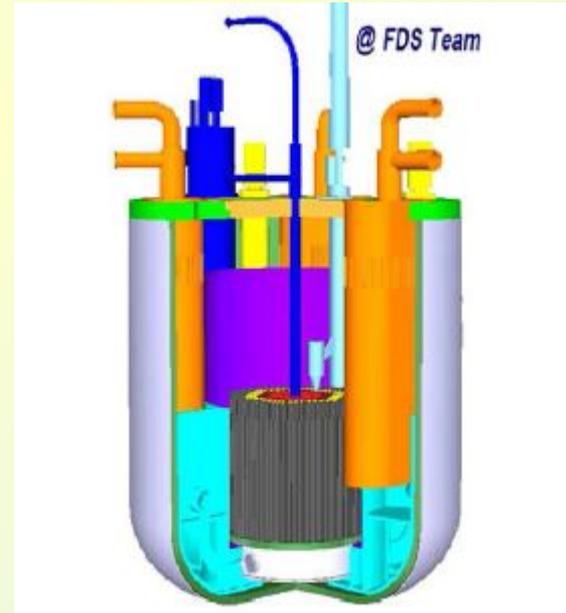
*The structural illustration of China Lead Alloy Cooled Research Reactor CLEAR-I*

A 100 MWth lead or leadbismuth cooled experimental reactor named CLEAR-II will be built coupled with a proton accelerator of ~600-1000MeV/~10mA and a Lead-bismuth spallation target.



*The illustration of China Lead Alloy Cooled Experimental Reactor CLEAR-II*

The CLEAR-III system is rated at 1000 MWth thermal power. Currently, one of the fuel types considered for CLEAR-III is the TRU-Zr dispersion fuel, where TRU-Zr particles are dispersed in Zr matrix.



*The illustration of China lead alloy cooled demonstration reactor CLEAR-III*

## *KYLIN series lead-bismuth loops*

Loop name	Type	Function	Temperature	Time
KYLIN-I[4]	TC	Compatibility test under flowing PbBi	480-550°C	2010
KYLIN-II	FC/TC	Materials test, thermal-hydraulics experiment, safety experiment	480-800 °C	2010-2013
KYLIN-III	FC	Thermal-hydraulics verification facility for CLEAR-I	200-550 °C	2012-2014
KYLIN-ST	ST	Compatibility test in the static PbBi	200-800 °C	2010
KYLIN-RT	RT	Compatibility test in the rotation flowing PbBi	480-600 °C	2010

\* TC -- Thermal Convection, FC -- Forced Convection, ST -- Static Test, RT -- Rotation Test



*the illustration of Lead-bismuth experimental loops for KYLIN-I and KYLIN-II*

The LFR development foresee a number of steps before industrial deployment. The main steps, some already on-going, can be summarised as follows:

- **Experimental facilities:** corrosion test, materials compatibility (already in operation),...
  - **GUINEVERE:** Zero power facility, nuclear data etc. started operation in Mol – Belgium 2011-11-02
  - **MYRRHA:** the LFR technology Pilot Plant and irradiation facility –100 MWth (SCK•CEN, in Mol Nuclear Research Centre (Belgium))
  - **ALFRED:** the Advanced European Lead Fast Reactor Demonstrator - 300 MWth
  - **PROLFR:** the LFR Prototype (intermediate step before industrial deployment – 800-1200 MWth
  - **ELFR:** the European Lead Fast Reactor – 1500 MWth (600 MWe) or more.
- ➔ The above strategy covers exhaustively all necessary steps for LFR developments.

## MYRRHA: main requirements

design of a multi-purpose fast-neutron irradiation facility in order to replace the ageing BR2 reactor (MTR in operation since 1962).

- a **M**ulti-purpose **h**ybrid **R**esearch **R**eactor for **H**igh-tech **A**pplications),

- a **flexible fast spectrum research reactor (50–100 MWth)** conceived as an **accelerator driven system (ADS)**, able to operate in sub-critical and critical modes (600 MeV proton accelerator, spallation target and a multiplying core with MOX fuel, **cooled by Pb-Bi**),

