

Тема 4

Методы очистки натрия от примесей. Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек. Разработка встроенных в бак реактора холодных ловушек. Расчетные методы оптимизации холодных ловушек. Отмывка оборудования от натрия.

Методы очистки натрия от примесей

Наибольшее практическое применение как на экспериментальных стендах, так и на промышленных установках нашли:

- Фильтрация – удержание специальными фильтрами при прокачке теплоносителя через них взвешенной (дисперсной) фазы примеси или её соединения, присутствующих в теплоносителе, или образующихся в результате кристаллизации из пересыщенного раствора при охлаждении теплоносителя ХФЛ
- Сорбция:
 - Химическая - взаимодействие примеси или её соединения со специальными реагентами, геттерами контактирующими с теплоносителем
 - Физическая - соединения не образуются – холодные ловушки
- Дистилляция
- Отстаивание

Методы очистки натрия от примесей

Отстаивание

Рассматриваются сферические частицы. С учетом всех сил, действующих на осаждающуюся (всплывающую) частицу, имеет место соотношение для скорости их движения относительно среды

$$w = (4/3 |\rho_T - \rho| g d / (\rho \xi))^{1/2},$$

где d – диаметр частицы;

g – ускорение свободного падения;

ρ_T, ρ – плотности материала частиц и жидкости;

ξ – коэффициент сопротивления среды, зависящий от режима обтекания частицы. Режим обтекания характеризуется числом Рейнольдса $Re = wd/v$, где v – вязкость жидкости.

При ламинарном обтекании частицы жидкостью ($Re < 1$) $\xi = 24/Re$, имеет место закон Стокса. На отрезке $1 \leq Re \leq 2$ величина ξ также рассчитывается по закону Стокса.

Промежуточный режим обтекания соответствует изменению числа Рейнольдса $2 < Re < 500$, в этом случае используется эмпирическая зависимость Аллена $\xi = 18,5/Re^{0,6}$.

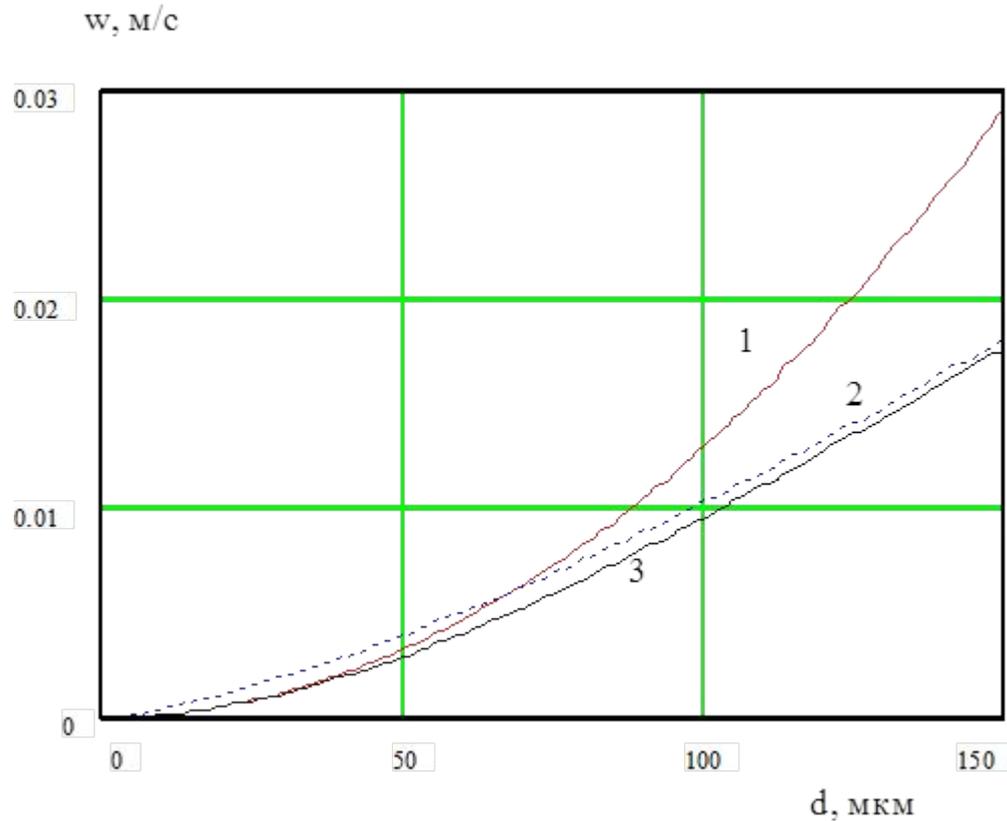
Скорость осаждения или всплытия частиц в жидкости рассчитывается также с использованием полуэмпирической зависимости Тодеса и Розенбаума

$$w = (v/d) Ar(18+0,61\sqrt{Ar})^{-1},$$

где $Ar = g |\rho_T - \rho| d^3 / (\rho v^2)$ – критерий Архимеда.

Очевидно, что при $\rho_T > \rho$ частицы тонут, а при $\rho_T < \rho$ всплывают.

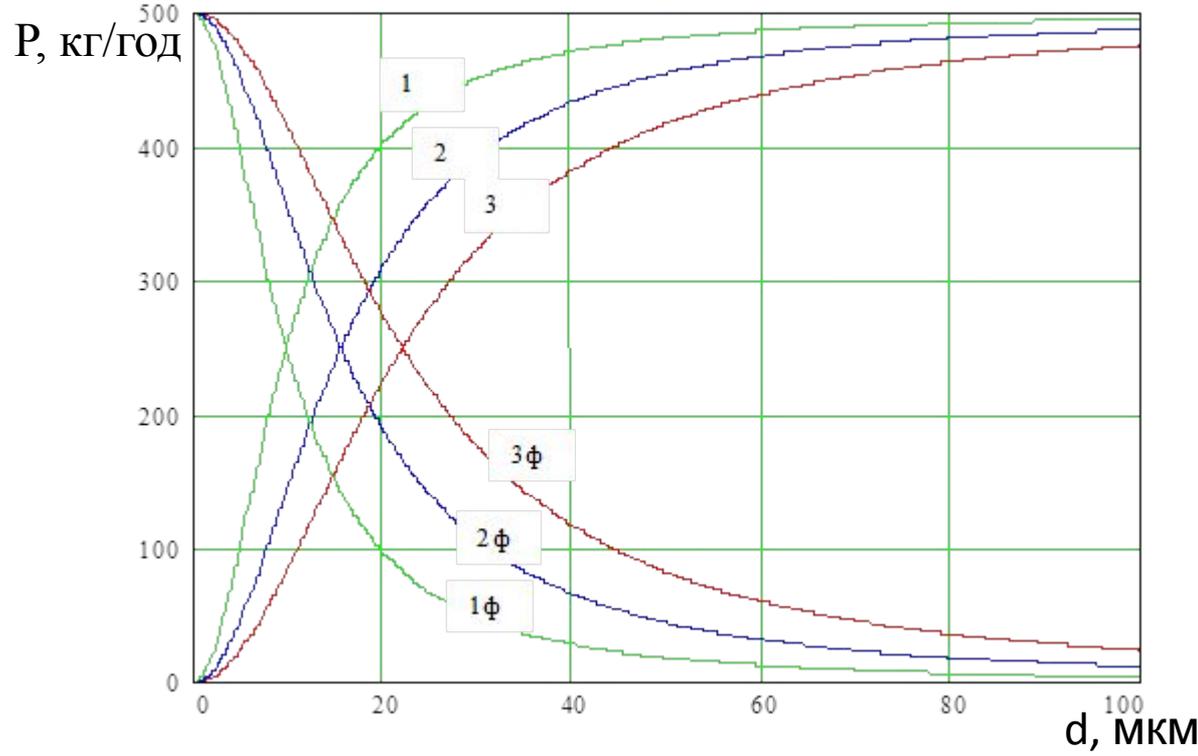
Методы очистки натрия от примесей



Скорости всплытия частиц магнетита в свинцовом теплоносителе:
1 – по Стоксу; 2 – формула Аллена; 3 – формула Тодеса

Методы очистки натрия от примесей

Фильтрация



Поток частиц,
удерживаемых
фильтром,

$$P_f = \beta C_p G_f$$

Зависимости потоков частиц в фильтр (1ф, 2ф, 3ф) и на свободную поверхность свинца в бассейне (1, 2, 3) для различных расходов свинца через фильтр:

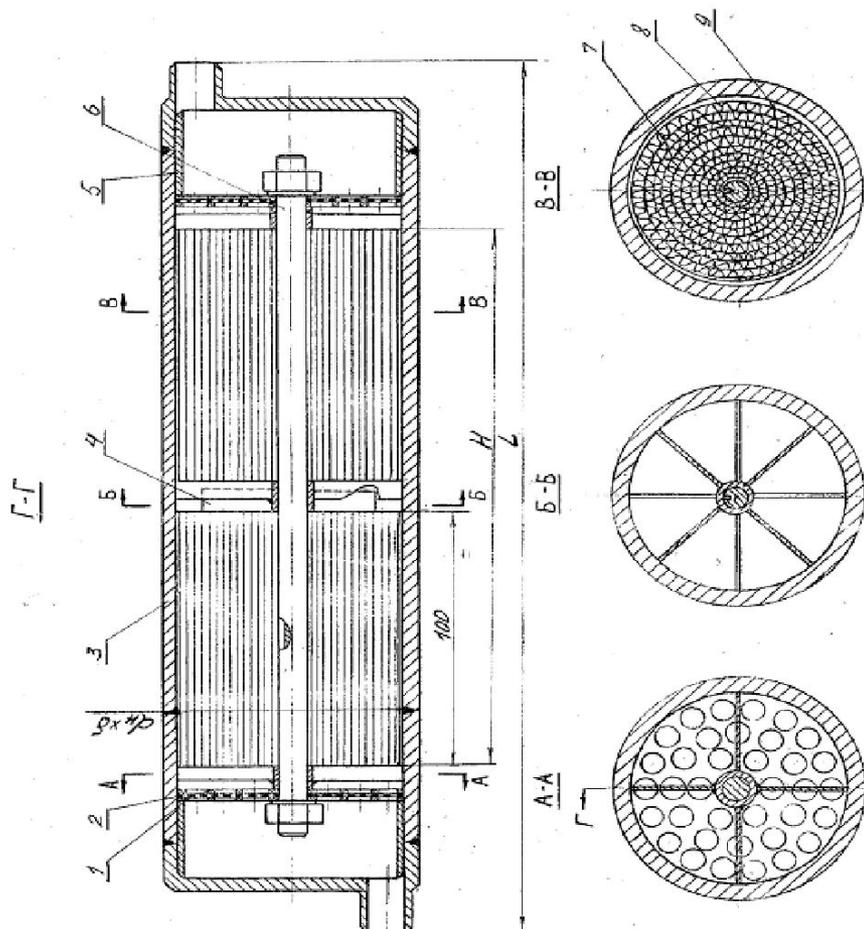
1 – 0,2 %; 2 – 0,5 %; 3 – 1 % от основного расхода

эффективность фильтра – 60 %, производительность источника взвеси 500 кг/год

Методы очистки натрия от примесей

Сорбция

Геттерная ловушка



Привес циркония на единицу поверхности в зависимости от температуры и времени

$$\Delta G/S = A \cdot \exp(-B/T) t^n = K t^n$$

A, B и n – константы

Для протравленного циркония дуговой плавки: A=200, B=10279, n=0.353

Изменение концентрации кислорода в натрии в течение времени

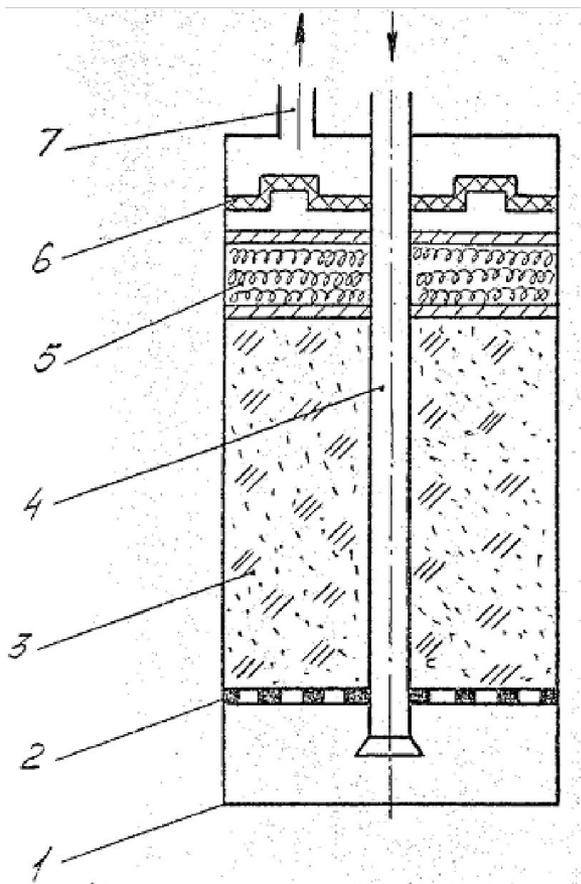
$$C(\tau) = C_0 - \frac{Q_1 \tau}{G_{Na}} + \frac{Q_2 \tau}{G_{Na}}$$

- 1 – сетка;
- 2 – решётка;
- 3 – корпус;
- 4 – крыльчатка;
- 5 – упор;
- 6 – шпилька;
- 7 – фольга;
- 8 – фольга рифлёная (цирконий);
- 9 – лист облицовочный

Методы очистки натрия от примесей

Сорбция

Схема ловушки цезия



1 – корпус;

2 – сетка;

3 – графит гранулированный в насыпке;

4 – труба входная;

5 – демпфер (предварительный фильтр);

6 – фильтр
металлокерамический;

7 – труба выходная

Методы очистки натрия от примесей

Холодная ловушка является тепло-массообменным аппаратом, в котором в результате охлаждения теплоносителя образуется пересыщенный раствор примеси. В результате происходит кристаллизация её как на неподвижных поверхностях массообмена, так и на взвесах в потоке теплоносителя.

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

Сравнительный анализ систем холодной очистки

ХЛ вне

- ~~Боксы~~
бака
- Трубопроводы
- Система обогрева линий

Встроенные

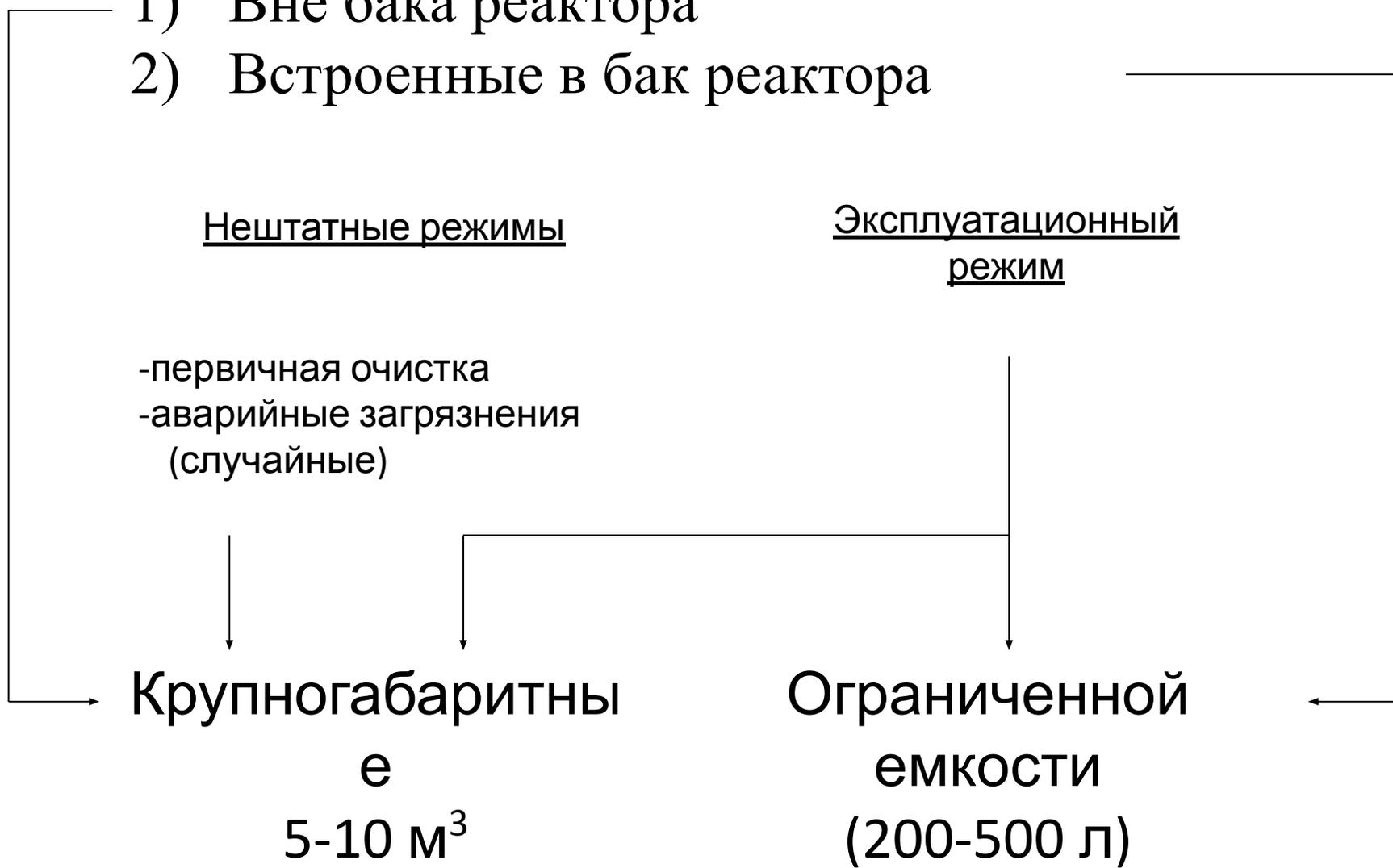
- ~~Шахта~~
ХЛ для хранения сменных элементов
- Система перезарядки
- Картриджи (выемные части)
- Дублирование системы охлаждения

