

Вопросы очистки натрия от примесей.

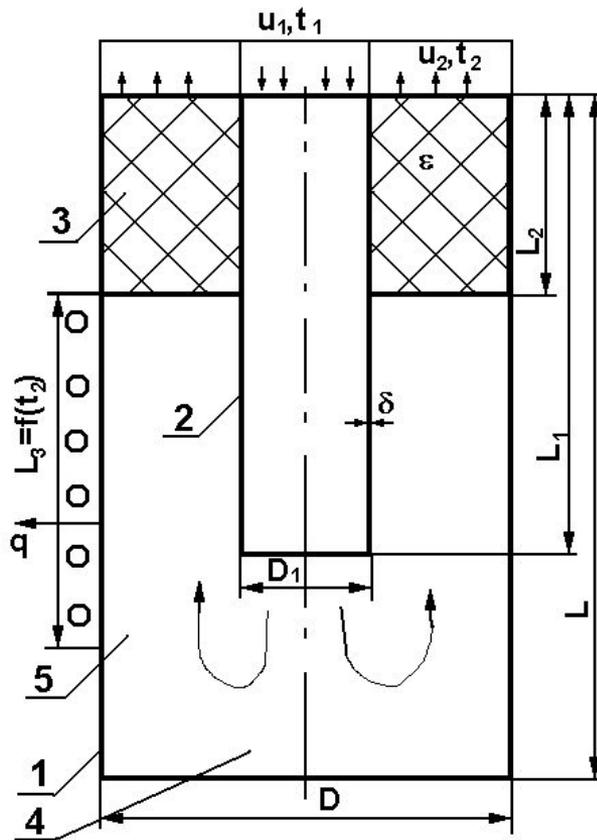
Алексеев В.В., Сорокин А.П.,
Коновалов М.А.

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

Схема холодной ловушки



1 – корпус
ловушки;

2 –
подводящий
канал;

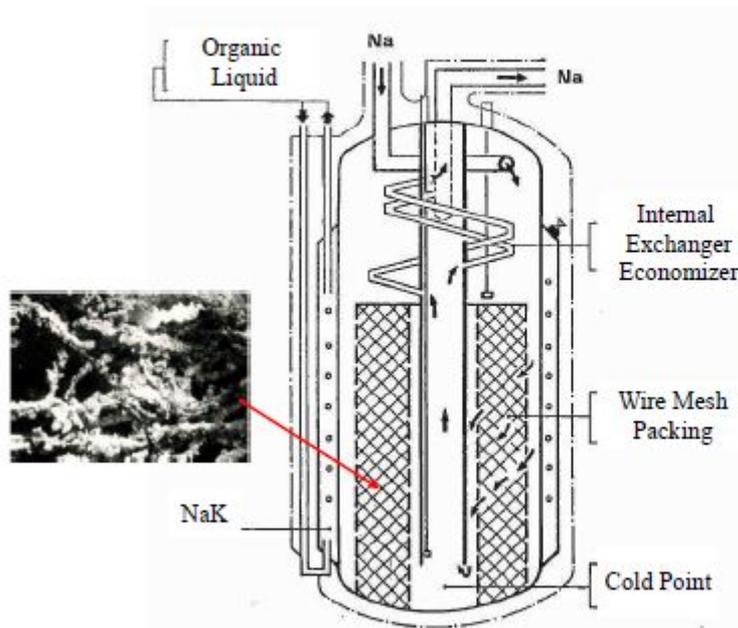
3 – фильтр;

4 – отстойник;