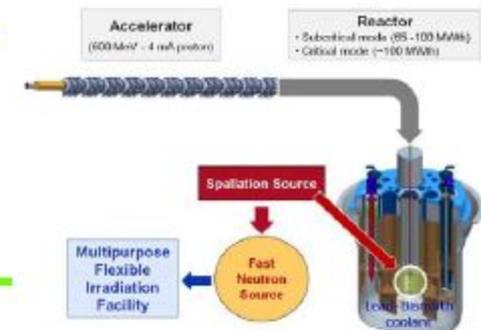
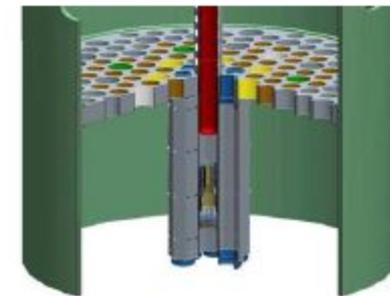
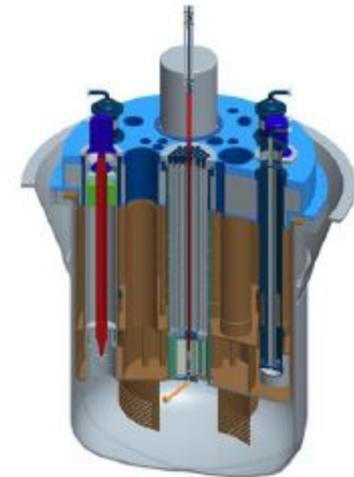
- **MYRRHA will serve to demonstrate the ADS concept** that allows a concentrated transmutation of high level waste (MA) by reducing their lifetime by a factor 1000 and their amount by a factor of 100.

- Operating at low T reduces significantly the corrosion problems and allows to work with known cladding materials without coatings.

- Relying on known technologies allows to go for full power operation around 2023.

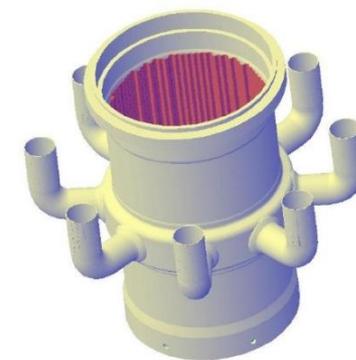
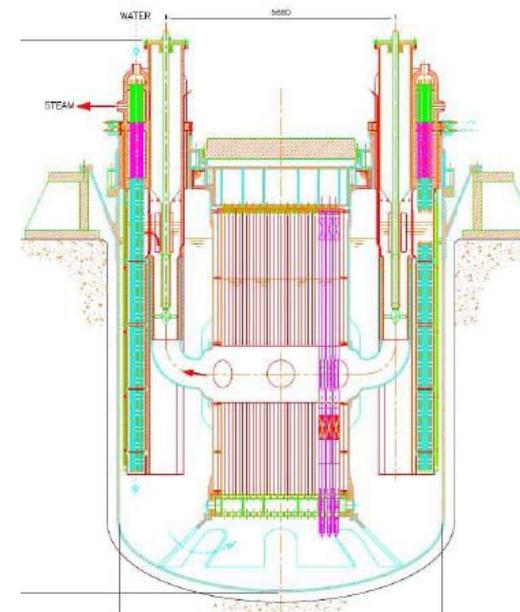
- will be used as a MTR for fuel and material irradiations as well as an irradiation facility for medical radioisotopes production, Silicon doping etc.

**MYRRHA based on a HLM** → it can be considered as an **experimental reactor** in support to LFR development: the **European Technology Pilot Plant for LFR**.



ALFRED (*Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator*) - европейский проект реактора, призванного стать демонстратором возможности использования свинцовых технологий в быстрых реакторах.

Items	ALFRED Options
Thermal Power (MW <sub>th</sub> )	300
Electrical Power (MW <sub>e</sub> )	125
Primary Coolant	Pure Lead
Primary System	Pool type, Compact
Primary Coolant Circulation: Normal operation Emergency conditions	Forced Natural
Allowed maximum Lead velocity (m/s)	2
Core Inlet Temperature (°C)	400
Steam Generator Inlet Temperature (°C)	480
Secondary Coolant Cycle	Water-Superheated Steam
Feed-water /Steam Temperature (°C)	335 / 450
Steam Pressure (MPa)	18
Secondary system efficiency (%)	40
Maximum Structural material neutron Damage (dpa)	2
Fuel type	MOX (max Pu enr. 30%)
Maximum discharged burn-up (MWd/kg-HM)	90÷100
Maximum Clad Neutron Damage (dpa)	100
Maximum Clad Temperature in Normal Operation (°C)	550



С целью ускорить разработку реактора ALFRED, в Евросоюзе был создан консорциум FALCON.

Меморандум определяет Румынию как предпочтительное место для строительства ALFRED.

Внутренний корпус реактора ALFRED 54

## ALFRED description

- **pool type reactor** equipped with 8 axial pumps in the hot plenum integrated in the 8 SGs directly immersed in the lead pool.
- **wrapped hexagonal Fuel Assembly (FA)** supported by a lower support grid anchored mechanically (no weld) to the inner vessel.
- FA maintained in position laterally by a cylindrical inner vessel and from the top by springs connected to the reactor roof plus **tungsten ballast inserted in the upper part of FAs**.
- **No refuelling machine foreseen inside the reactor vessel** since each of the FAs is extended to the cover gas space level.
- **Two independent shutdown systems** foreseen: the first one is passively inserted by pneumatic (by depressurization), the second one by buoyancy, both from the top of core. (Already developed for MYRRHA and to be used after adaptation for ALFRED).