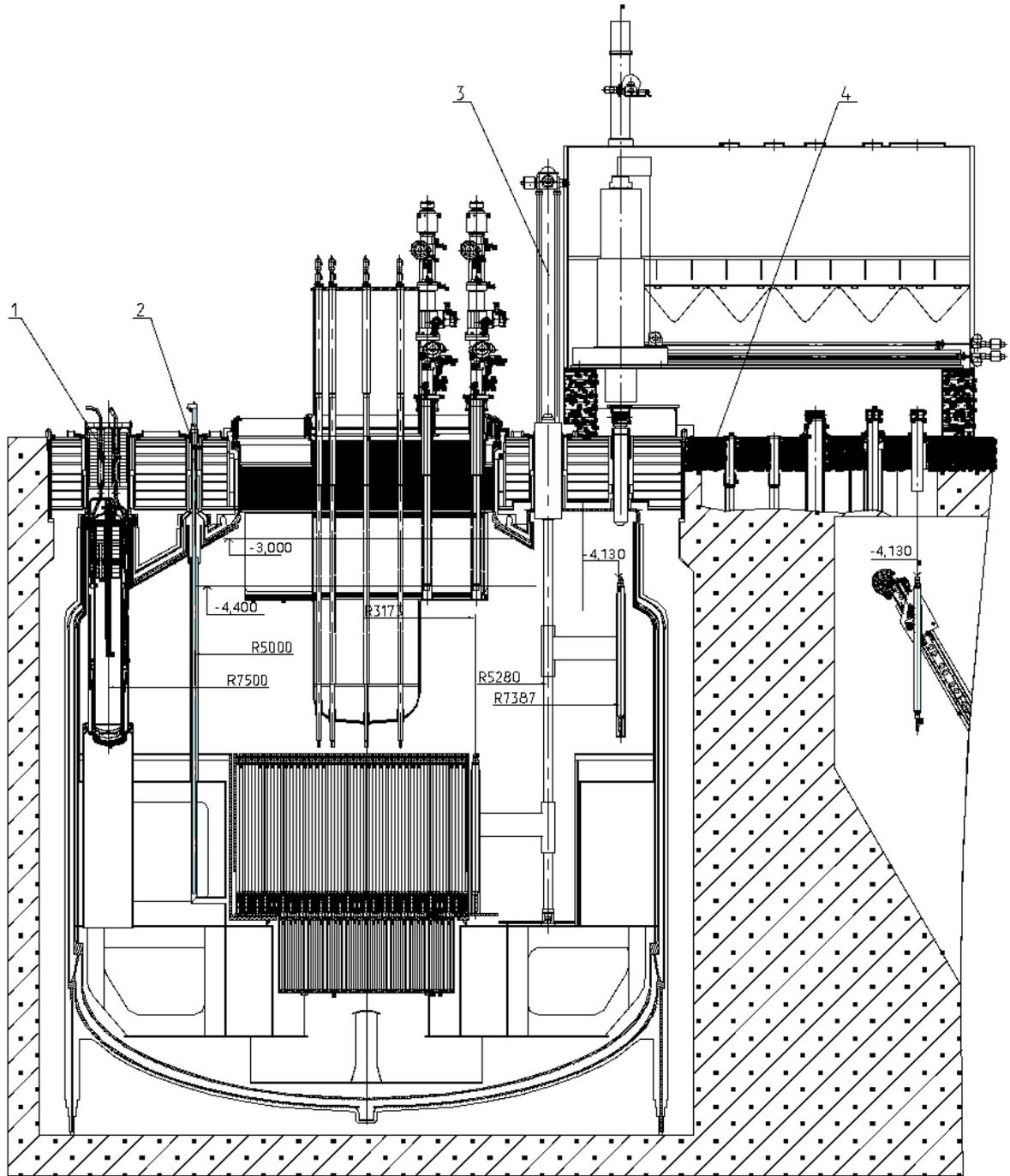
Комбинированная система (встроенные)

- 1 ХЛ крупногабаритная стационарная + 2 ХЛ ограниченной емкости с заменяемыми картриджами

Система очистки натрия первого контура (холодные ловушки)

- 1) Вне бака реактора
- 2) Встроенные в бак реактора

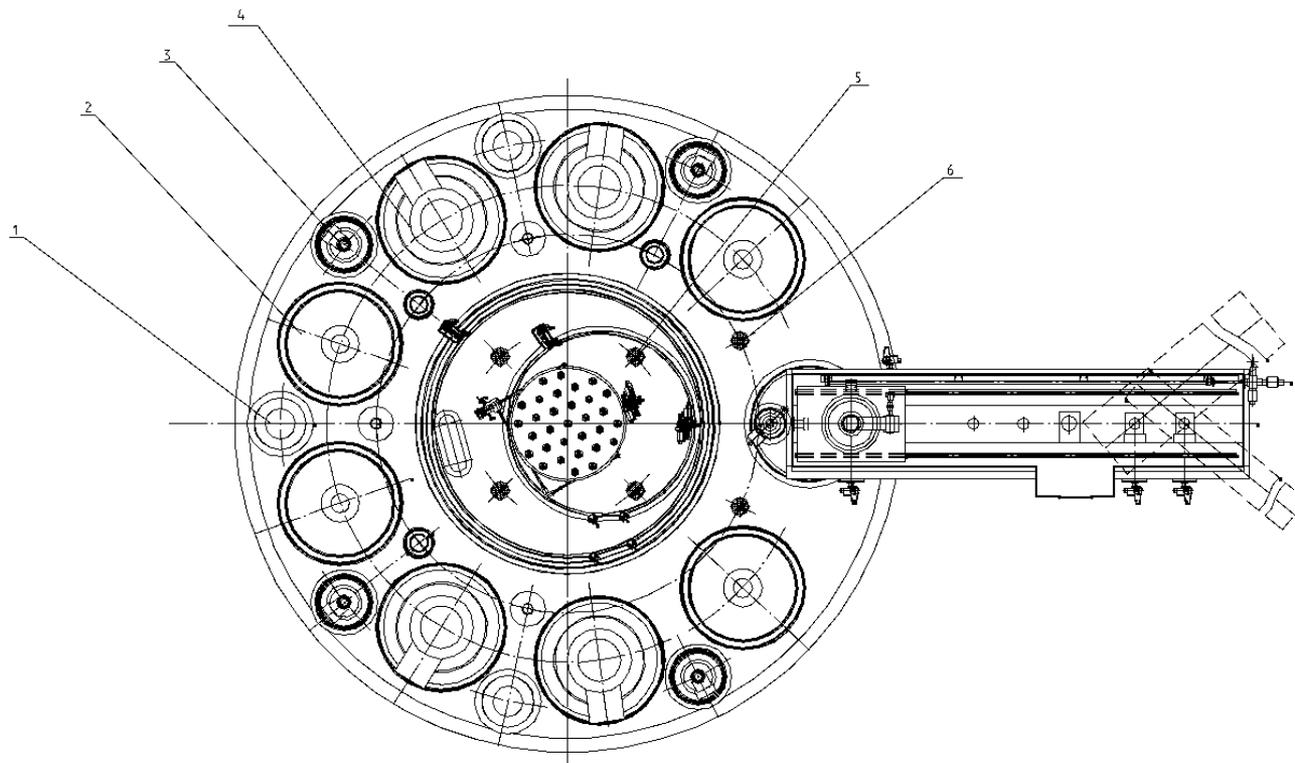




Реактор БН-1200.
Разрез по фильтр –
ловушке и
элеватору

- 1 - Фильтр - ловушка
- 2 - Уровнемер
- 3 - Механизм перегрузки
- 4 - Перегрузочная машина

Реактор БН-1200. Вид сверху



- 1 - Фильтр - ловушка
- 2 - Циркуляционный насос
- 3 - Автономный теплообменник
- 4 - Промежуточный теплообменник
- 5 - ИК контроля энергетического уровня мощности
- 6 - ИК контроля подкритического состояния

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

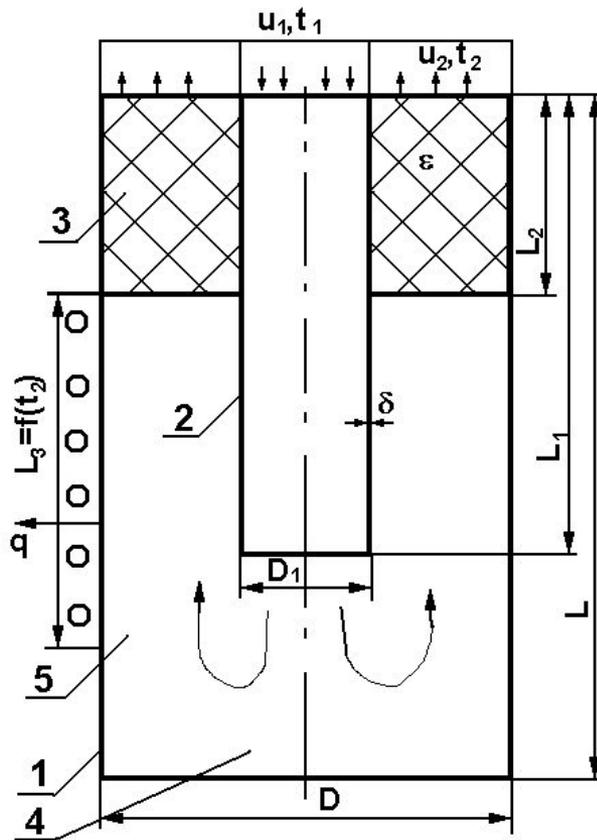
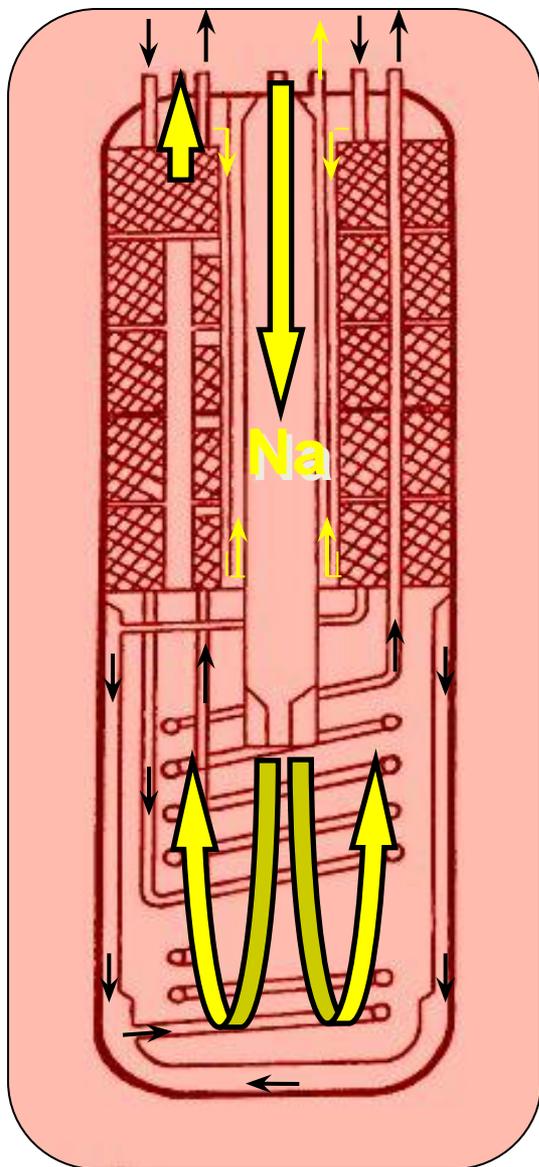


Схема
холодной
ловушки

- 1 – корпус ловушки;
- 2 – подводящий канал;
- 3 – фильтр;
- 4 – отстойник;
- 5 – зона охлаждения



Холодная ловушка примесей реактора БН-350

Параметры ловушки

Диаметр	– 1 м	Объем Na	– 3 м ³
Высота	– 5,3 м	Расход Na	– 7 м ³ /ч

На первом контуре реактора холодная ловушка проработала весь ресурс эксплуатации БН-350 (около **20 лет**).

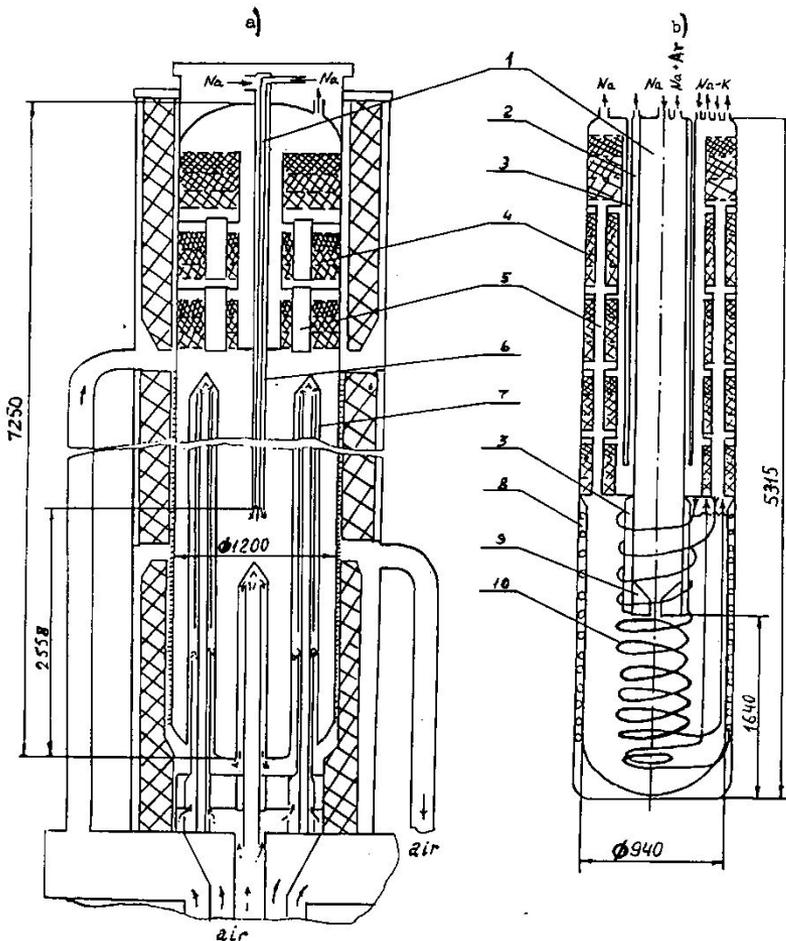
На втором контуре все ловушки работали в течение периода **10 лет**, в том числе – и при течи парогенератора (суммарное количество воды, попавшей в Na, – **200 л**). От продуктов реакции воды с натрием контур был очищен за **1500 ч**.

Ловушки прошли процесс регенерации, после чего были снова введены в работу.

Проведенный при регенерации опыт по определению накопления в них трития дал величину **200 Ки**, которая была подтверждена расчетом.