5 – зона
охлаждения

Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

Purification system: the cold trap



Primary Loop Cold Trap
in Phenix Reactor

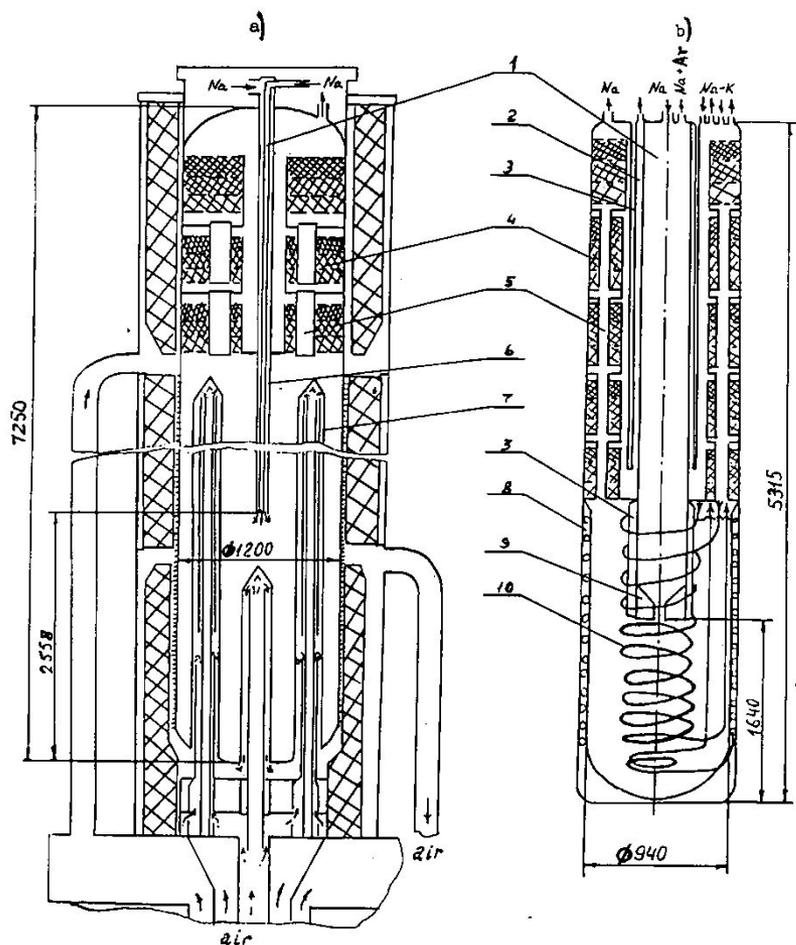


Mockup Cold Trap in Cadarache CEA
Sodium School



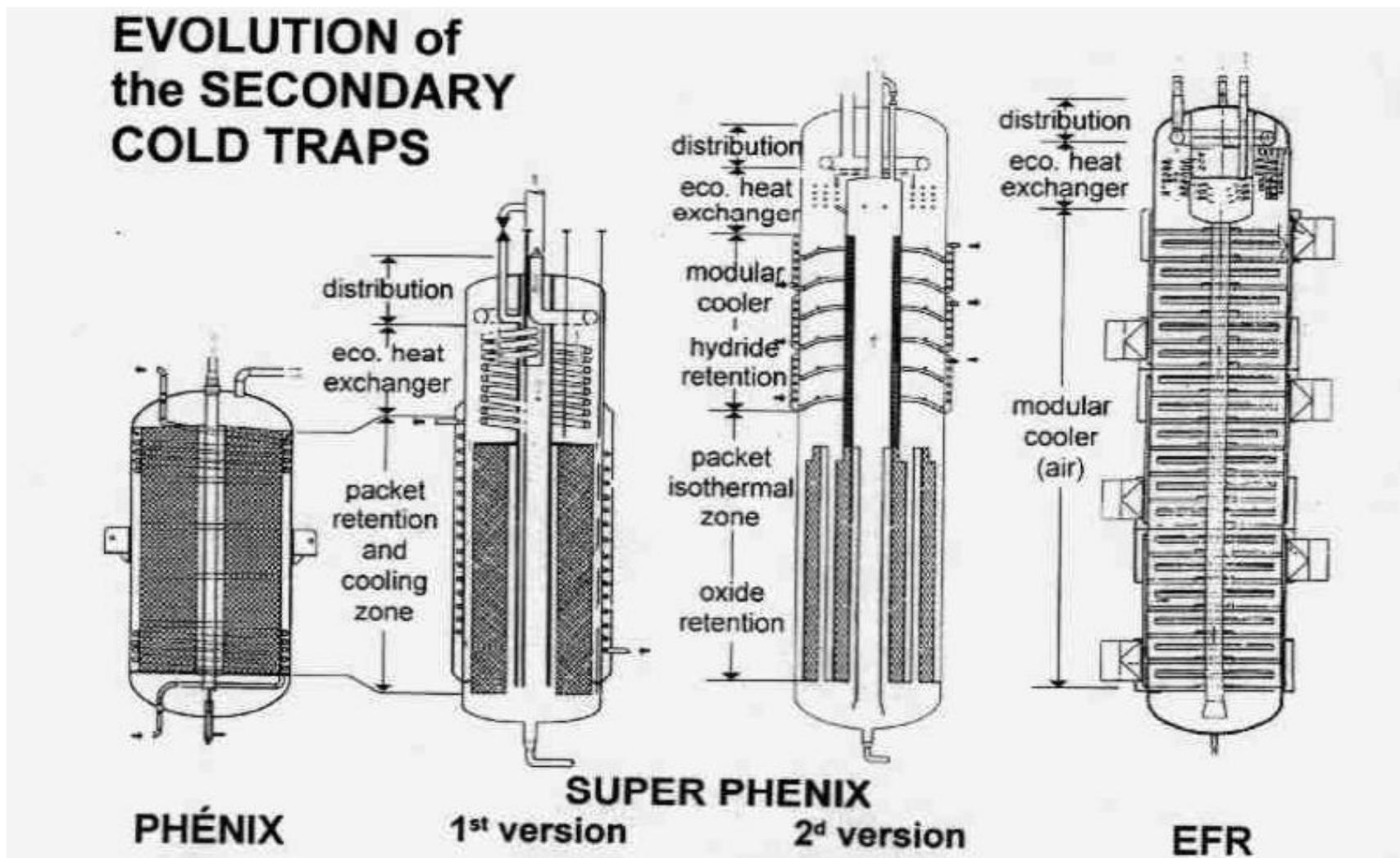
Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек

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

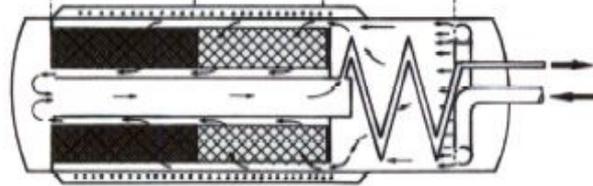
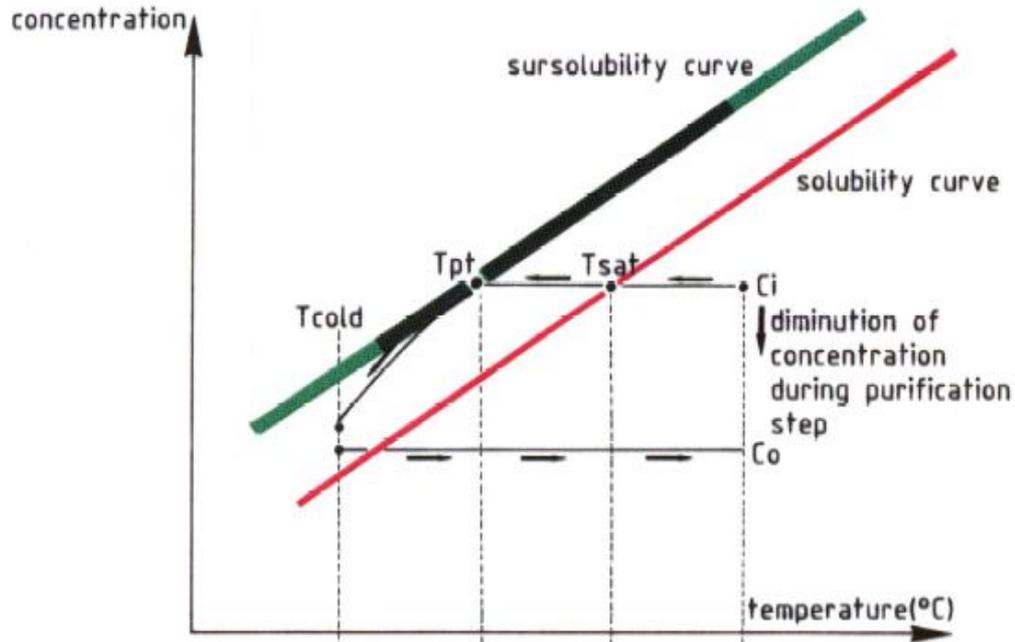


- 1 – центральная труба;
- 2 – внешний канал рекуператора;
- 3 – воздушная теплоизоляция;
- 4 – фильтр;
- 5 – перепускные трубы;
- 6 – кольцевой канал (второй вход натрия);
- 7 – труба воздушного охлаждения;
- 8 – рубашка охлаждения;
- 9 – конус для увеличения входной скорости;
- 10 – змеевики охлаждения

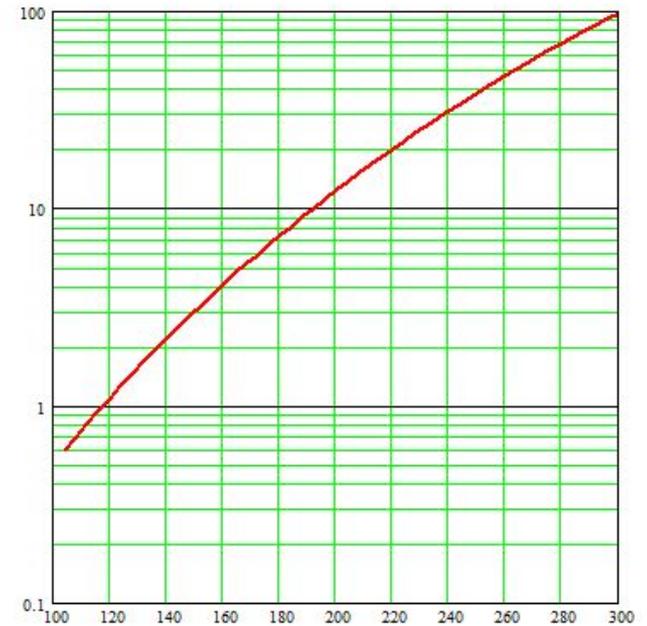
Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек