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

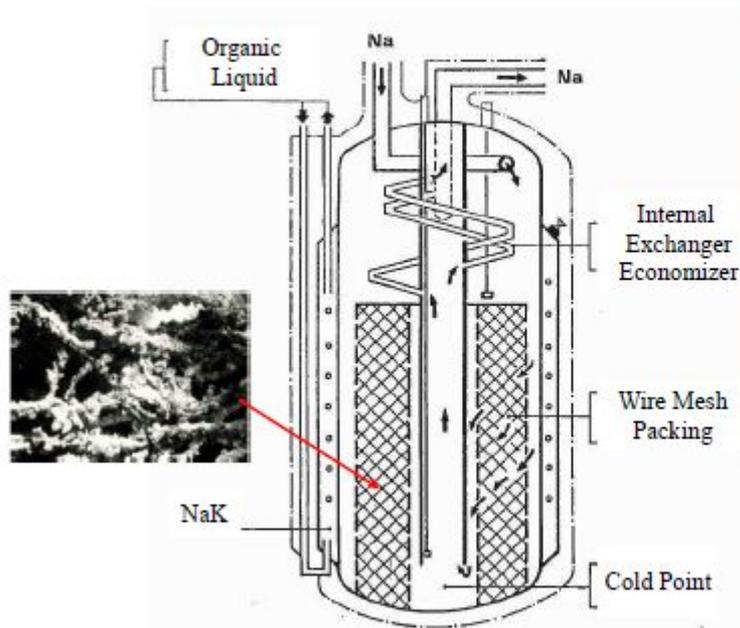
- Схемы ХЛ примесей натрия РУ БН-600 (а) и БН-350 (б)



- 1 – центральная труба;
- 2 – внешний канал рекуператора;
- 3 – воздушная теплоизоляция;
- 4 – фильтр;
- 5 – перепускные трубы;
- 6 – кольцевой канал (второй вход натрия);
- 7 – труба воздушного охлаждения;
- 8 – рубашка охлаждения;
- 9 – конус для увеличения входной скорости;
- 10 – змеевики охлаждения

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

Purification system: the cold trap



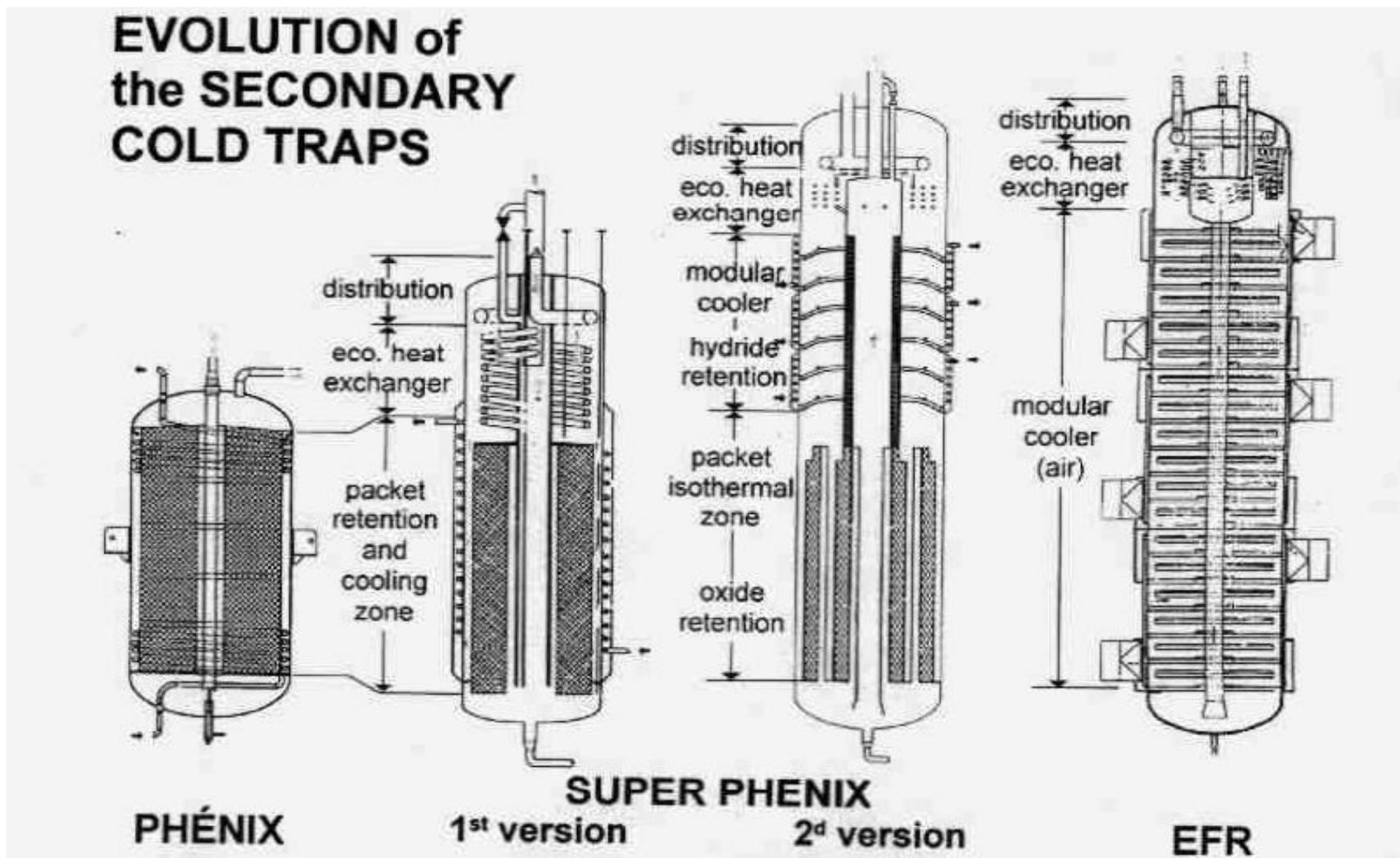
Primary Loop Cold Trap
in Phenix Reactor



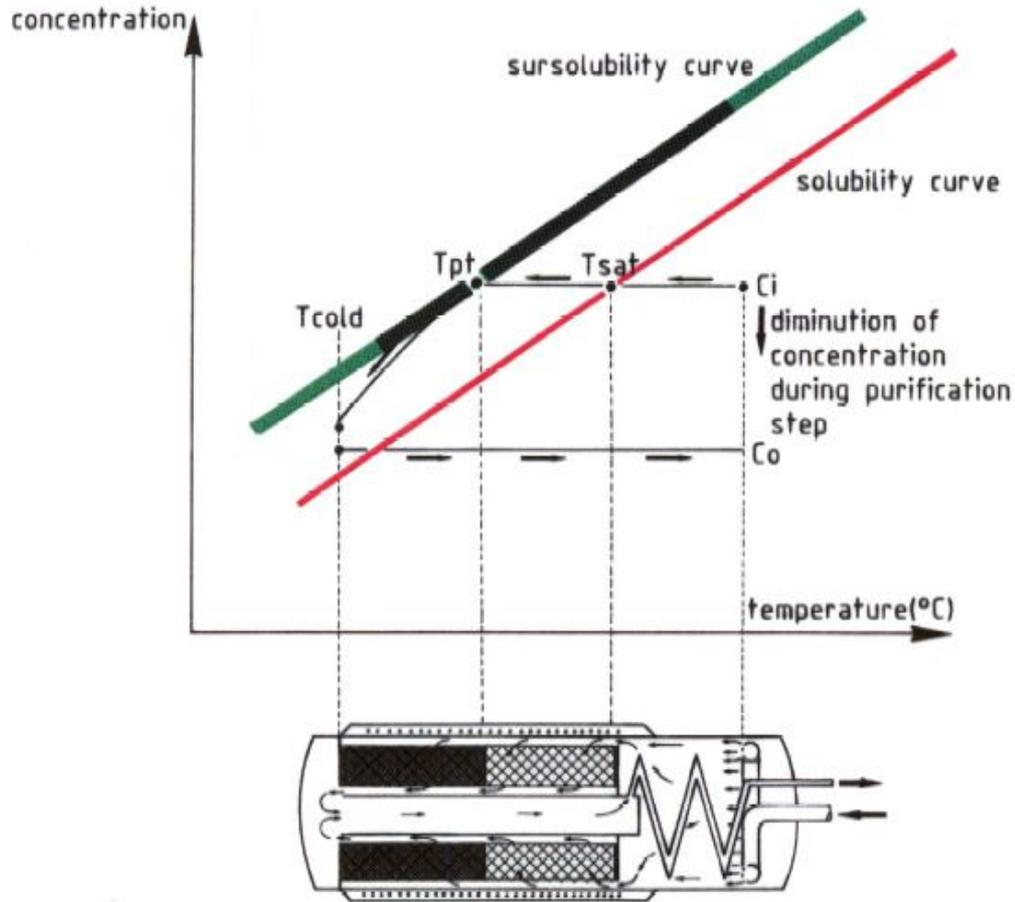
Mockup Cold Trap in Cadarache CEA
Sodium School



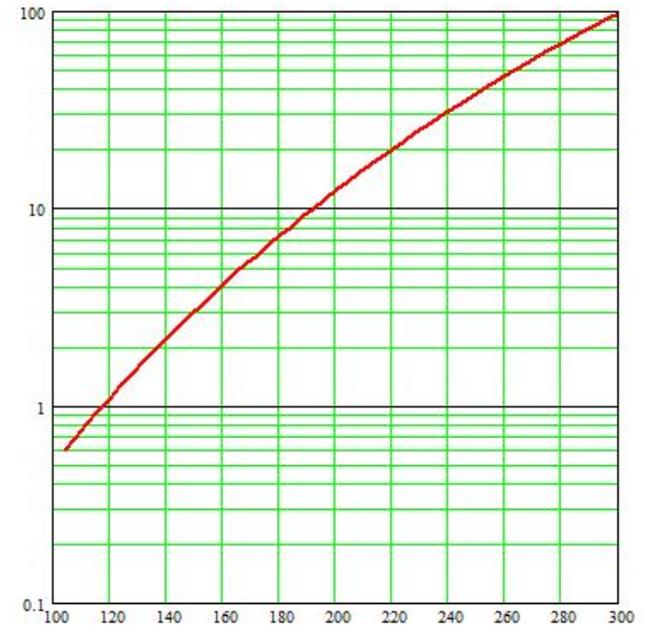
Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек



Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек



$$\lg C_s = A - B/T,$$



Поток примеси в ХЛ
 $J_0 = G \cdot \beta \cdot (C_{вх} - C_{вых})$

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

- Эффективность ХЛ определяется параметрами и характеристиками:
 - – тепловая мощность;
 - – минимальная концентрация примесей, обеспечиваемая ХЛ;
 - – коэффициент удержания примесей (β) в ХЛ;
 - – производительность;
 - – емкость по примесям;
 - – ресурс работы;
 - – конструктивные особенности;
 - – регенерируемость.
- Основные режимы ХЛ:
 - – механической очистки;
 - – номинальный;
 - – стояночный (в горячем резерве);
 - – пусковой (выход из стояночного режима).

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

Режимы работы с учетом уровня загрязнения теплоносителя примесями:

- – номинальный, т. е. соответствующий требованиям, предъявляемым к теплоносителю по соответствующим нормативным документам с учетом источников примесей, которые неизбежны при работе установки, станции;
- – повышенный (температура забивания пробкового индикатора (ТЗ ПИ) $\sim 180-200^{\circ}\text{C}$), когда работа на номинальной мощности уже не допускается;
- – высокий (ТЗ ПИ $\sim 220-230^{\circ}\text{C}$), когда необходимо менять тепловой режим работы рекуператора ХЛ и требуется очистка теплоносителя на сниженной мощности;
- – аварийный (ТЗ ПИ \approx). Требуются специальные приемы и схемы для очистки натрия.

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

Изменение концентрации примесей в теплоносителе во время очистки его ХЛ, работающей с расходом Q_L , при коэффициенте удержания примесей β с исходной концентрацией примесей C_0 до концентрации $C(\tau)$ при наличии источника примесей интенсивностью Q_i , описывается уравнением:

$$C(\tau) = C' + \frac{Q_i}{Q_L \beta} + \left(C_0 - C' - \frac{Q_i}{Q_L \beta} \right) e^{-\frac{Q_L \beta}{M} \tau}$$

где M – масса очищаемого натрия в контуре;

Q_i – интенсивность источника примесей, [кг/с];

C' – растворимость примеси в натрии при температуре выхода из ловушки;

C_0 – концентрация на входе в холодную ловушку;

Q_L – расход натрия через ХЛ;

β – коэффициент удержания примесей в ХЛ;

τ – время очистки.

$$dC/d\tau = -\beta Q_L (C - C')/M + Q_i/M$$

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

Время очистки массы натрия (m) от загрязнений при идеальном перемешивании теплоносителя определяется формулой:

$$\tau = (m/\beta G) \ln[(C_0 - C_{\text{л}})/(C_{\text{к}} - C_{\text{л}})],$$

где G – расход натрия через ловушку,

β – коэффициент удержания примесей в ловушке,

C_0 , $C_{\text{к}}$ – соответственно, начальная и конечная концентрация кислорода в натрии,

$C_{\text{л}}$ – концентрация насыщения натрия кислородом при выходной температуре ловушки.

Время очистки от температуры насыщения t_1 до t_2 определяется разностью $\tau(t_2) - \tau(t_1)$. При использовании нескольких ловушек время очистки уменьшается обратно пропорционально их числу.

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

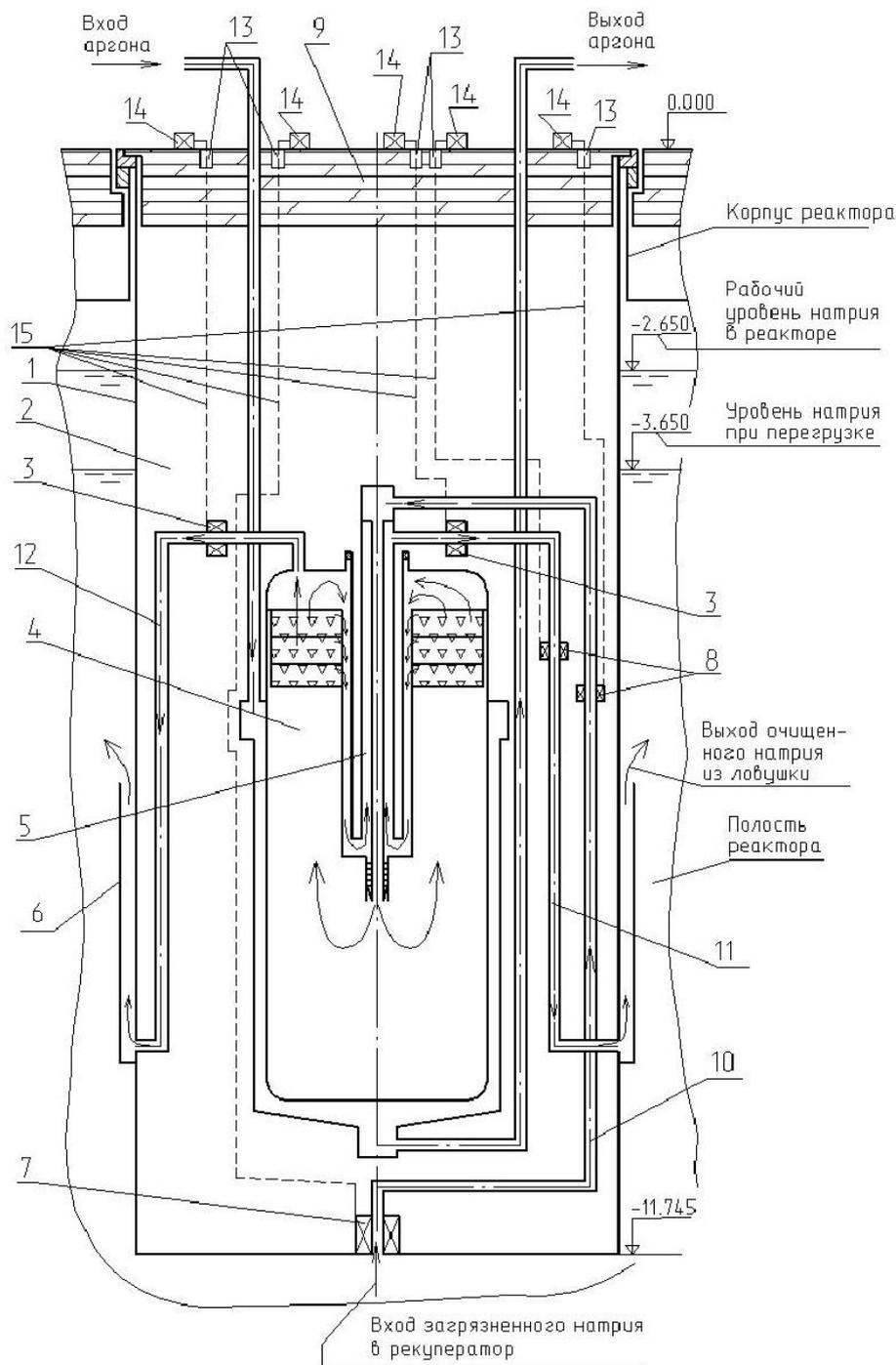
Основные характеристики холодных ловушек, применяемых на реакторах БН