Устройство, принцип действия и режимы работы холодных ловушек



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

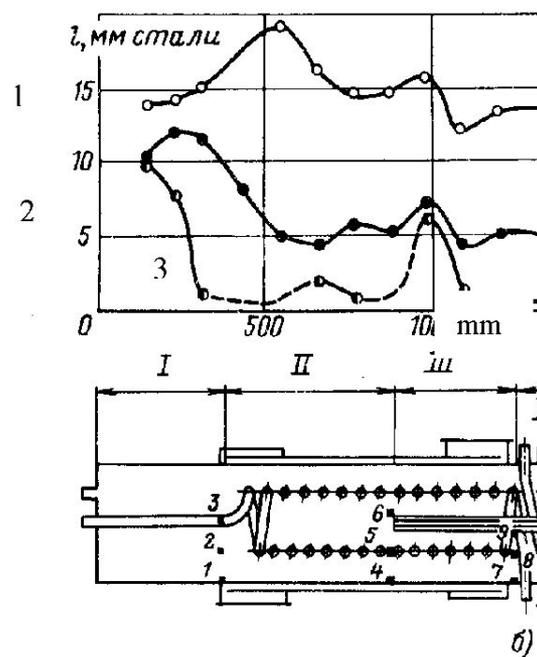
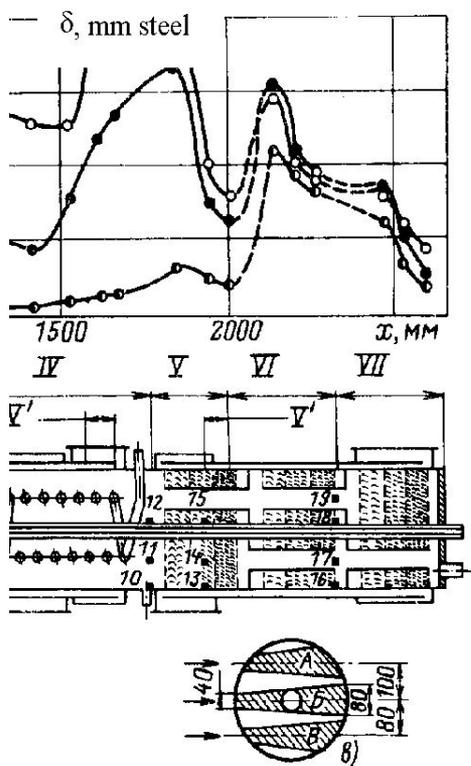


Поток примеси в ХЛ

$$J_o = G \cdot \beta \cdot (C_{вх} - C_{вых})$$

Исследования холодной очистки

- 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

Параметры 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

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

$$C(\tau) = C' + \frac{Q_i}{Q_{л}\beta} + (C_0 - C' - \frac{Q_i}{Q_{л}\beta})e^{-\frac{Q_{л}\beta}{M}\tau}$$

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;

$Q_{л}$ – расход натрия через ХЛ;

β – коэффициент удержания примесей в ХЛ;

τ – время очистки.

$$dC/d\tau = -\beta Q_{л} (C - C')/M + Q_i/M$$

Вопросы оптимизации

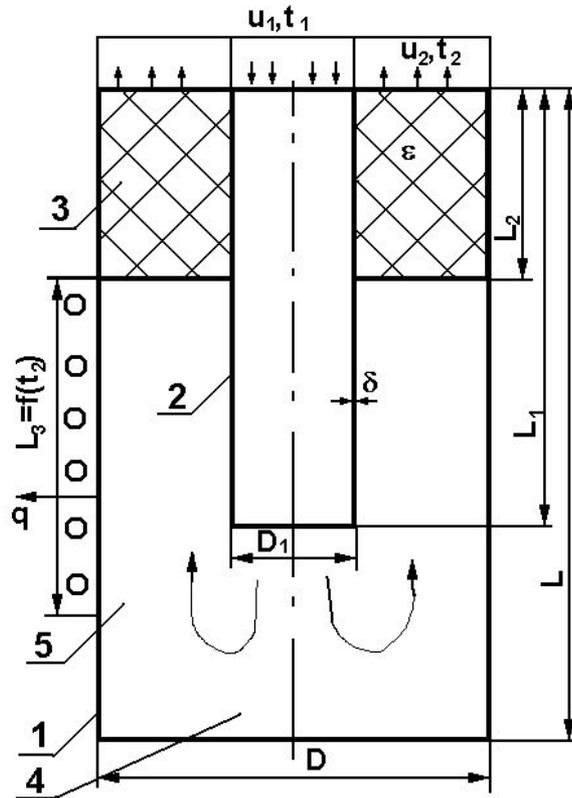


Схема холодной ловушки

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

Варьируемые параметры

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

Требуется создание численного алгоритма и структуры расчетного кода. Должны быть получены результаты расчетов полей скорости, температуры, концентраций растворенной примеси и твердых частиц в холодной ловушке.

Методика расчета тепломассопереноса (перенос примесей) в холодной ловушке

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{U}) = 0$$

импульса:

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \cdot \vec{U}) = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot [(\mu + \mu^T) \nabla \cdot \vec{U}] + \rho \cdot \vec{g}$$

энергии:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \cdot C_p T) = \nabla \cdot [(\lambda + \lambda^T) \nabla \cdot T]$$

где:

$$\mu^T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\lambda + \lambda^T) = \lambda \left[1 + \left(\frac{\mu^T}{\mu} \right) \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}^T} \right) \right]$$

Уравнения концентрации:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U C_i) = \nabla \cdot [(D_i^f + D^T) \nabla \cdot C_i] + J_i^f$$

где:

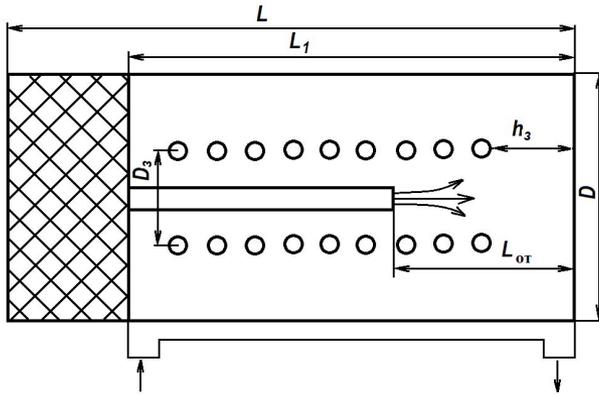
$$D_i^f + D^T = D_i^f \left[1 + \left(\frac{\mu^T}{\mu} \right) \left(\frac{Sc}{Sc^T} \right) \right]$$

Концентрации насыщения

кислорода в натрии:

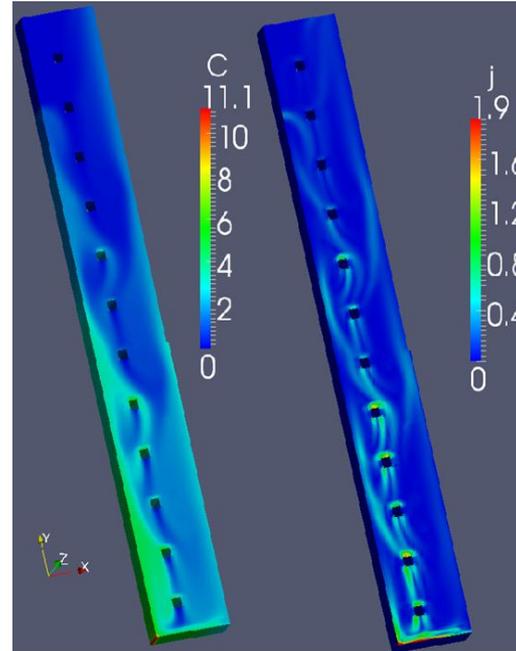
$$\tilde{C}_{\max}^{(T)} = 10^{6,2571 - 2444,5/T}$$

Исследования в обоснование встроенной в бак реактора системы очистки натрия

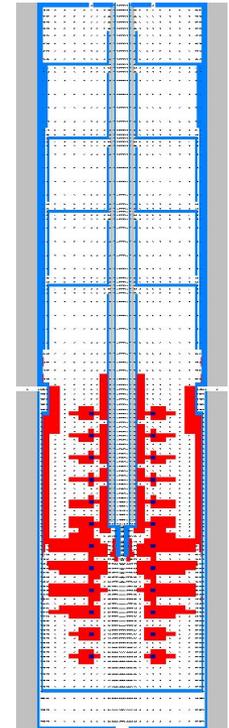


Оптимизация рабочей полости ХФЛ с использованием кода TURBFLOW (Щербаков С.И.)