Реактор	Тип ловушки	Производительность, м ³ /час	Габариты, м Ø, Н	Охлаждение	Емкость по примесям, кг
БОР-60 (1, 2 к)	вынесенная	2,0	0,8×2,3	вода	500
БН-350 (1, 2 к)	вынесенная	10,0	1,0×5,3	NaK	1200
БН-600 (1, 2 к)	вынесенная	8,0	1,2×7,2	воздух	1800
Феникс (1, 2 к)	вынесенная	10,0	1,1×2,8	органика – сплав NaK	120
Супер-Феникс (1 к)	встроенная	10,0	1,2×10	азот	70
ЕВР-II	вынесенная	6,0	0,9×5,2	сплав NaK	150
Экспериментальная ловушка СТ-1009	вынесенная	2,5	0,7×3,5	воздух	160

Разработка встроенных в бак реактора ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

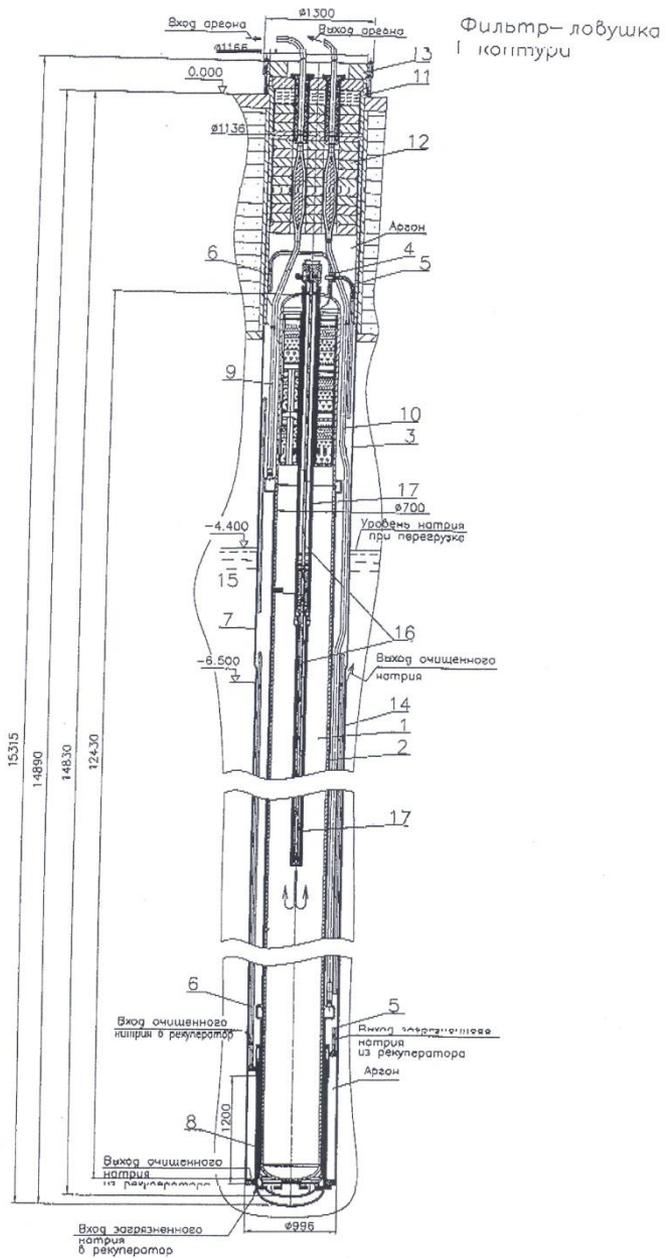
Этапы разработки

1. Анализ научных подходов к решению проблемы.
2. Создание 3-х мерной математической модели массопереноса примесей в ХЛ.
3. Экспериментальное определение констант, характеризующих массоперенос в ХЛ.
4. Проведение расчетов для конкретных моделей ХЛ.
5. Верификация расчетных данных на экспериментальных моделях.
6. Корректировка математической модели и расчетной программы.
7. Проведение оптимизационных расчетов. Определение параметров рабочей ХЛ.
8. Испытания полномасштабного макета встроенной ХЛ.



Конструктивная схема встроенной холодной фильтр-ловушки

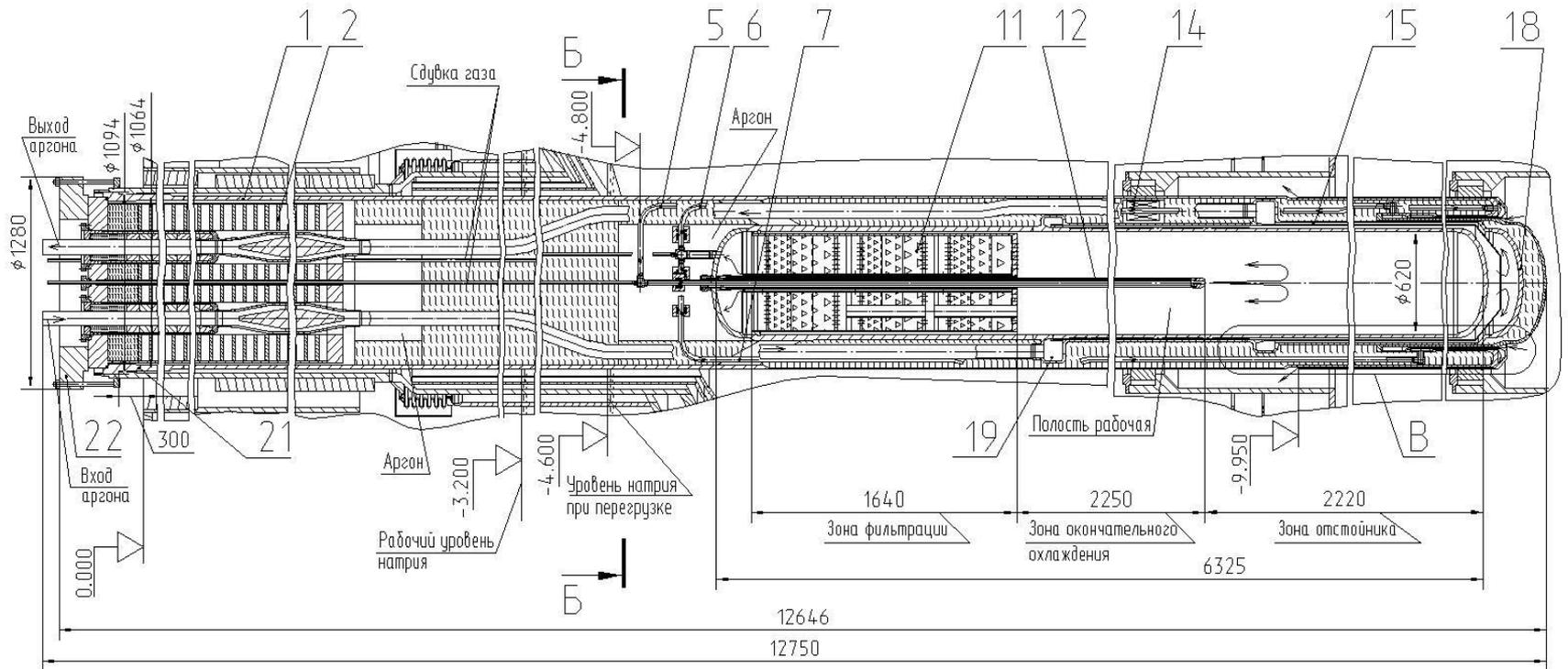
1 – корпус ХФЛ встроенной; 2 – полость, заполненная аргоном; 3 – дроссель электромагнитный; 4 – рабочая полость ХФЛ встроенной; 5 – рекуператор; 6 – подогреватель; 7 – насос электромагнитный; 8 – расходомер электромагнитный; 9 – защита биологическая; 10 – трубопровод подвода загрязненного натрия в рекуператор; 11 – трубопровод отвода очищенного натрия из рекуператора; 12 – трубопровод байпаса очищенного натрия из рабочей полости; 13 – гермовводы; 14 – клеммные коробки или штепсельные разъемы; 15 – электрические коммуникации.



- расход натрия – 4.42 м3/час;
- расход аргона – 258 м3/час;
- температура натрия на входе – 175 °С;
- температура аргона на входе – 35 °С;
- давление аргона – 1.5 МПа

A-A

Трубы поз. 5, 6, 7 совмещены с плоскостью разреза

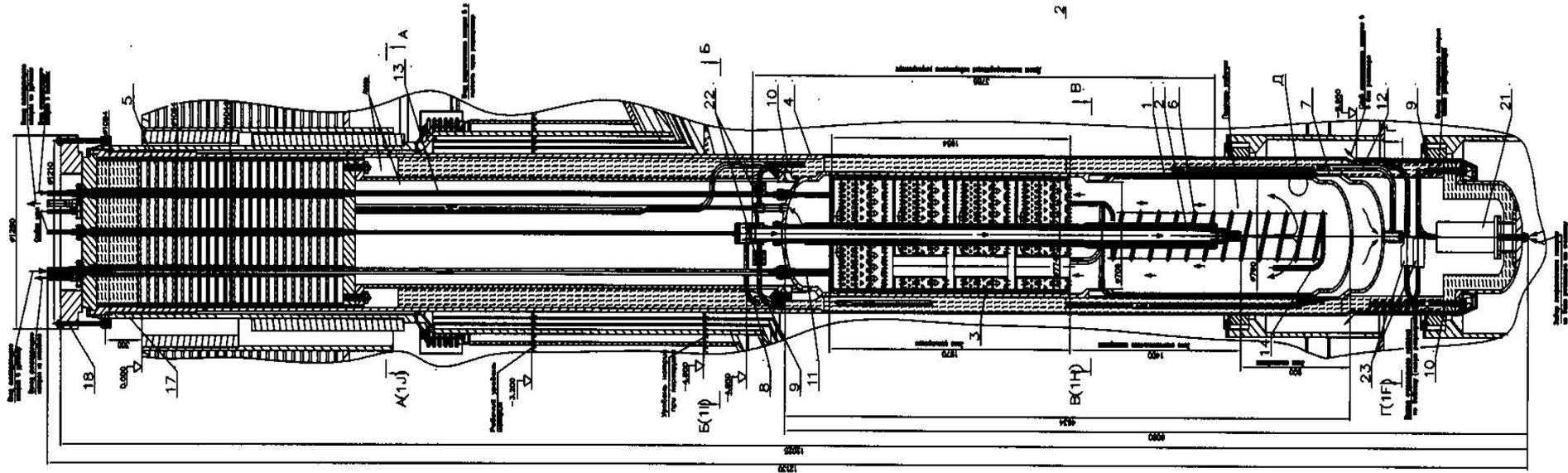


Встроенная ХФЛ

Корпус наружный поз. 1; плита верхняя блока защиты поз. 2; рабочая полость поз. 3; рекуператор поз. 4; трубы подвода поз. 5 и отвода натрия поз. 6; труба байпаса рекуператора поз. 7 с размещенными на них регулируемыми электромагнитными дросселями поз. 8, расходомерами поз. 9 и средствами измерений; днище поз. 10; фильтр поз. 11; труба центральная поз. 12; подогреватель поз. 13; насос электромагнитный поз. 14; канал газового охлаждения поз. 15; труба газовая входная поз. 16; труба газовая выходная поз. 17; днище эллиптическое поз. 18, коллектор газовый раздающий поз. 19 и сборный поз. 20.

Разработка встроенных в бак реактора ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

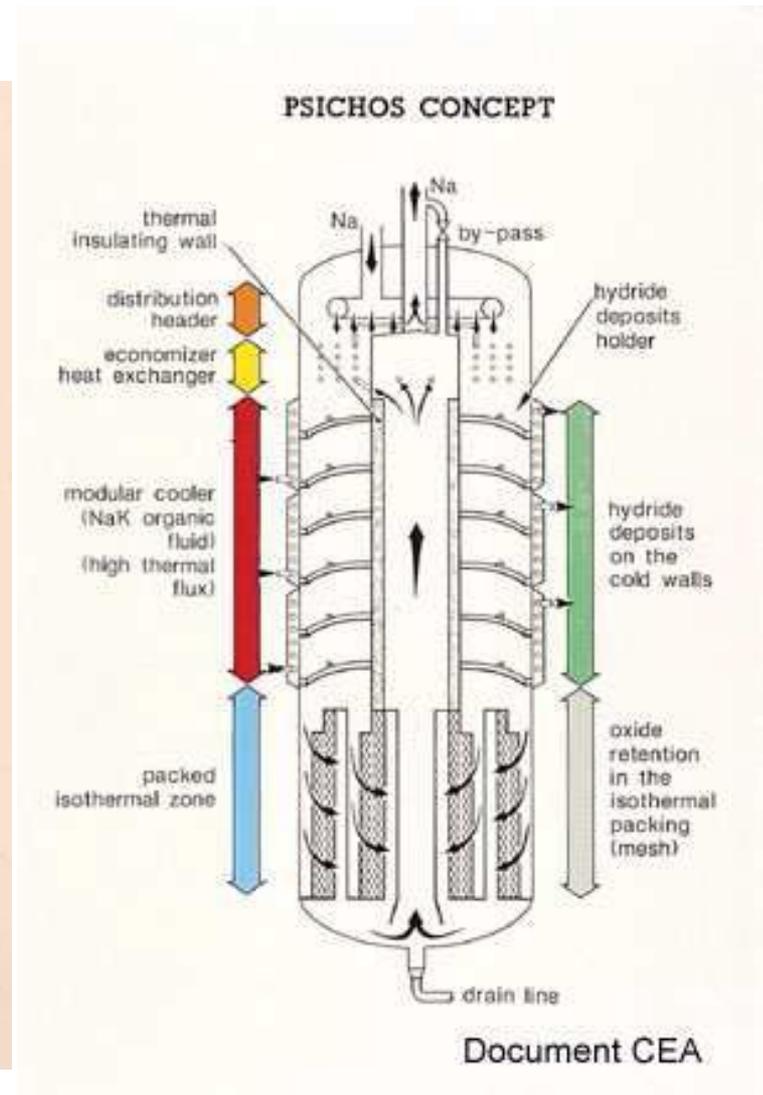
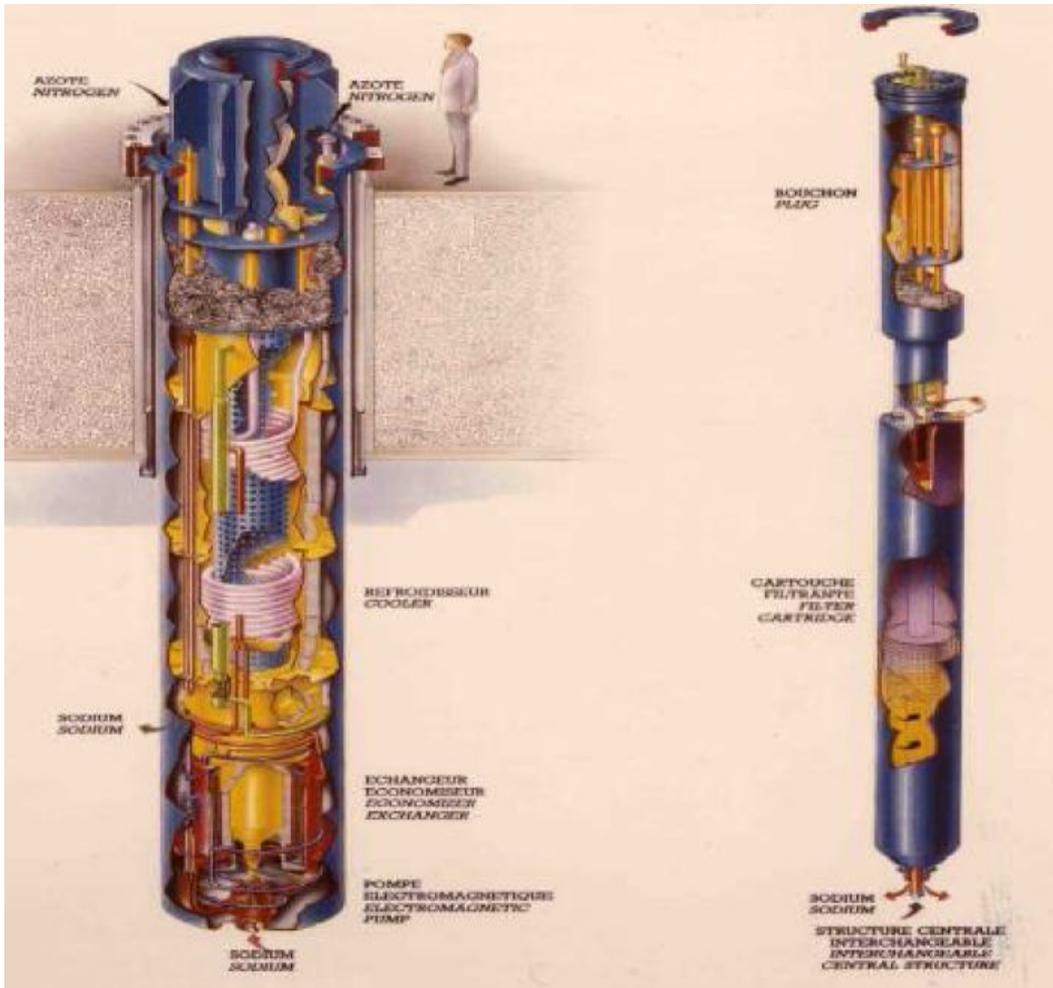
Холодная ловушка с натриевым охлаждением



Параметры сравниваемых встроенных холодных ловушек, разработанных в ОКБМ

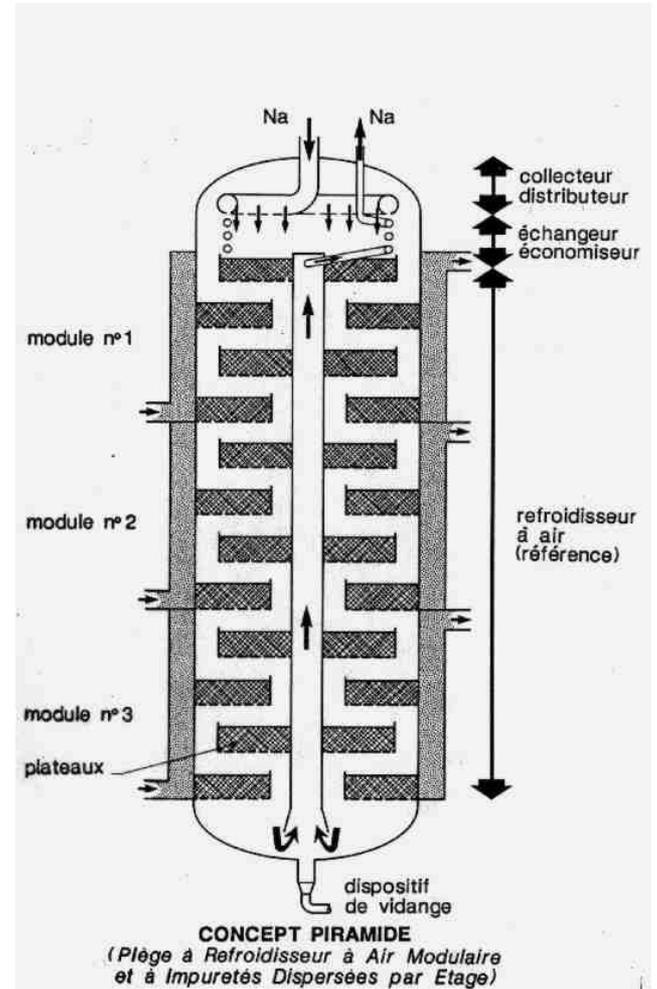
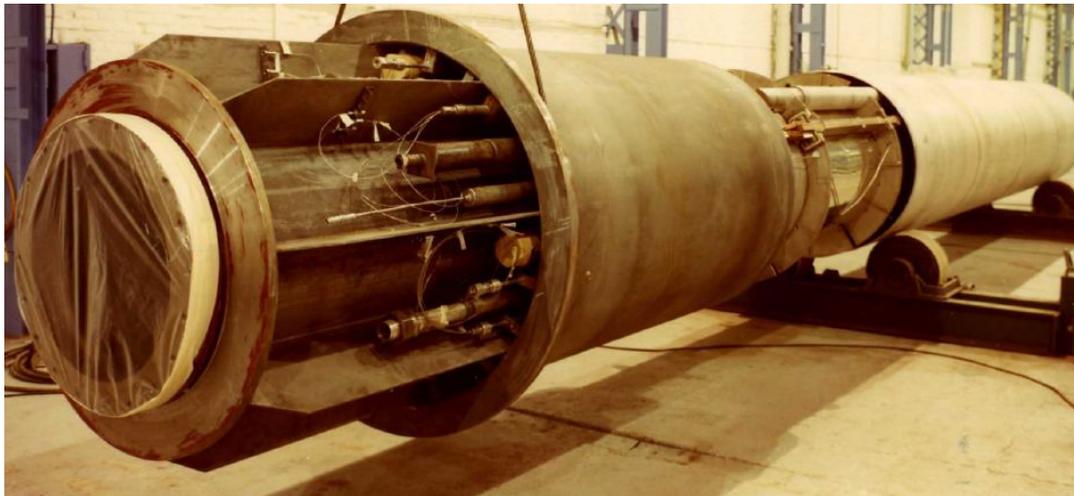
Наименование	Варианты ХФЛ	
	С газовым охлаждением (версия РНАТ.505327.0 12ПЗ)	С натриевым охлаждением
1. Мощность тепловая охлаждения ХФЛ встроенной (отводимая с поверхности рабочей полости), кВт	56,7	154,25
2. Мощность тепловая рекуператора ХФЛ встроенной, кВт	184,8	197,8
3. Мощность тепловая подогревателя ХФЛ встроенной, кВт	56	
4. Расход натрия, кг/с ($\text{м}^3/\text{ч}$ при температуре $210\text{ }^\circ\text{C}$)	0,7 (2,8)	0,968 (4,1)
5. Расход аргона (натрия), кг/с	2,3	5,63
6. Температура загрязненного натрия на входе в рекуператор,	410	410
7. Температура загрязненного натрия на выходе из рекуператора (на входе в рабочую полость),	210	250
8. Температура очищенного натрия на выходе из рабочей полости ХФЛ встроенной (на входе в рекуператор),	150	130
9. Температура очищенного натрия на выходе из рекуператора (на входе в подогреватель),	347	285
10. Температура очищенного натрия на выходе из ХФЛ встроенной (на выходе из подогревателя),	410	
11. Температура аргона (натрия) на входе в ХФЛ встроенную, $^\circ\text{C}$	35	120
12. Температура аргона (натрия) на выходе из ХФЛ встроенной, $^\circ\text{C}$	102	140
13. Давление натрия в полости рабочей (избыточное), МПа	0,194	0,45
14. Давление аргона (натрия) в системе охлаждения (абсолютное), МПа	1,5	0,5
15. Объем рабочей полости ХФЛ встроенной, м^3	1,75	1,86
16. Расчетная вместимость по примесям, кг	350	515
17. Габариты ХФЛ встроенной ($D \times L$), мм	1280×12750	1280×12130
18. Внутренний диаметр ХФЛ, мм	620	760
19. Длина зон:		
отстойника	2210	900
окончательного охлаждения	2250	1400
фильтра	1640	1970
20. Масса ХФЛ встроенной, не более, т	19	19

Primary integrated purification system



Разработка встроенных в бак реактора ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

EFR cold trap



Расчетные методы оптимизации холодных ловушек

- **Надежных методов расчета массопереноса и осаждения примесей внутри ловушек в связи со сложностью протекающих процессов до настоящего времени не создано.**
- **Эти обстоятельства не позволяют спроектировать оптимальную холодную ловушку заданной производительности без предварительных экспериментальных исследований на моделях, соизмеримых по размерам с создаваемым образцом.**
- **Решение указанной проблемы может быть получено с использованием многомерного математического моделирования процессов внутри ловушки.**

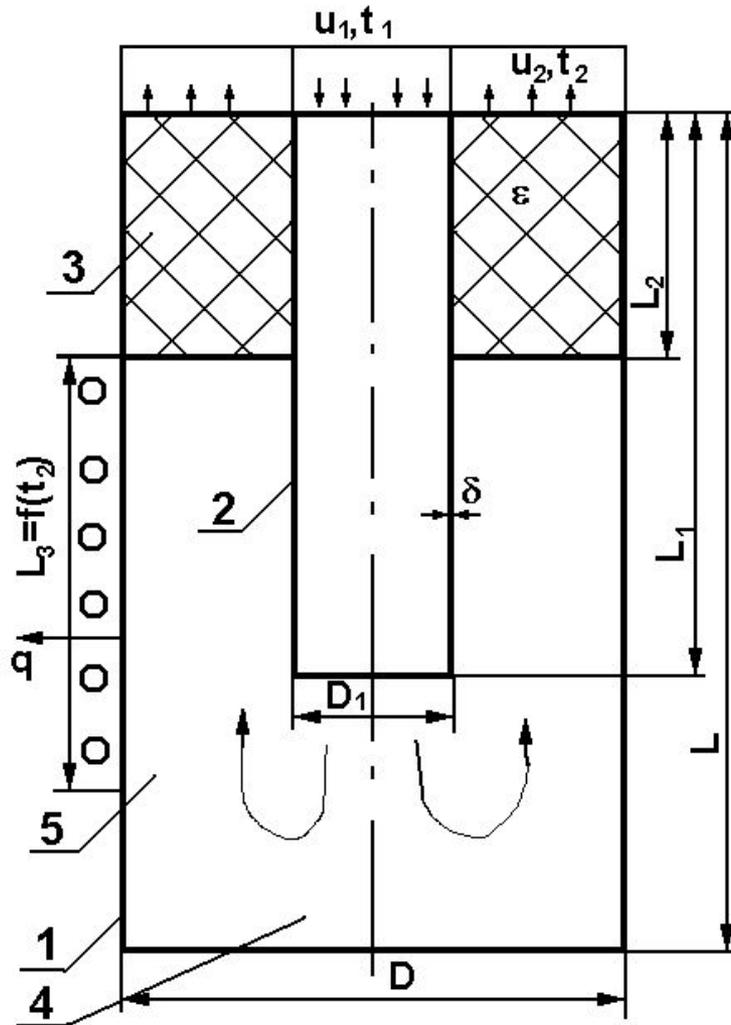
Расчетные методы оптимизации холодных ловушек

Варьируемые параметры

1. Соотношение диаметра и длины внутренней полости ХЛ
2. Соотношение длин зон фильтра, отстойника и окончательного охлаждения
3. Величина заглибления выпускной трубы
4. Скорость выхода натрия в ловушку
5. Распределение зон охлаждения по высоте ловушки
6. Внутренние образования и змеевики

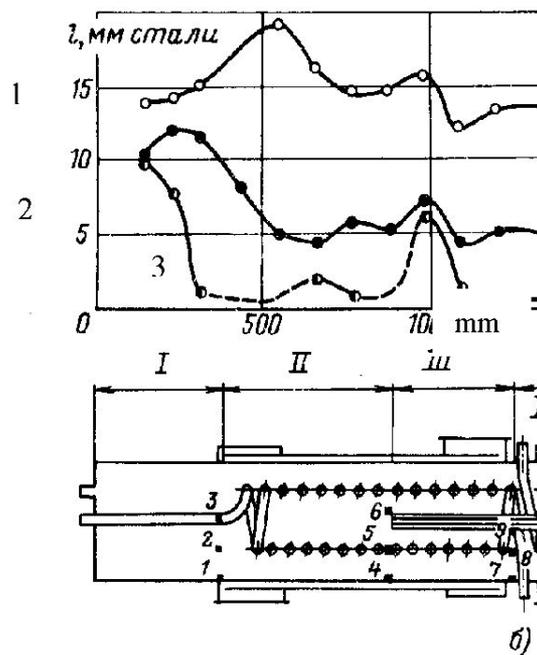
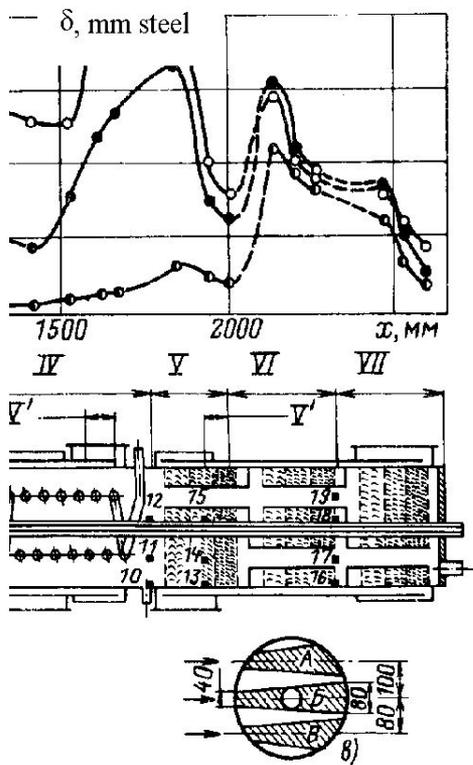
Схема холодной ловушки

- 1 – корпус ловушки;
- 2 – подводящий канал;
- 3 – фильтр;
- 4 – отстойник;
- 5 – зона охлаждения



Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

- Базовой признана ХЛ, состоящая из трех зон: отстойника, окончательного охлаждения и фильтрования.



а) – распределение оксида натрия по длине ловушки, суммарное количество оксида в ловушке:

1 - 111 кг;

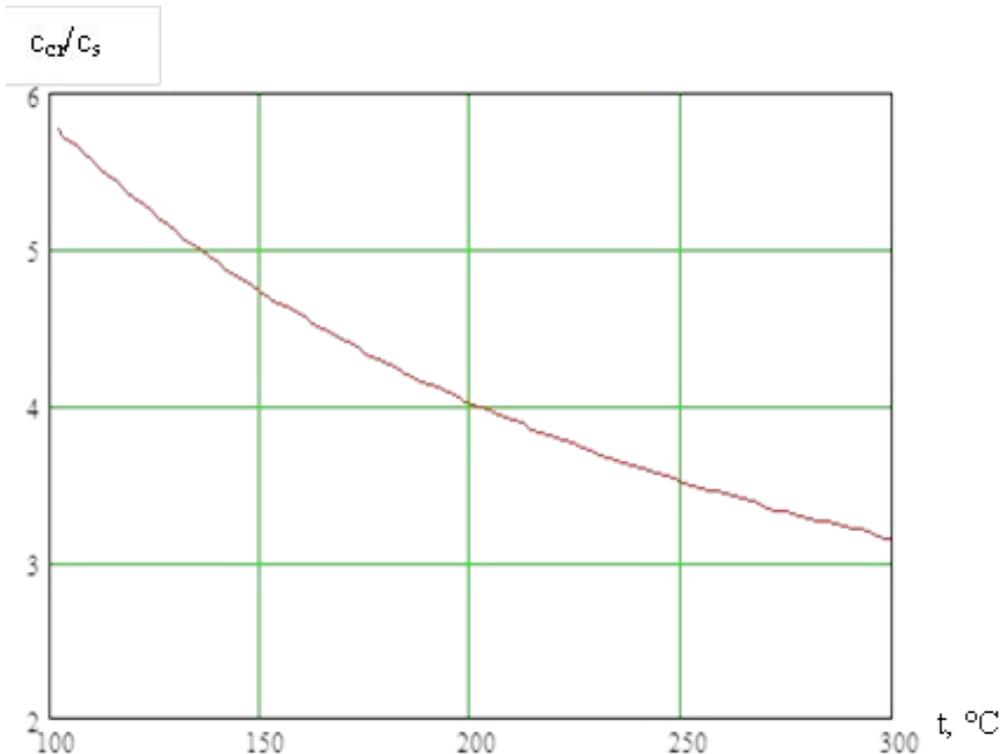
2 - 63 кг;

3 - 14 кг;

б) – схема разрезки ловушки и места пробоотбора

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Температурная зависимость для оценки критического пересыщения
оксида натрия в натрии



$$\frac{c_{cr}}{c_s} = \exp\left(\frac{4\sigma\mu_n}{\rho_p d_0 RT}\right)$$

Концентрация насыщения
кислорода в натрии

$$c_s = 10^{6,2571-2444,5/T}, \text{ ppm}$$

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Зависимость размеров частиц оксида натрия от времени при 150 °С без учета влияния источников и стоков частиц



Концентрация насыщения кислорода в натрии

$$c_s = 10^{6,2571-2444,5/T}, \text{ ppm}$$

Если имеет место только броуновская диффузия

$$d_p = \left(\frac{6c_m}{\pi n \rho_p} \right)^{1/3}$$

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{\tau}{2\tau_k}}$$

$$K_{ko} = \frac{4k_b T}{3\mu}$$

$$c_m = (c_{cr} - c_s) \rho_{Na} \cdot 10^{-6}$$

T_k - период
коагуляции

$$K_{ko} = \frac{1}{2\tau_k n_o}$$

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Расчет массопереноса примесей в холодной ловушке с использованием кода MASKA-LM

Для описания процессов очистки натрия в холодной ловушке использована система уравнений несжимаемой многокомпонентной среды в цилиндрической системе координат, включающая в себя уравнения гидродинамики в приближении Буссинеска, уравнения сохранения и переноса тепловой энергии, уравнения физико-химической кинетики примесей, уравнения сохранения и переноса компонентов многокомпонентной среды. Решение системы уравнений осуществляется специально разработанным конечно-разностным методом, основанном на численном методе решения уравнений гидродинамики и теплообмена многокомпонентной среды.