- 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.

Сравнительный анализ систем холодной очистки

ХЛ вне бака

- Боксы
- Трубопроводы
- Система обогрева линий

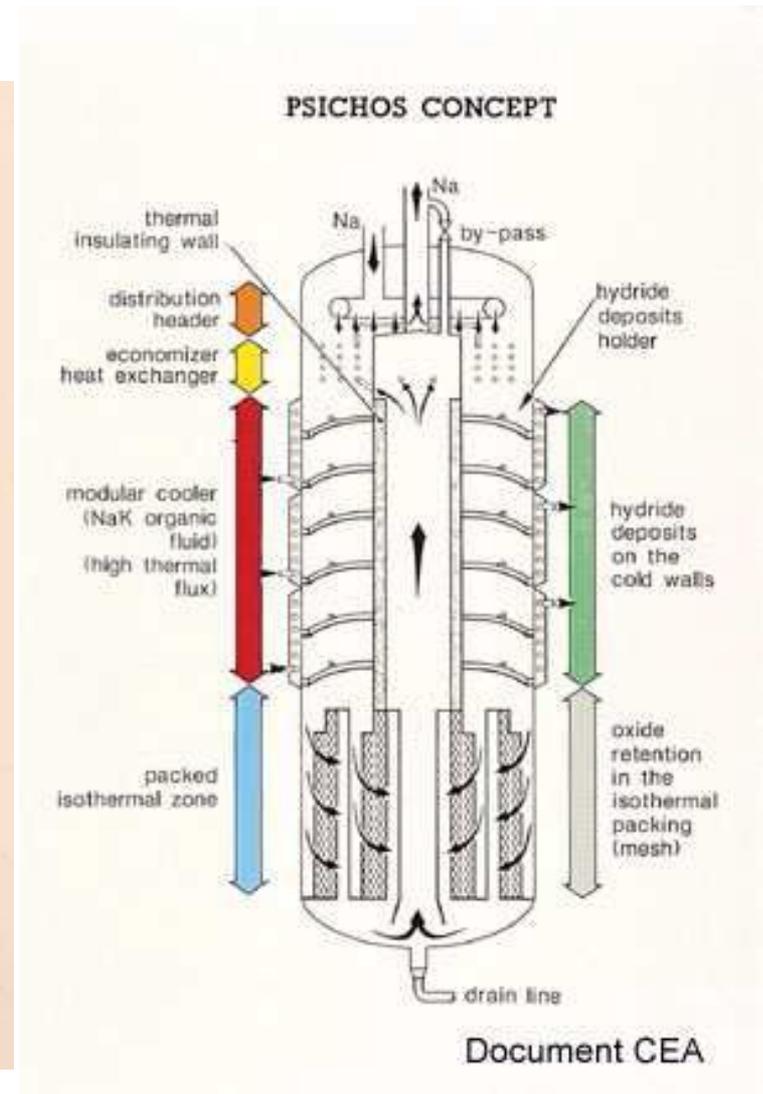
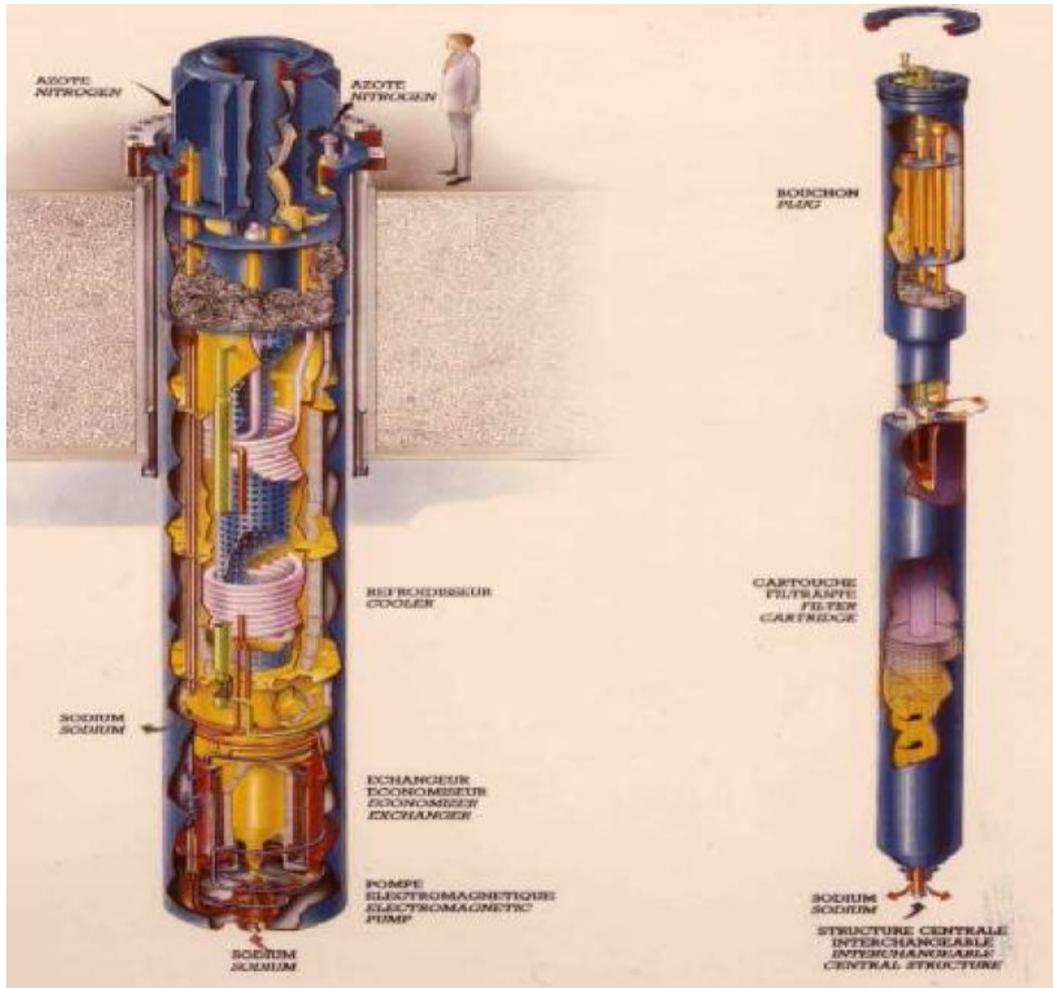
Встроенные ХЛ

- Шахта для хранения отработавших ловушек
- Система перезарядки ловушек
- Дублирование системы охлаждения