Расчетные методы оптимизации холодных ловушек

Уравнения движения и неразрывности в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial r U^2}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V U}{\partial \varphi} + \frac{\partial W U}{\partial z} - \frac{U^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[2\mu \frac{\partial U}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} + \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) \right] + 2\mu \frac{1}{r} \left(\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} - \frac{U}{r} \right) \right\} - \Lambda_r U$$

U,V,W- проекции (компоненты) вектора скорости среды в цилиндрической системе координат r, φ, z

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r V}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Уравнение энергии

$$\frac{\partial(c\rho t)}{\partial\tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rUc\rho t)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(Vc\rho t)}{\partial\varphi} + \frac{\partial(Wc\rho t)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \sum_n \Delta w^n c^n \rho^n \varepsilon^{fn} t + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial\varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v$$

$c\rho = \sum_n \varepsilon^n c^n \rho^n$ - осреднённая по компонентам объёмная теплоёмкость среды;
 $\lambda = \sum_n \varepsilon^n \lambda^n$ - осреднённая по компонентам теплопроводность среды;
 ε^{fn} - объёмная доля компонента n , находящегося в жидком (газообразном) состоянии

Расчетные методы оптимизации холодных ловушек

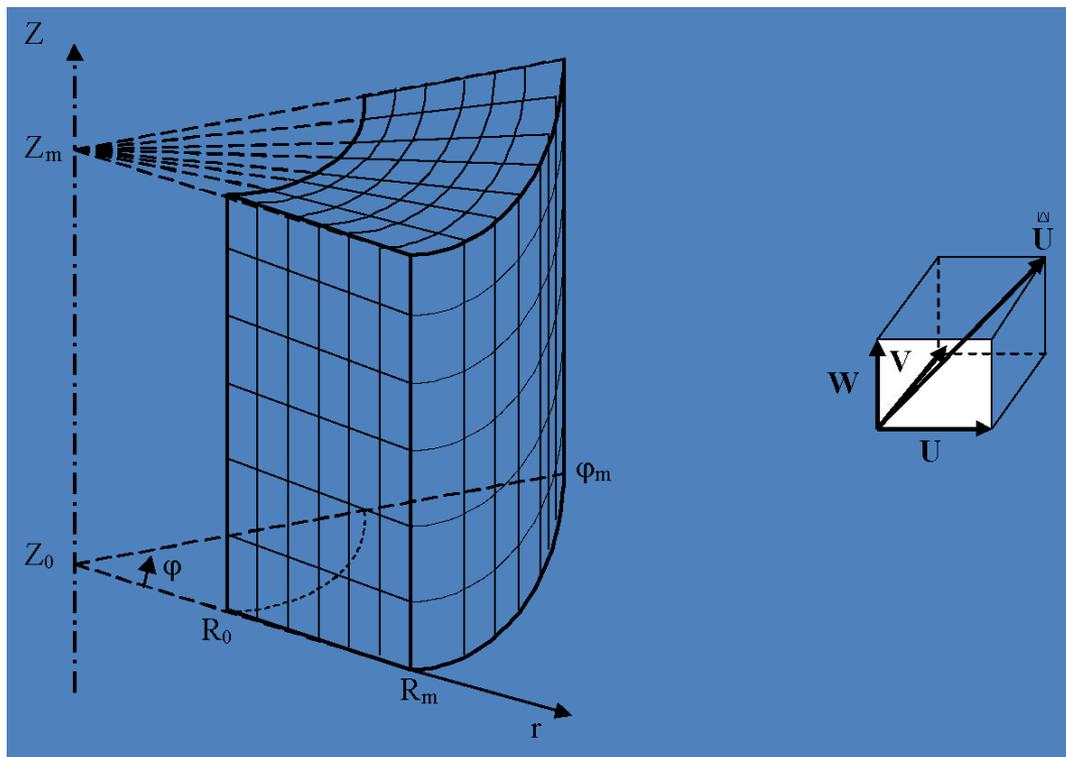
Уравнение переноса компонентов примеси

$$\frac{\partial C^n}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r C^n U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (C^n V) + \frac{\partial}{\partial z} (C^n W) = - \frac{\partial}{\partial z} (C^n \Delta w^n) + \sum_{p=1}^N J^{np} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D^n \frac{\partial C^n}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} D^n \frac{\partial}{\partial \varphi} C^n + \frac{\partial}{\partial z} D^n \frac{\partial C^n}{\partial z}$$

C^n – концентрация компонента n примеси; U - радиальная компонента вектора скорости; V – азимутальная компонента вектора скорости; W - аксиальная компонента вектора скорости; D_n – коэффициент диффузии компонента n , равный сумме коэффициентов молекулярной и турбулентной диффузии; Δw^n - компонента вектора скорости расслоения в вертикальном направлении (относительного движения) компонента n примеси в натрии; J_{np} – источник компонента n , образующегося из компонента p примеси

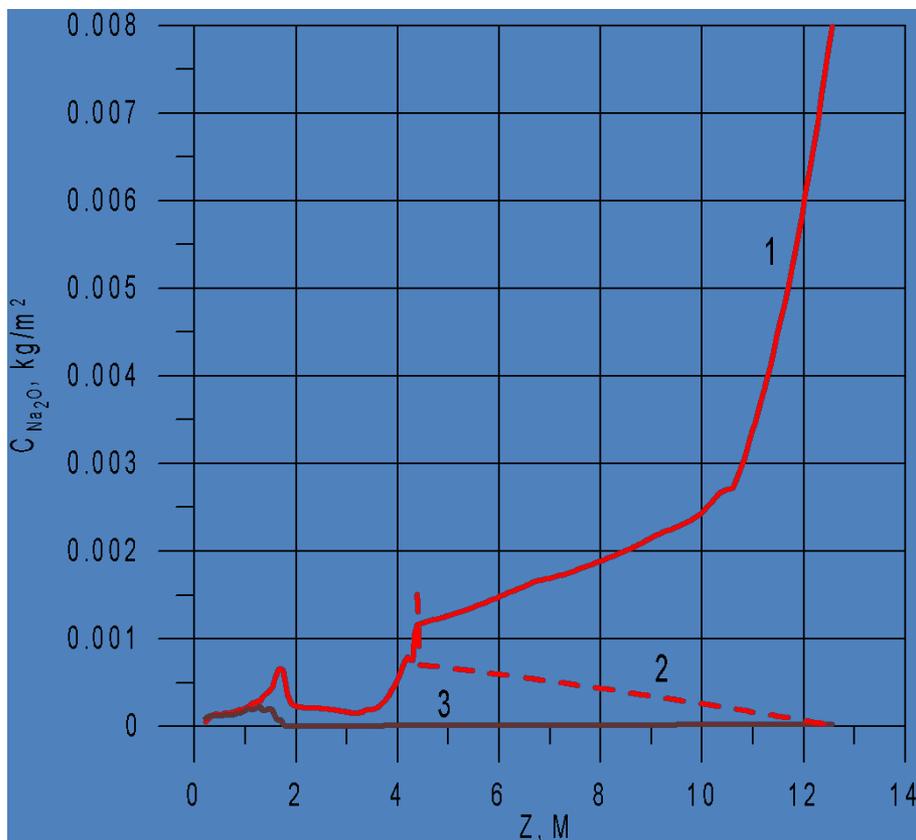
Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Расчетная сетка в цилиндрической системе координат



Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Расчет массопереноса примесей в холодной ловушке с использованием кода MASKA-LM



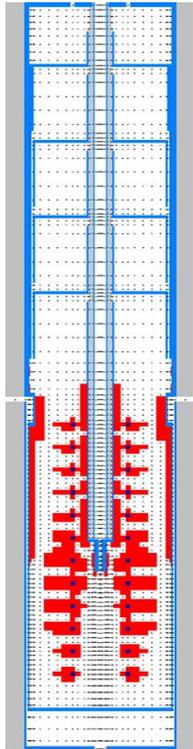
Распределение поверхностных отложений примеси за 5 часов накопления:

1 – кристаллизация из раствора на внутренней вертикальной поверхности корпуса рабочей полости;

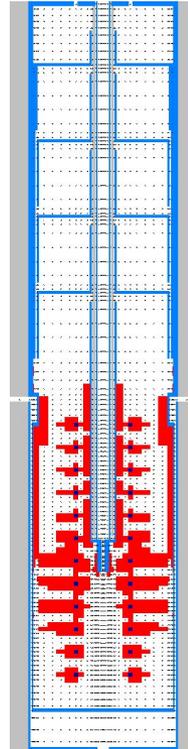
2 – кристаллизация из раствора на внешней вертикальной поверхности подводящей трубки;

3 – отложение дисперсной фазы на внутренней вертикальной поверхности корпуса рабочей полости

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК



Отложения через 236 суток процесса перед полным забиванием проходного сечения рабочей полости



Отложения через 240 суток процесса, полное забивание проходного сечения рабочей полости

Расчёты выполнялись для следующих исходных данных:

- температура загрязненного натрия на входе – 410 °С;
- температура охлаждающего натрия на входе – 120 °С;
- концентрация примеси на входе – 30 млн⁻¹;
- расход натрия через рекуператор равен расходу натрия через байпас – 0,00057 м³/с;
- расход охлаждающего натрия через змеевик равен расходу натрия через боковой щелевой теплообменник – 0,003 м³/с;
- твёрдые отложения предполагаются состоящими из 40 % оксида и 60 % натрия по объёму отложений.

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Расчет массопереноса примесей в холодной ловушке с использованием кода TURBOFLOW

Для расчета осаждения примеси в холодной ловушке решается совокупность нестационарных уравнений переноса в пространстве ловушки трех фаз (компонент) и температуры.

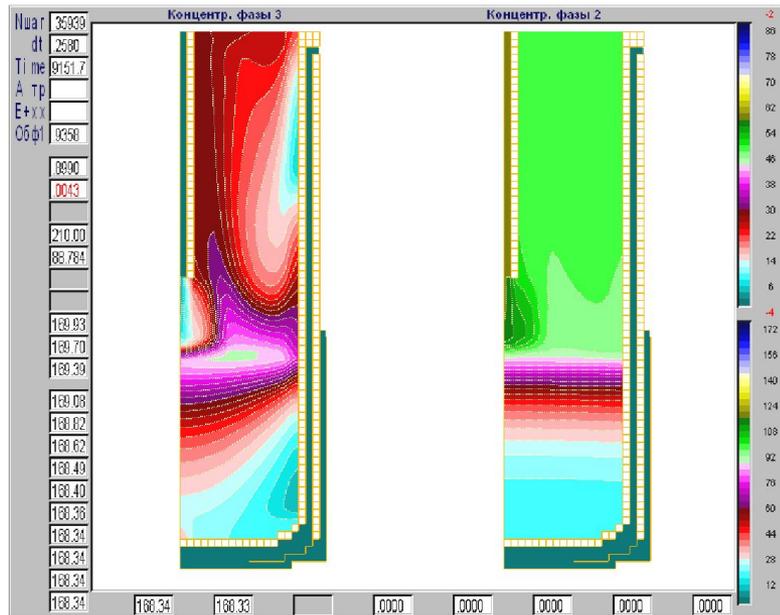
Фаза 1 – теплоноситель (натрий), фаза 2 – растворенная в теплоносителе примесь, фаза 3 – кристаллизовавшаяся примесь.

Приняты следующие локальные условия для фазовых переходов:

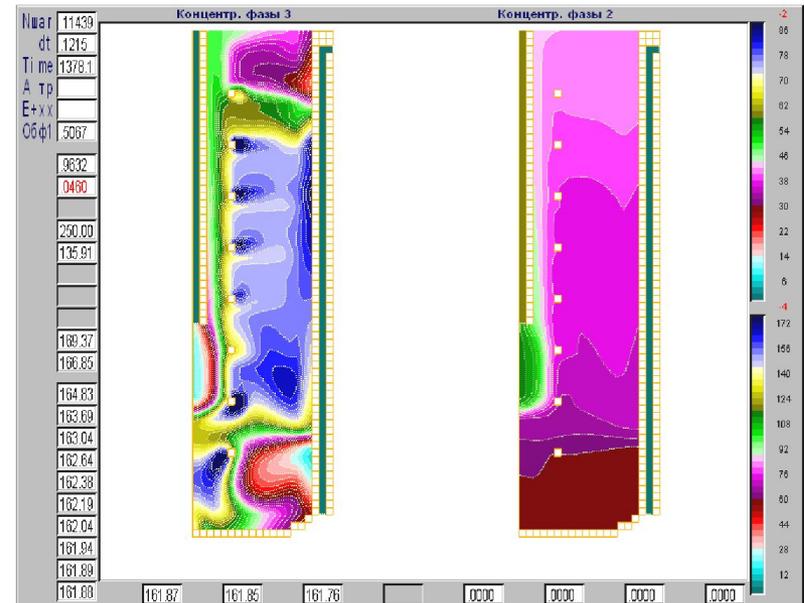
- фаза 2 распадается в фазу 3, если концентрация фазы 2 превышает локальную предельную (функция температуры). Скорость процесса определяется постоянной времени, задаваемой в исходных данных;
- фаза 3 распадается в фазу 1 вблизи твердых поверхностей с заданной интенсивностью (скорость осаждения). Это моделирование процесса осаждения примеси на стенках;
- фаза 3 может распадаться в фазу 2, если концентрация фазы 2 ниже локальной предельной (растворение кристаллизовавшейся примеси) – процесс медленный по сравнению с распадом фазы 2 в фазу 3.

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Расчёт с использованием кода TURBOFLOW



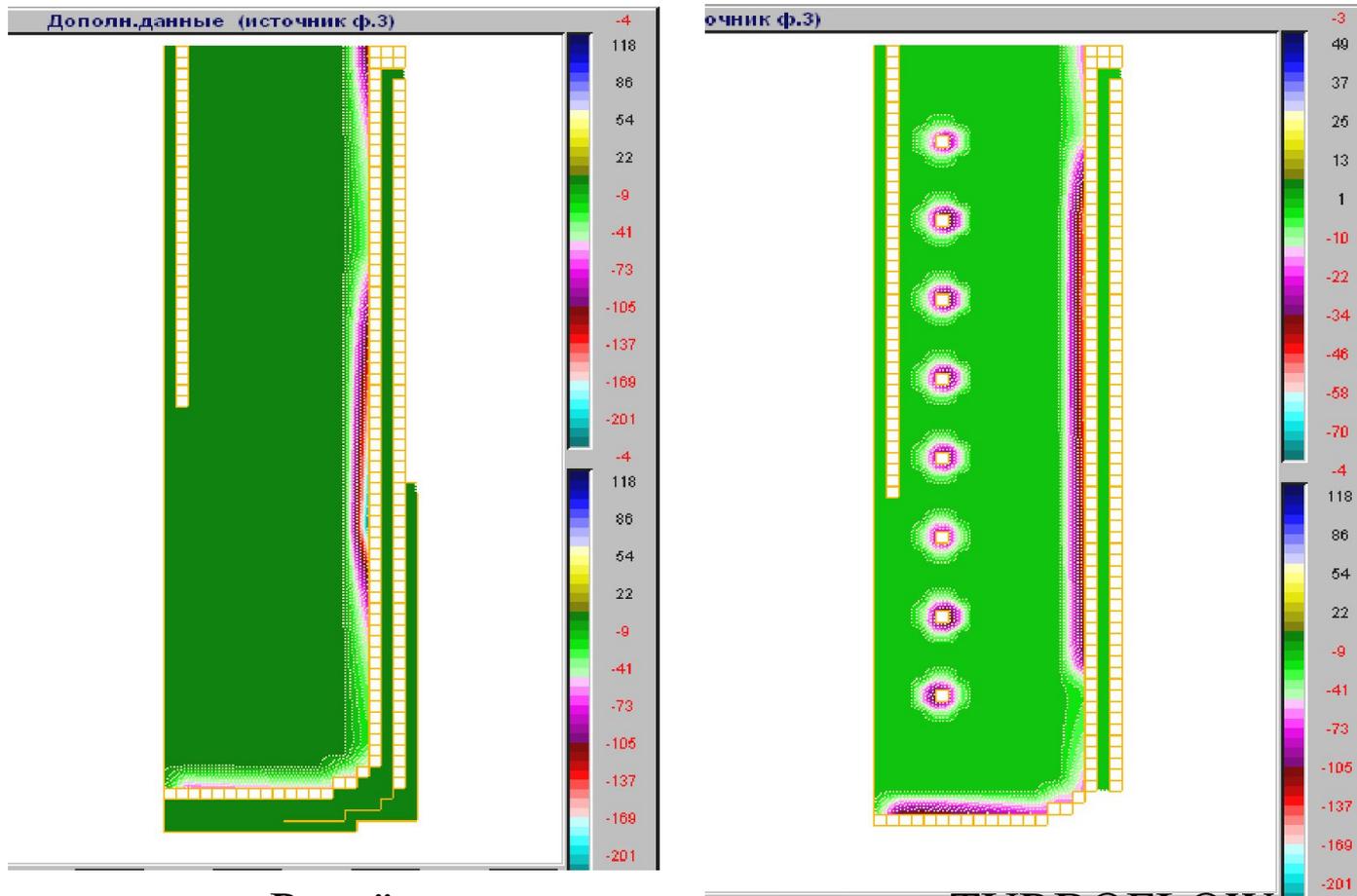
с газовым
охлаждением



с натриевым
охлаждением

Сравнение распределений концентрации растворенной примеси (слева) и концентрации кристаллизовавшейся примеси (справа).