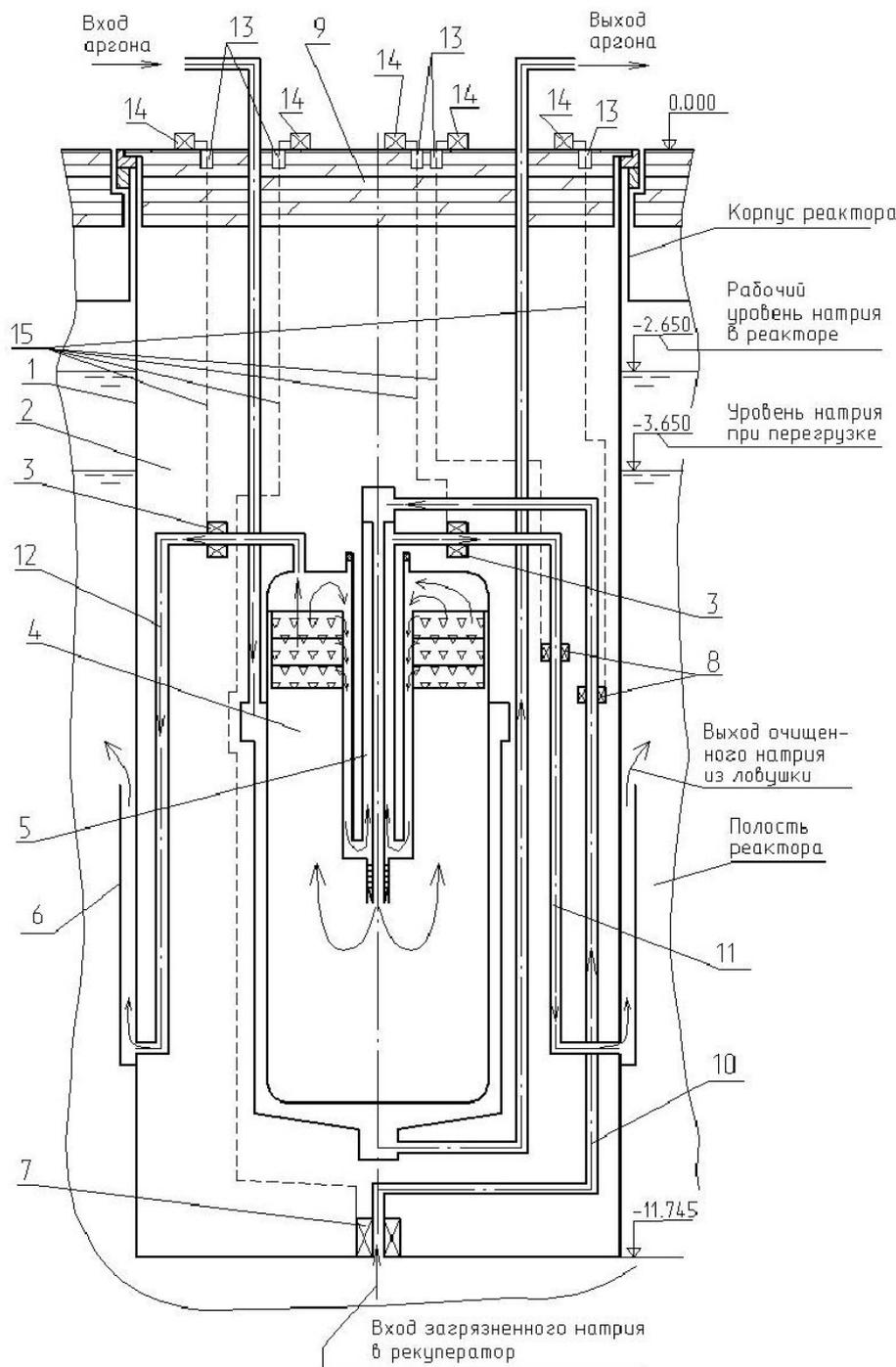
Комбинированная система

- 1 ХЛ крупногабаритная стационарная + 2 ХЛ ограниченной емкости заменяемые

Primary integrated purification system



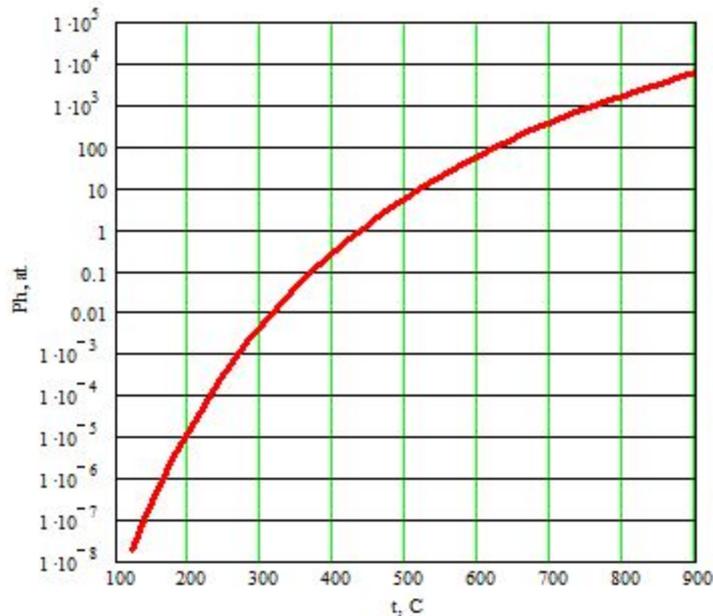
Конструктивная схема встроенной холодной фильтр- ловушки



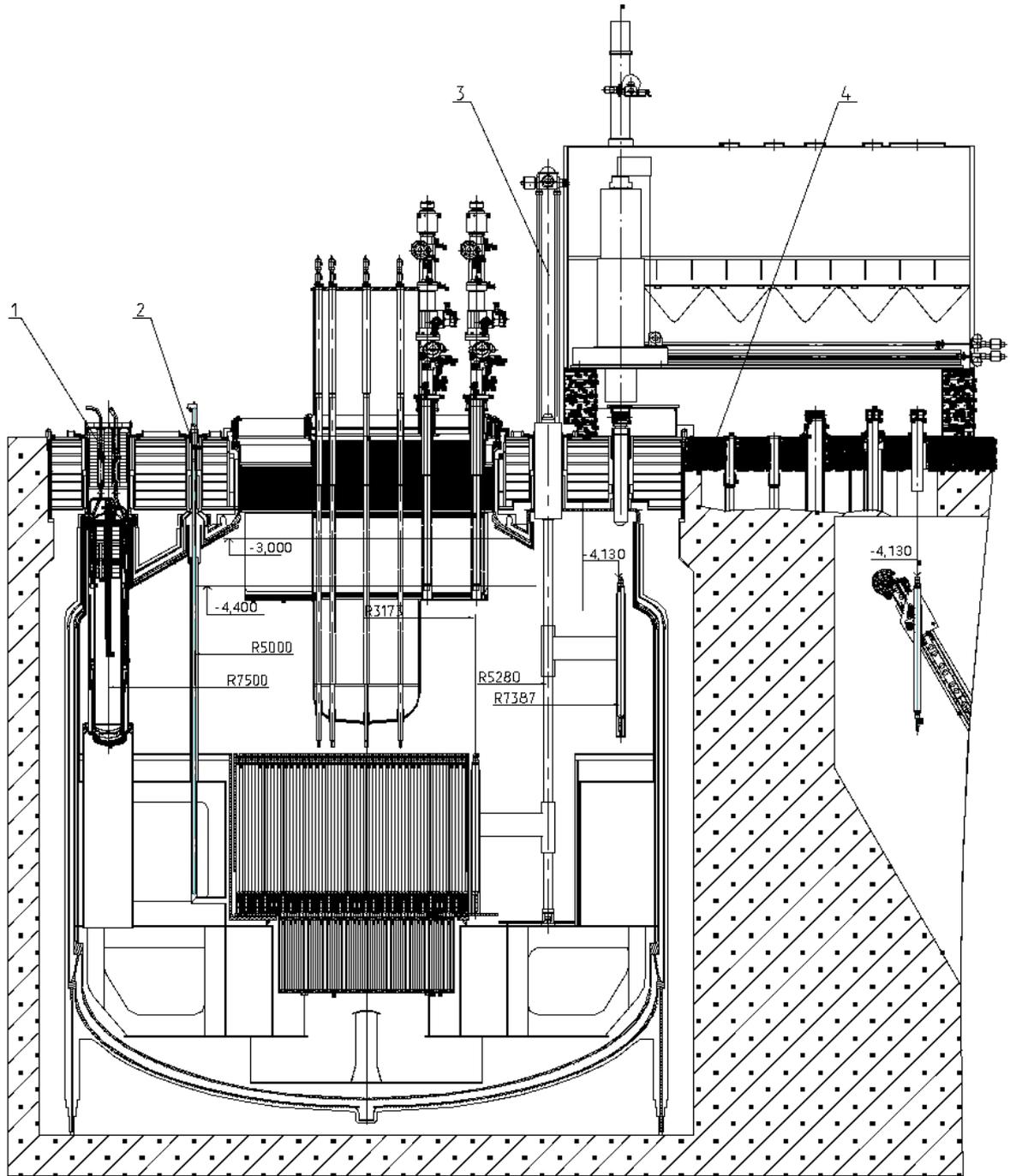
1 – корпус ХФЛ встроенной; 2 – полость, заполненная аргоном; 3 – дроссель электромагнитный; 4 – рабочая полость ХФЛ встроенной; 5 – рекуператор; 6 – подогреватель; 7 – насос электромагнитный; 8 – расходомер электромагнитный; 9 – защита биологическая; 10 – трубопровод подвода загрязненного натрия в рекуператор; 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.