Расчетные методы оптимизации холодных ловушек



Расчёт с использованием кода TURBOFLOW

Сравнение распределений отложений примеси высоте ловушки.

Слева – ХЛ с газовым охлаждением, справа – с натриевым охлаждением.

46 Подтверждена более высокая емкость по оксиду натрия ХЛ с натриевым охлаждением.

Расчетные методы оптимизации холодных ловушек

Моделирование процессов тепломассопереноса в ХЛ с помощью пакета OpenFOAM.

Модифицированный код OF предназначен для решения совместной теплогидравлической и массообменной задачи: в него включены современные методы решения уравнений Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу (URANS) – SIMPLE, PIMPLE и PISO, имеются как стационарные решатели, так и решатели переходных процессов; для сжимаемых и несжимаемых сред, в том числе с моделью пористого тела, для сопряженного теплообмена и с учетом сил плавучести.

Для получения картины распределения концентрации примесей в ХЛ массообменная и теплогидравлическая задачи просчитываются в два этапа. На первом рассчитываются поля ключевых параметров потока теплоносителя: скорости, температуры и давления. Результаты этого расчета используются на следующем этапе – расчете переноса примесей во внутренней полости аппарата.

Для определения температурных полей, полей скоростей и давления производится теплогидравлический расчет в двумерной гексагональной сетке модифицированным стационарным решателем *buoyantSimpleFoam* – *mcfBuoyantFoam*. В него были включены теплофизические свойства жидких металлов. В исходный решатель заложено влияние сил плавучести на гидродинамику потока.

Расчет транспортировки примесей в полости ловушки производился с помощью переписанного решателя *transportFoam* с диффузионно-конвективным уравнением переноса концентрации следующего вида:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \mathbf{v} \cdot \nabla C$$

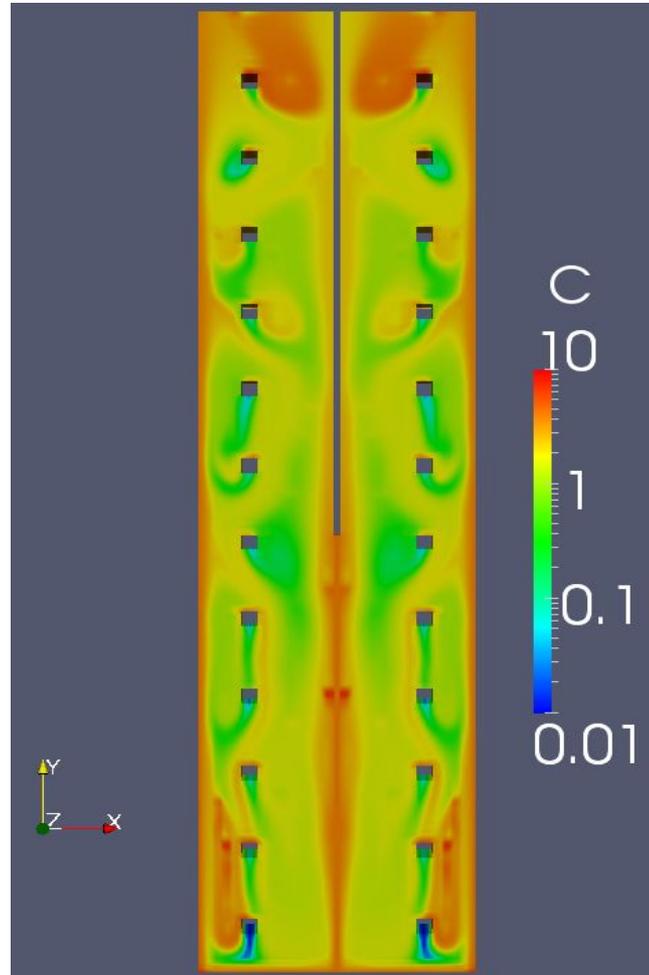
где C – концентрация, кг/кг;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

\mathbf{v} – скорость, м/с;

t – время, с.

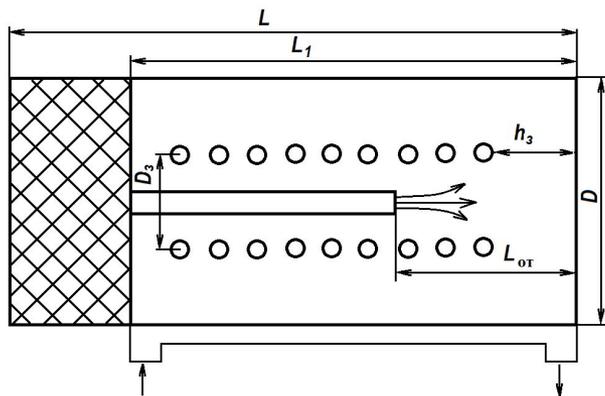
Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК



Моделирование процессов тепломассопереноса в ХЛ
с помощью пакета OpenFOAM

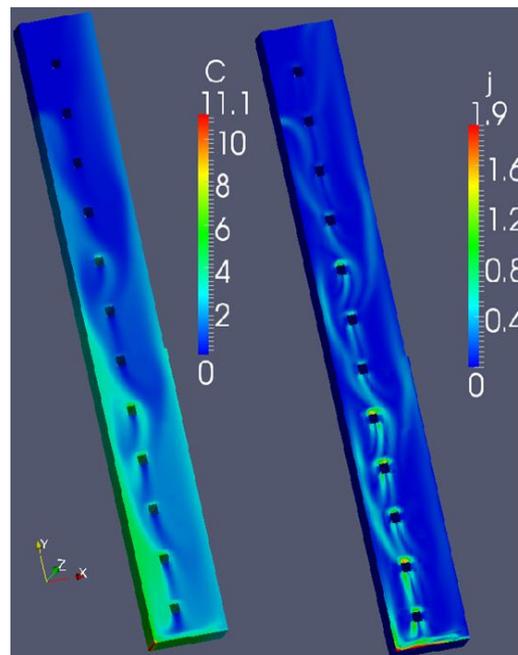
Расчетные методы оптимизации холодных ловушек

АНАЛИЗ НАТРИЕВОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ХФЛ, ВСТРОЕННОЙ В БАК РЕАКТОРА

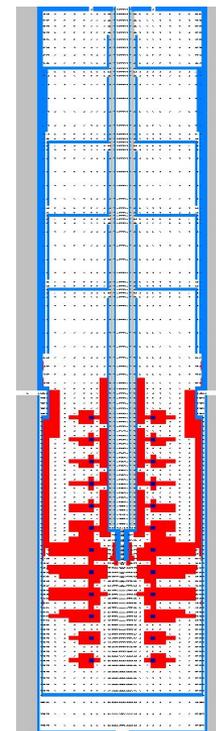


Оптимизация рабочей полости ХФЛ с использованием кода TURBFLOW (Щербаков С.И.)

- диаметр внутренней полости ловушки 0,86 м
- высота отстойника до 1,45 м
- длина внутренней полости ловушки без фильтра 3,25 м
- объем рабочей полости ловушки до фильтра 1,8 м³
- расход очищаемого натрия через ловушку 1,5 кг/с



Оценка потоков примесей на поверхность ХФЛ с использованием кода OpenFOAM (Варсеев Е.В.)



Расчет осаждения примесей в ХФЛ с использованием кода MASKA (Кумаев В.Я.)

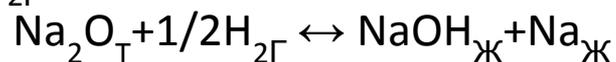
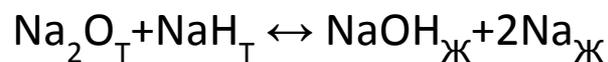
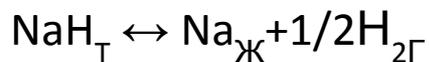
Сделан вывод о целесообразности доработки встроенной в бак реактора ХФЛ с натриевой системой охлаждения, как варианта для технического проекта реактора.

Расчетные методы оптимизации ХОЛОДНЫХ ЛОВУШЕК

Недостатки встроенной системы очистки

- 1) Низкая производительность ВСО из-за существенно ограниченного расхода натрия через ХЛ, и поэтому – значительное увеличение времени очистки натрия до требуемого уровня его чистоты.
- 2) Необходимость многократной замены ХЛ для обеспечения работы установки из-за недостаточной ёмкости ВСО по примесям вследствие жёстких ограничений на размеры и количество ХЛ.
- 3) Наличие сложной системы газового охлаждения и необходимость постоянного поддержания ловушки в режиме охлаждения. Неработающая ХЛ должна поддерживаться при температуре 120-150 °С, так как длительное пребывание отсеченной ХЛ при температуре окружающего её натрия ($t_{\text{Na}} \geq 410^\circ\text{C}$) приведёт к усиленной коррозии элементов внутри ХЛ.
- 4) Возможность выхода загрязненного примесями натрия в бак реактора из перегретой ХЛ, образования газообразного водорода и выхода его в бак реактора.
- 5) Поскольку нет отечественного прототипа ВХЛ, должна быть научно обоснована и разработана по существу новая конструкция холодной ловушки и необходимые для её работы узлы:
 - рекуператор (по крайней мере, для номинального режима очистки);
 - собственный электромагнитный насос;
 - расходомер;
 - тепловая изоляция от окружающего ловушку натрия.

Восстановление работоспособности холодных



Регенерация ХЛ и их моделей (опыт СССР)

№	Объект	Место проведения регенерации	Накопленные в ХЛ продукты	Количество регенераций
1	ХЛ V~105 л	Экспериментальный стенд ФЭИ	Na ₂ O, NaH, NaOH	1 (1973)
2	ХЛ V~105 л	Экспериментальный стенд ФЭИ	Na ₂ O, NaH, NaOH	1 (1973)
3	ХЛ V~105 л	Экспериментальный стенд ФЭИ	Na ₂ O, NaH, NaOH	8 (1975-1982)
4	Модель ХЛ V~36л	Экспериментальный стенд ФЭИ	Na ₂ O	2 (1974)
5	Модель ХЛ БН-600 V~800л	Экспериментальный стенд ФЭИ	Na ₂ O, NaH, NaOH	3 (1973-1987)
6	ХЛ системы приготовления натрия V~3м ³	БН-350 (опробование метода)	Na ₂ O, NaH, NaOH	2 (1980, 1981)
7	ХЛ петли №9 V~3м ³	БН-350 (опробование метода в условиях петли)	Na ₂ O, NaH, NaOH, NaT	1 (1983)
8	ХЛ петли №12 V~3м ³	БН-350	Na ₂ O, NaH, NaOH, NaT	1 (1984)
9	ХЛ петли №8 V~3м ³	БН-350	Na ₂ O, NaH, NaOH, NaT	1 (1985)
10	ХЛ петли №11 V~3м ³	БН-350	Na ₂ O, NaH, NaOH, NaT	1 (1985)
11	ХЛ петли №5 V~6м ³	БН-600 5ФЛ-2А	Na ₂ O, NaH, NaOH, NaT	1 (1987)
12	ХЛ петли №5 (вторая ХЛ) V~6м ³	БН-600 5ФЛ-2Б	Na ₂ O, NaH, NaOH, NaT	1(1988)

Результаты экспериментальных исследований очистки натрия от кальция

№№ экспериментов	Режимы термохимической обработки			Режимы очистки холодной ловушкой			Концентрация кальция, млн ⁻¹	
	Масса введенного пероксида натрия, г	Температура натрия, °С	Длительность обработки, ч	Температура натрия на входе в х.л. °С	Температура натрия на выходе из х.л., °С	Кратность циркуляции натрия через х.л.	До очистки	После очистки
1	20,5	380-400	3	360-380	120-130	3	16	3,5
2	5,6	380-400	3,5	360-380	120-130	3,2	34	3,9

Результаты экспериментальных исследований очистки натрия от углеродсодержащих примесей при помощи холодных ловушек

№№ п.п.	Введенная примесь	Количество введенной примеси / концентрация в пересчете на углерод, г/млн ⁻¹	Температура контура при вводе примеси, °С	Макс. обнаруженное содержание примеси в натрии (нелетучие формы), млн ⁻¹	Режим очистки натрия				Содержание введенной примеси после очистки, млн ⁻¹
					t _{вх.х.л.} , °С	t _{вых.х.л.} , °С	G _{х.л.} , м ³ ·ч ⁻¹	τ, ч	
1	Графит (дисперсность (5-10)·10 ⁴ см)	23/150	300-315	100	280	120	0,22	7	3
2	Карбонат натрия	40/30	330-400	4	240	115-120	0,22	3	2
3	Парафин	20/170	400-450	130	280-300	130-140	0,30	260	41
4	Ацетилид натрия (в виде ацтилена)	13,9/110	180-500	6	210	130	0,54	11	2

Показана возможность использования холодных ловушек для очистки натрия от нелетучих форм углерода при 3-10 кратной прокачке натрия через холодную ловушку. Очистка натрия от летучих форм углерода оказывается малоэффективной.

Вывод холодных ловушек из эксплуатации

Удаление из ХЛ накопленных примесей и перевод их в экологически приемлемые формы.

- После проведения регенерации ХЛ каустическая фаза удаляется в специальный контейнер, а металлическая (после охлаждения ее до 120-150°C) – в контур ЯЭУ.
- Содержание контейнера растворяется паром, а затем водой, и полученный раствор сливается в хранилище радиоактивных водных отходов.
- В ХЛ остатки натрия нейтрализуются паром (водой).
- Жидкие радиоактивные отходы связываются в геоцементный камень, либо остекловываются.

Очистка оборудования от остатков теплоносителя и уничтожение отходов

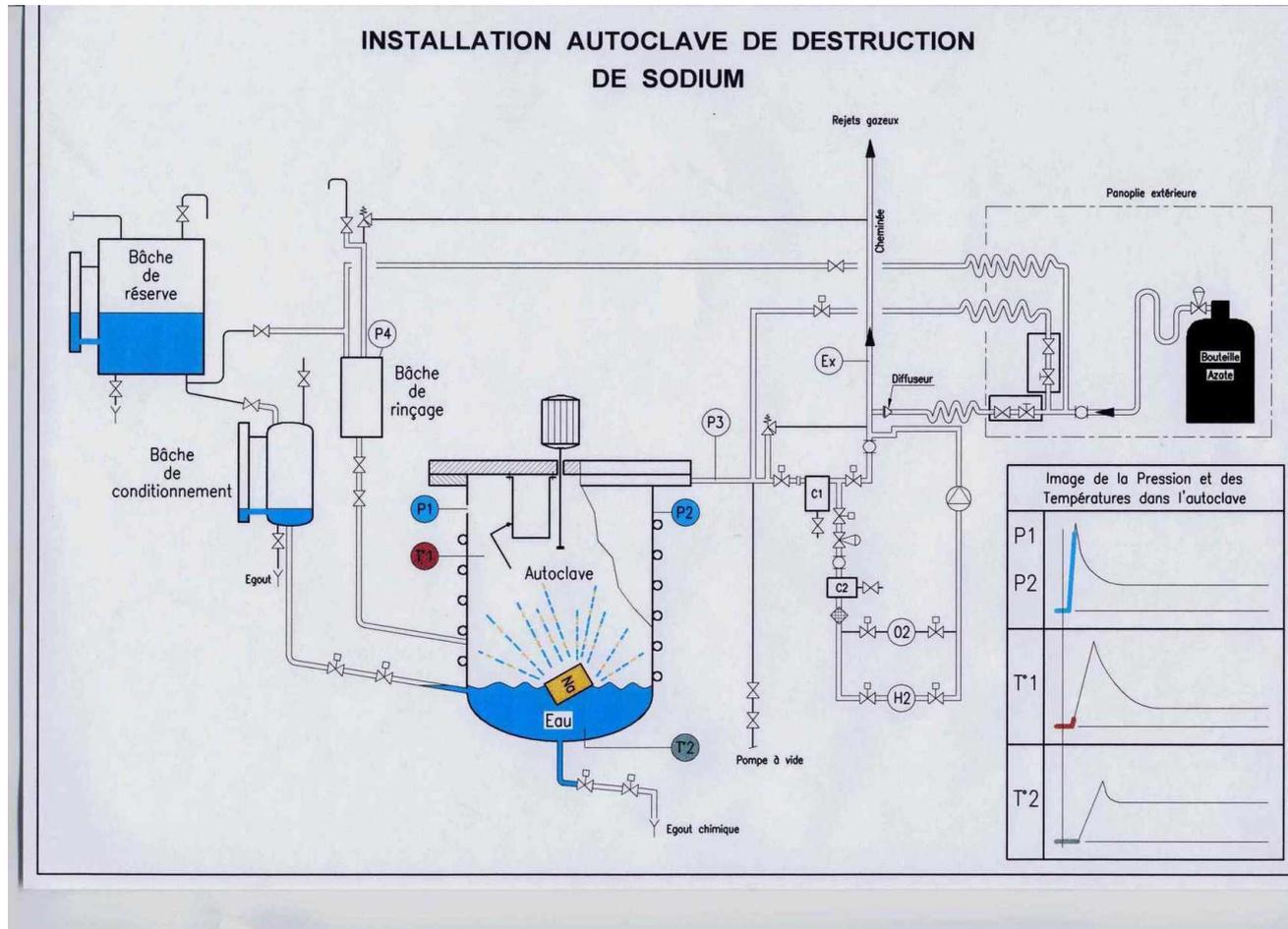
- **операции (безопасные приемы)**

- удаление остатков натрия из оборудования;
- защита натрия от окисления при вскрытии контуров;
- уничтожение отходов;
- утилизация отработавшего теплоносителя.

- **МЕТОДЫ ОТМЫВКИ**

- парогазовый;
- спиртовой и водноспиртовой;
- водовакуумный метод;
- вакуумная отгонка;
- отмывка водяным туманом.

Отмывка оборудования от натрия



Отмывка оборудования от натрия



Отмывка оборудования от натрия

- Методы очистки от остатков теплоносителя и уничтожение отходов: парогазовый; спиртовой и водноспиртовой; водовакуумный метод; вакуумная отгонка; отмывка водяным туманом.
- Парогазовый способ позволяет снизить скорость реакции натрия с водой регулированием содержания пара в газовой смеси азот – пар в пределах от 5 до 60%. Безопасность проведения операций обеспечивается контролем за содержанием водорода и кислорода в отмывочной шахте, предварительным разогревом оборудования до $t=110-130^{\circ}\text{C}$ (для предотвращения конденсации пара), постоянным удалением продуктов реакции и образующегося водорода из зоны реакции. Данный метод применяется для отмывки крупногабаритного оборудования.
- Метод отмывки мелкодисперсной водой (водяным туманом) был разработан для снижения коррозионного воздействия на конструкционные материалы. Форсунки, используемые при производстве водяного тумана, были рассчитаны и сконструированы исходя из требований дисперсности капель, формы факела и расходных характеристик. Важной особенностью этого метода является отсутствие коррозионного повреждения материала оборудования ввиду того, что отмывка производится при низких температурах.
- При водовакуумной отмывке, предложенной и разработанной в ОКБМ, процесс ведется при непрерывном удалении вакуумированием продуктов взаимодействия натрия с водой. Безопасность процесса обеспечивается соблюдением режима, при котором температура и давление не должны превышать следующих значений: при отмывке водой $t < 25^{\circ}\text{C}$, $P < 250$ Па; при отмывке туманом $t < 25^{\circ}\text{C}$, $P < 2$ КПа; при паровой отмывке $t < 100^{\circ}\text{C}$, $P < 45$ КПа.
- Для отмывки сложного и тонкостенного оборудования, склонного к повреждаемости, разработаны технологии спиртовой отмывки от остатков натрия, при этом применяются различные виды спиртов: этиловый, метиловый, этанола, гликоли, целлозольвы и пр. Реакционная способность натрия по отношению к спиртам уменьшается в порядке от первичных к вторичным, а также с увеличением числа атомов углерода: метанол > этанол > 1 пропанол > 2 пропанол и т.д. Спиртовой отмывке в основном подвергаются отработавшие тепловыделяющие сборки, не потерявшие своей герметичности. Этот метод отмывки ТВС этиловым спиртом внедрен на всех отечественных реакторах. Негерметичные сборки очищаются расплавленным свинцом.
- Очистка оборудования и контуров вакуумной дистилляцией обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами: гарантия безопасности (отсутствие выделения водорода); уменьшение количества сопутствующих отходов. Процесс вакуумной дистилляции ведется при температуре $400-450^{\circ}\text{C}$ и вакууме $30-40$ Па. Этот способ применяется для предварительной очистки сложного и разветвленного оборудования, имеющего карманы, недренируемые участки и т.д. Например, с помощью вакуумной дистилляции был очищен первый контур реактора БР-10 в 1980 году.

Отмывка оборудования от натрия

- При больших количествах отходов, а также для отработавшего теплоносителя применяют различные методы утилизации. В ФЭИ исследовались следующие процессы для перевода отходов натрия в пожаробезопасное состояние: метод амальгамирования; жидкофазный метод; метод газофазного окисления; метод твердофазного окисления.
- Метод амальгамирования основан на реакции металла со ртутью и образование амальгамы типа Na-Hg_2 , растворением ее в воде с выделением щелочи и водорода.
- Жидкофазный метод переработки отходов заключается в растворении диспергированного на шлаке натрия в щелочном растворе. Концентрированная щелочь в дальнейшем преобразуется в шлакощелочной цементный камень, пригодный для захоронения.
- Газофазный метод переработки отходов натрия основан на процессе окисления диспергированного на соде или шлаке натрия при температуре 300–350°C. Образующийся сухой порошок окислов при добавлении воды преобразуется в геоцементный камень, пригодный для захоронения.
- Твердофазный метод переработки отходов основан на окислении натрия оксидами элементов, содержащихся в шлаке металлургического производства. Реакция идет при температуре ~450°C; конечный продукт переработки представляет собой камнеподобное соединение, пригодное для длительного захоронения. Преимущества данного способа: отсутствие выделения водорода и меньшее увеличение конечного продукта по сравнению с вышеприведенными тремя методами. Этот метод отработан на лабораторных образцах и предполагается использовать для утилизации радиоактивных отходов натрия при выводе из эксплуатации реактора БР-10.

Отмывка оборудования от натрия

Дезактивация оборудования

- Дезактивация оборудования первого контура «быстрого» реактора применяется для снижения остаточного γ -фона после отмывки его от остатков натрия. Исследования показали, что основной вклад в мощность дозы дают следующие элементы: Cs-137, Mn-54, Co-60. Глубина их проникновения в металл может достигать до 50 мкм, но основная активность заключена в слое ~ 20 мкм.
- На основе исследований были подобраны наиболее эффективные рецептуры и режимы дезактивации, внедренные на действующих реакторах. Применяется обычно двухступенчатая процедура дезактивации: выдержка в щелочном окислительном растворе, изменяющая характер защитной пленки нержавеющей стали; выдержка в растворах кислот, обеспечивающая удаление необходимого поверхностного слоя стали.
- Наиболее эффективной оказалась, по результатам проведенных исследований, следующая рецептура:
 - 0,5% KMnO_4 + 1% NaOH $t=95^\circ\text{C}$, $t=1,5$ час,
 - 1% Na_2 ЭДТА (Этилендиаминтетрауксусная кислота) + 0,5% $\text{H}_2\text{C}_4\text{O}_3$ $t=95^\circ\text{C}$, $t=4$ час.
- На БН-600 используют несколько иную рецептуру (вторая процедура включает смесь щавелевой кислоты с перекисью водорода). При дезактивации добиваются снижения γ -фона в 200-300 раз.

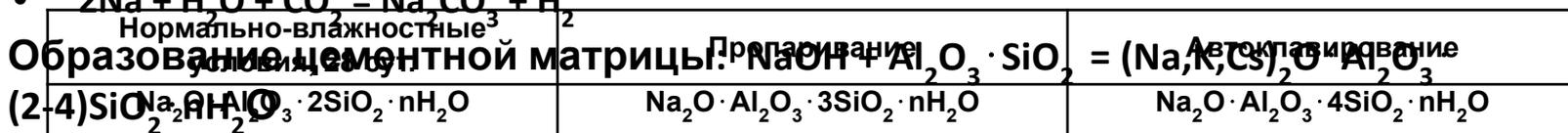
Отмывка оборудования от натрия

Обращение с РАО

- **КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ** – ПЕРЕВОД РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ФОРМУ, ПРИГОДНУЮ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ
- **ИММОБИЛИЗАЦИЯ** – ПЕРЕВОД РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ТВЕРДУЮ ФОРМУ, УМЕНЬШАЮЩУЮ ВОЗМОЖНОСТЬ МИГРАЦИИ ИЛИ РАССЕЙВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ВО ВРЕМЯ ХРАНЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ИЛИ ЗАХОРОНЕНИЯ
- **МАТРИЦА** – НЕРАДИОАКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В МОНОЛИТНОЙ СТРУКТУРЕ

ПЕРЕРАБОТКА РАО Na В ЩЕЛОЧНОЙ РАСТВОР (РАО ЩР) ИЛИ КАРБОНАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЖЕКТИРОВАНИЯ РАСПЛАВА НАТРИЯ В ЩЕЛОЧНОЙ РАСТВОР С ПОЛУЧЕНИЕМ РАСТВОРА ЩЕЛОЧИ (NaOH), КРИСТАЛЛОГИДРАТА (NaOH·nH₂O) ИЛИ КАРБОНАТА (Na₂CO₃)

- $2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + \text{H}_2$
- $2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2$



Аналоги преобразующих щелочных гидроалюмосиликатных минералов

Через 3 года, независимо от условий хранения, вещественный состав гидроалюмосиликатов становится близким к анальциму

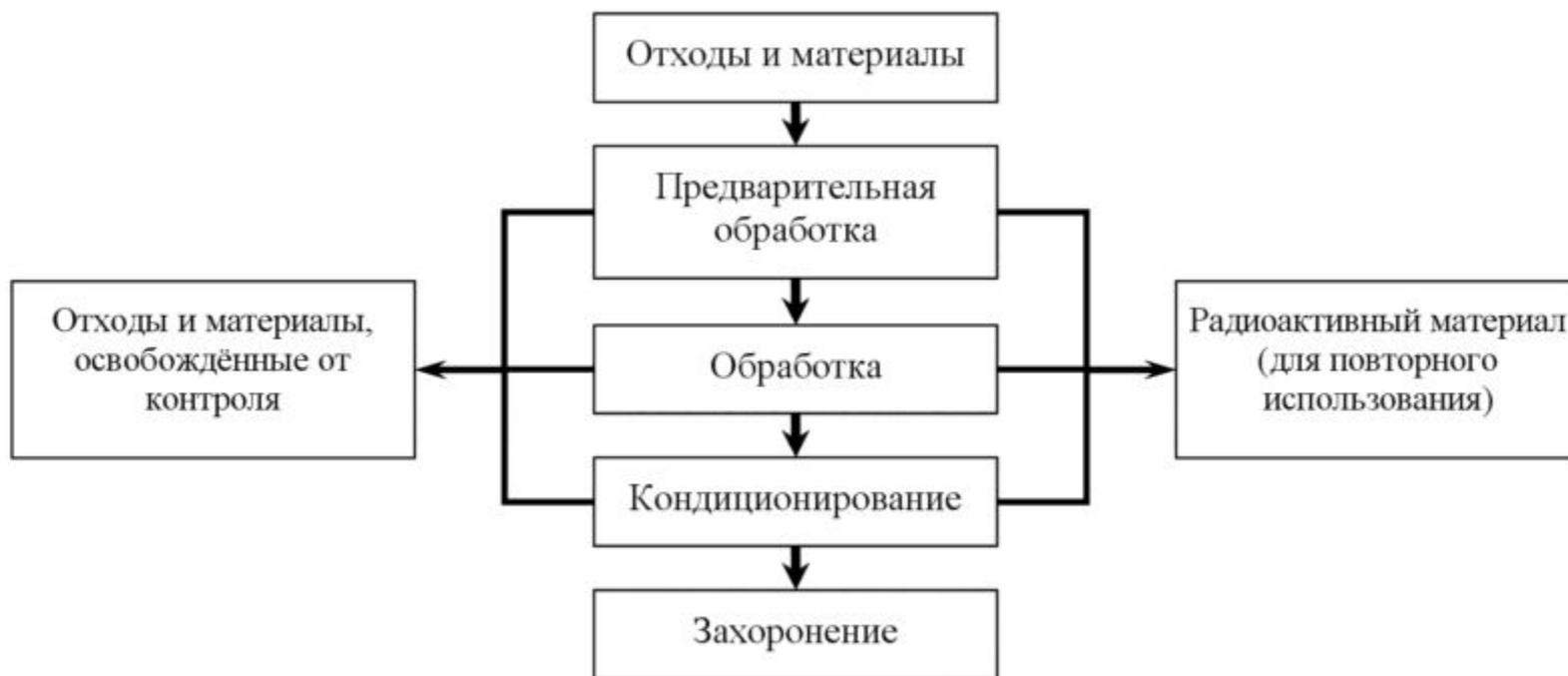
Отмывка оборудования от натрия

Обращение с

- Связывание отходов высокоактивного уровня активности (HLW) требует формирования нерастворимых, твердых форм, которые останутся устойчивыми в течение многих тысяч лет. В основном в качестве среды для размещения HLW выбирается боросиликатное стекло. Стабильная сохранность стекла с античных времен на протяжении тысячелетий подтверждает мысль о пригодности боросиликатного стекла в качестве материала для такой матрицы.
- Этот технологический процесс, называемый остекловыванием, также был применен для отходов низкого уровня активности, там, где тому соответствовали тип отходов или уровень экономики.
- Наиболее высокоактивные отходы образуются в жидкой форме после переработки отработанного топлива. Чтобы внедрить эти отходы в стеклянную матрицу, их первоначально прокаливают (высушивают), переводя в твердую форму. В таком виде их затем добавляют в расплавленное стекло, находящееся в нержавеющей контейнере, и охлаждают, создавая твердую матрицу. Контейнеры затем закрываются сваркой и готовятся для хранения и окончательного удаления.



Отмывка оборудования от натрия



Отмывка оборудования от натрия

Знак, предупреждающий о ионизирующем излучении радиоактивных отходов, принятый [МАГАТЭ](#) в 2007 году



6 Sudden chemical reaction in drum containing sodium waste for storage at Cadarache



What happened ?

- Chemical reaction of sodium and water was heard in a sodium storage building, 5 minutes later a sodium fire occurred

What was the situation ?

- Part of the sodium wastes were put in metallic drum with no tightness
- The drums were let there during a long time with no control

What was the explanation ?

- There was a slow water infiltration at the roof of the building
- The water infiltration allowed water on the lid of some metallic drums
- The water infiltrates in the drums producing sodium/water reaction, then heat then begin a sodium fire



Area where the sodium fire happen

5 Strong chemical reaction in a bottle where NaK was transferred



What happened ?

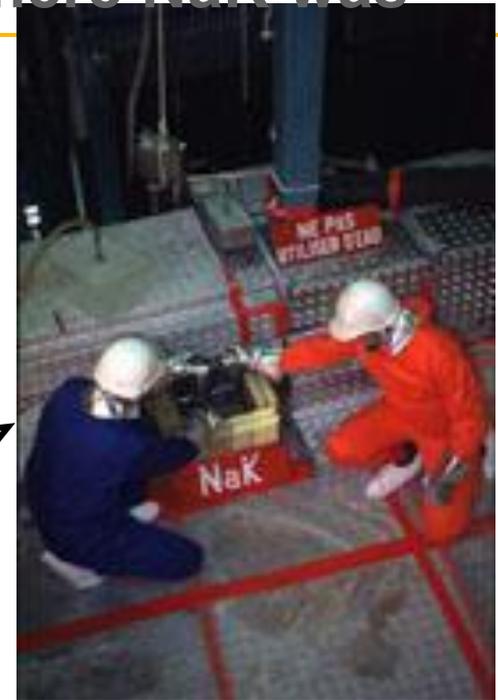
- In a transfer of NaK from an experimental device into a bottle an important reaction occurred in the bottle producing hydrogen and heat

What was the situation ?

- The transfer was made by overpressure in a new bottle
- The new bottle was not controlled

What was the explanation ?

- The new bottle was tested in pressure with water
- The drying of the bottle was not good
- When NaK came into the bottle it reacts with residual water



NaK transfer operation



Type of bottle

A secure way to store NaK wastes