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 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) Должна быть научно обоснована и разработана по существу новая конструкция холодной ловушки.

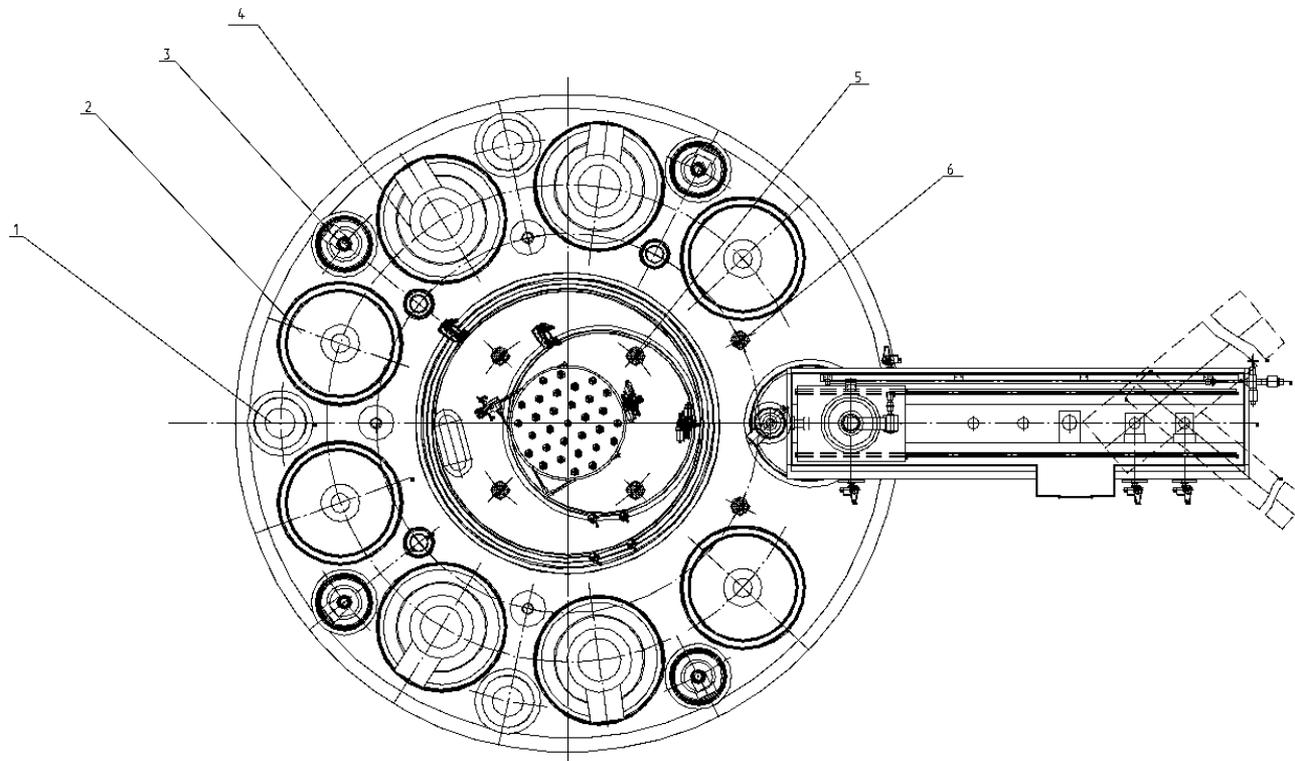


Зависимость равновесного давления водорода над натрием от температуры



Разрез по фильтр – ловушке и элеватору реактора

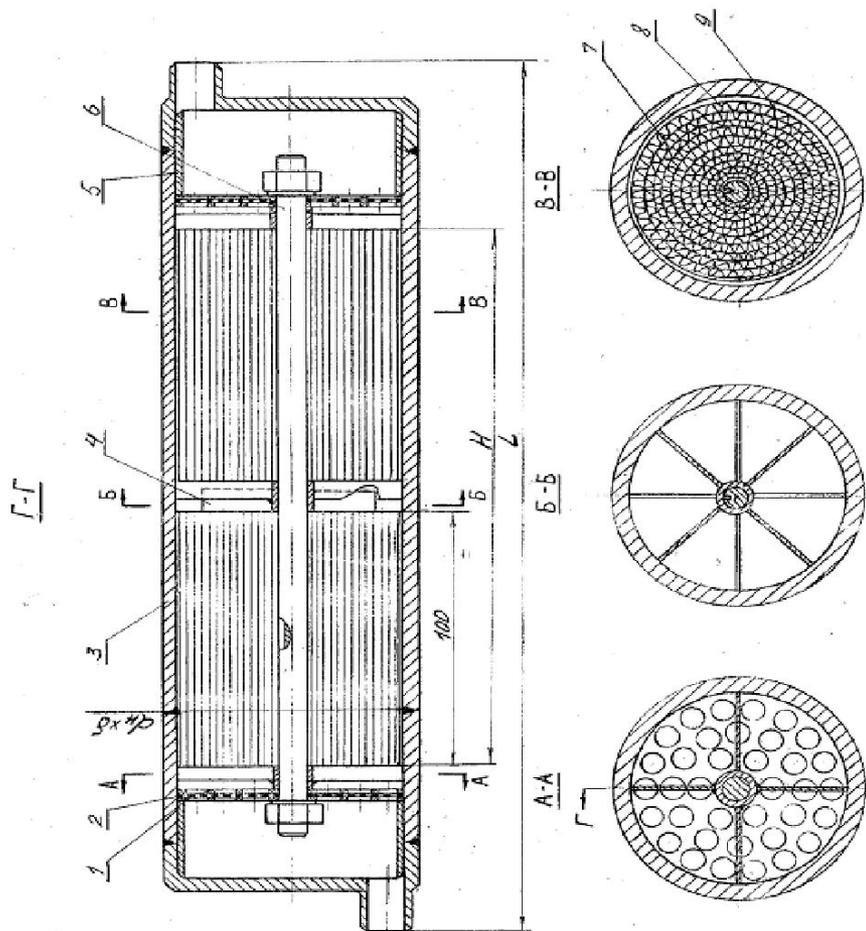
- 1 - Фильтр - ловушка
- 2 - Уровнемер
- 3 - Механизм перегрузки
- 4 - Перегрузочная машина



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

Методы очистки натрия от примесей

Геттерная ловушка



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

Проведение расчетных оценок по горячей очистке натрия от примесей

Привес циркония на единицу поверхности в зависимости от температуры и времени

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

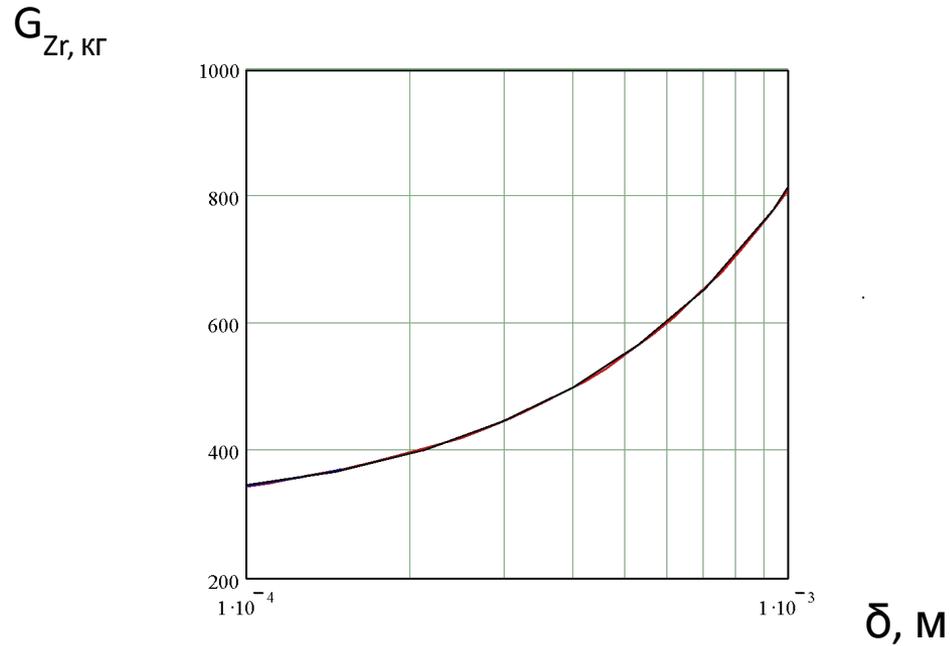
A, B и n – константы

Изменение концентрации кислорода в натрии в течение времени

$$C(\tau) = C_0 - \frac{SK\tau^n}{G_{Na}} + \frac{Q_{O_2}\tau}{G_{Na}}$$

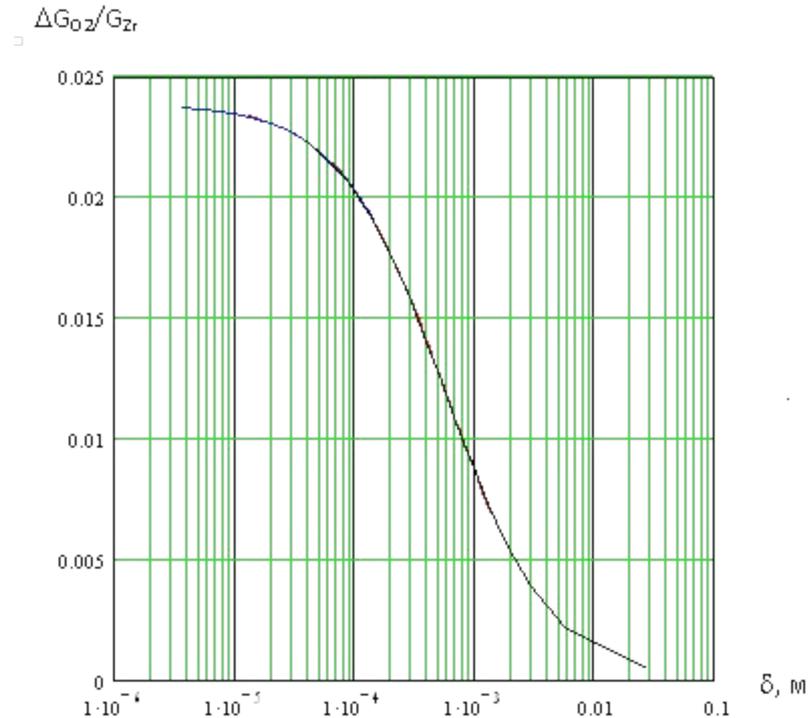
При допустимом привесе геттера в 2 % используется только 6 % циркония. Возможно повышение этого показателя, но для его обоснования необходимо проведение специальных исследований.

Проведение расчетных оценок по горячей очистке натрия от примесей



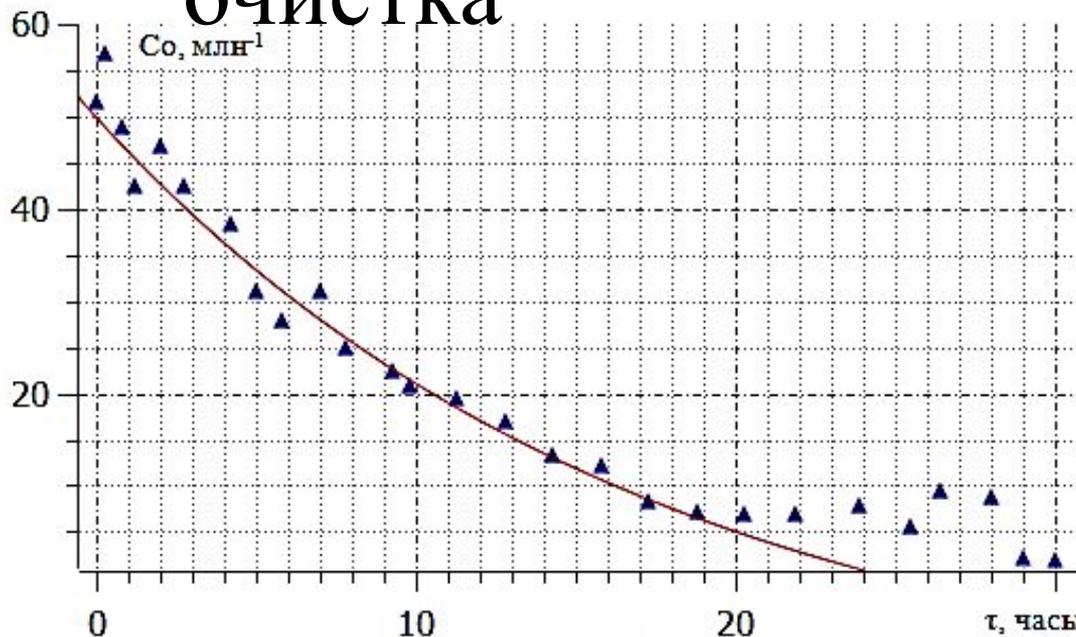
Необходимое количество геттера в зависимости от толщины фольги для очистки от 7 кг/год кислорода в натриевом контуре

Проведение расчетных оценок по горячей очистке натрия от примесей



Отношение привеса циркония к его собственному весу в зависимости от толщины фольги

Геттерная очистка



Изменение концентрации кислорода при $T=550^\circ\text{C}$

Очевидно уменьшение содержания уровня кислорода в натрии стенда «ПРОТВА - 1» при прокачке его через геттер при температуре 550°C : за 20 часов эксперимента он понизился с $\sim 55 \text{ млн}^{-1}$ до 7 млн^{-1} . Уровень кислорода в натрии стенда уменьшился на 48 млн^{-1} .

Всего 6 кг порошка циркония с размером частиц 0,3 мм. Поверхность $\approx 25 \text{ м}^2$

$$C(\tau) = C_0 - \frac{SK\tau^n}{G_{Na}} + \frac{Q_{O_2}\tau}{G_{Na}}$$

Проведение расчетных оценок по горячей очистке натрия от примесей

$$\frac{\Delta G}{S} = A * \exp\left(-\frac{B}{T}\right) * \tau^n$$

$$J = m_{na} * \frac{dc}{d\tau}$$

Поскольку $d\Delta G/d\tau = J$ получим зависимость для концентрации кислорода в натрии:

$$C = C_0 - \frac{S_{zem} * A}{m_{na}} * \exp\left(-\frac{B}{T}\right) * \tau^n + Qu\tau$$

$$S_{zem} = m_{zem} * S_{y\delta} = \frac{6m_{zem}}{\rho_3 d}$$

Масса геттера:

$$m_{zem} = \frac{(C_0 - C) * \rho * d * m_{na}}{6A * \exp\left(-\frac{B}{T}\right) * \tau^n}$$

Оценки для первого контура

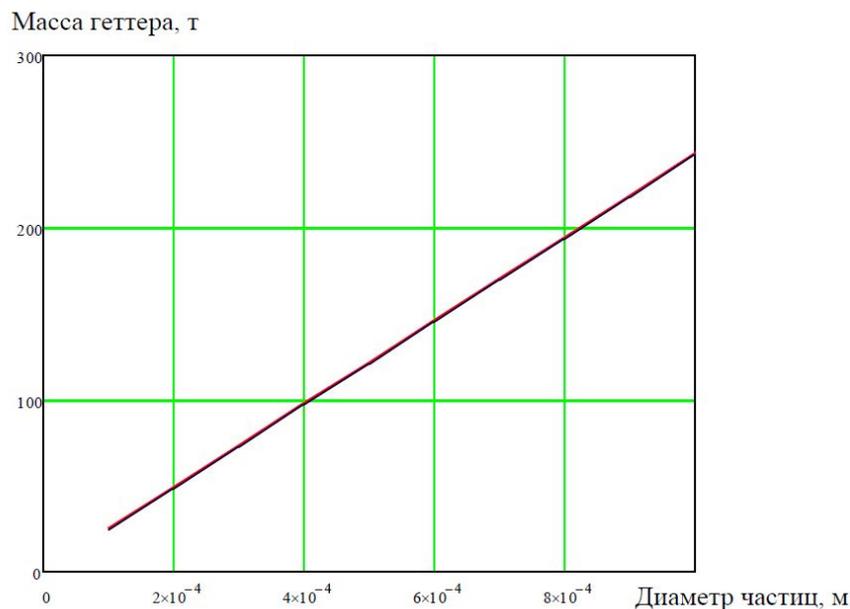


Рисунок 5 – Расход порошка циркония за 60 лет в зависимости от размеров частиц геттера, тонн

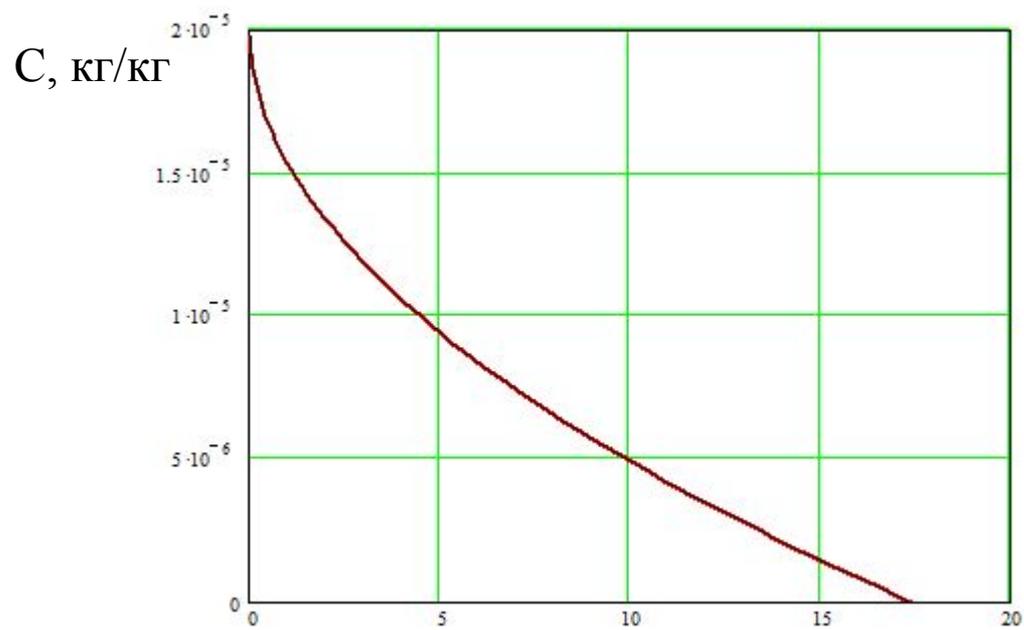
Исходя из того, что за весь срок эксплуатации необходимо вычистить около $m_O = 600$ кг кислорода, с учетом количества натрия в первом контуре получена средняя необходимая скорость очистки натрия $\Delta C = 0,41$ млн⁻¹/мес.

При выборе циркония в виде гранул для эффективного использования необходимо, чтобы привес циркония составлял 2 %. Это выполняется при массе циркония 30 тонн в расчете на 60 лет. Размер частиц должен быть <150 мкм.

Оценки для первого контура

При одновременной работе трех ХЛ для очистки натрия после ППР, перегрузки топлива и от аварийных загрязнений потребуется не менее 1600 часов (67 сут). При этом время очистки натрия от кислорода от концентрации 20 млн^{-1} до 10 млн^{-1} (когда реактор уже можно эксплуатировать) составляет около 500 часов.

Масса геттера – 3000 кг
Размер частиц – 150 мкм
Расход натрия – 3 кг/с

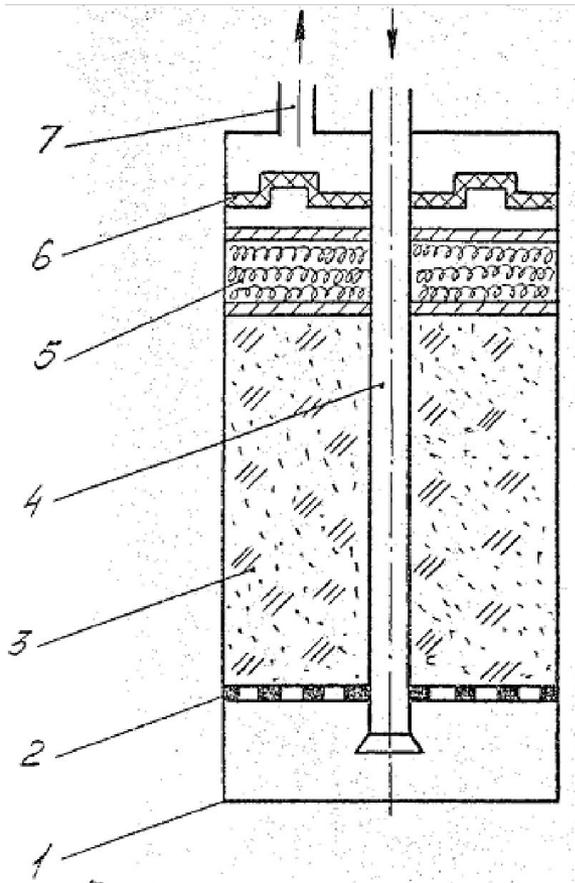


τ , СУТКИ

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