

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ОТ ПРИМЕСЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА И ДРУГИХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

**Ф.А. Козлов*, С.Г. Калякин*, А.П. Сорокин*, В.В. Алексеев*,
А.А. Труфанов*, М.А. Коновалов**, Е.А. Орлова***

**АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

249033 Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1

*** НИЯУ «МИФИ»*

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



Рассмотрены вопросы технологии очистки от примесей высокотемпературного натрия, используемого в качестве теплоносителя в высокотемпературном быстром реакторе (БН-ВТ) 600 МВт (тепл.), предназначенном для производства водорода и других инновационных применений. Анализируется поведение примесей в контурах БН-ВТ, связанное с интенсификацией процессов теплопереноса при высокой температуре, при различных режимах его эксплуатации. Особое внимание уделено очистке натрия в БН-ВТ от водорода, трития и продуктов коррозии. Показано, что очистка натрия от трития до концентраций, обеспечивающих в производимом водороде его предельно допустимую концентрацию, предъявляет более жесткие требования к системе очистки от водорода. Интенсивность поступления продуктов коррозии (ПК) в натрий определяется скоростью коррозии конструктивных материалов. Выполненные расчеты показали, что для первого контура БН-ВТ количество продуктов коррозии, образующихся при концентрации кислорода в натрии 1 млн^{-1} , превышает 900 кг/год, если оболочки твэлов изготовлены из стали ЭП-912-ВД, и 464 кг/год при оболочках из молибденового сплава. Для второго контура количество продуктов коррозии составляет 263 кг/год на каждую петлю. С учетом высокотемпературных опытов, в которых показана высокая эффективность удержания взвешенных продуктов коррозии на фильтрах, установленных в низкотемпературной зоне, предложено охлаждать натрий до необходимой температуры с одновременным удержанием продуктов коррозии на поверхностях массообмена, включая фильтры. Показано, что при использовании 30% мощности для производства водорода с эффективностью 50% БН-ВТ мог бы производить около $0,6 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ водорода в сутки, что достаточно для современного крупного предприятия, перерабатывающего сырую нефть среднего качества, и реализации других технологий.

© *Ф.А. Козлов, С.Г. Калякин, А.П. Сорокин, В.В. Алексеев,
А.А. Труфанов, М.А. Коновалов, Е.А. Орлова, 2016*

Ключевые слова: быстрый реактор, интегральная компоновка, трехконтурная схема, высокотемпературный натрий, примеси, водород, тритий, продукты коррозии, система очистки, безопасность, стали.

ВВЕДЕНИЕ

Концептуальные исследования по выбору облика энергетического высокотемпературного быстрого натриевого реактора (БН-ВТ) для создания крупномасштабной атомно-водородной энергетики показали, что создание такого реактора является реальной технической задачей [1]. На первый план выходит решение вопросов технологического характера, связанных с высоким уровнем температуры в реакторной установке и большими концентрациями водорода на длительные ресурсы: создание технологии натриевого теплоносителя при высоких температурах и концентрациях водорода на длительные ресурсы, обеспечение коррозионной стойкости жаропрочных радиационно стойких высокотемпературных конструкционных материалов при содержании кислорода в натриевом теплоносителе на уровне 0,1 ППМ. Конкретные оценки выполнены для реактора БН-ВТ 600 МВт (тепл.). Рассмотрены вопросы технологии очистки высокотемпературного натрия от примесей, особое внимание уделено проблеме очистки натрия от водорода и трития, а также продуктов коррозии в первом контуре высокотемпературной реакторной установки (РУ), интенсивность источников которых в высокотемпературной РУ для производства водорода возрастает на порядки.

ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В КОНТУРАХ БН-ВТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Теплосъем с использованием в реакторной установке теплоносителя сопровождается его взаимодействием с присутствующими в жидкометаллической системе примесями и негативным их воздействием на конструкционные материалы. Направление этих процессов определяется разностью химических потенциалов [2].

Для реальной неизотермической системы ($dT/dx \neq 0$) для химического потенциала справедливо соотношение

$$\frac{\partial \mu}{\partial x} = \frac{dT}{dx} \left[\left(\frac{d\mu_0(T)}{dT} + R \ln \left(\frac{C}{C_{\text{нас}}} \right) \right) \cdot \frac{1}{dC/dx} + \right. \\ \left. + RT \frac{C_1}{C_{\text{нас}}} \left(C_{\text{нас}} - C \frac{dC_{\text{нас}}/dx}{dC/dx} \right) \right] \frac{dC}{dx} = B \frac{dC}{dx}, \quad (1)$$

если для реальной системы

$$j = -\alpha \cdot d\mu/dx = -\alpha B \mu \cdot dC/dx = -D \cdot dC/dx. \quad (2)$$

Из (1), (2) видно, что перенос компонентов в неизотермической неподвижной системе помимо коэффициента α , характеризующего диффузионные свойства среды, зависит от многих факторов, среди которых растворимость примесей, зависимость химического потенциала от температуры (физико-химические характеристики системы) и градиент температуры, играющих основную роль. При движении жидкости гидродинамические характеристики также будут вносить свой вклад в процессы массопереноса.

С использованием зависимости констант, характеризующих процессы теплопереноса от температуры (формула Аррениуса),

$$k = k_0 \exp\{-E/(RT)\}, \quad (3)$$

(k – константа, характеризующая процесс; k_0 – постоянный множитель; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)); T – абсолют-

ная температура, К) видно, что при рассмотрении конкретных процессов жидкометаллической системы, например, диффузия, проницаемость, растворимость, скорость абсорбции, равновесные давления газов, при переходе к высоким температурам их значение будет возрастать.

Возрастание константы для конкретного из перечисленных выше процессов определяется его энергией активации и ростом температуры. Но $T_2/T_1 \leq 2$, а энергия активации изменяется от сотен до десятков тысяч Дж/(моль·К), и для такой характеристики, как равновесное давление водорода над натрием она практически не зависит от температуры. Наибольшие значения характерны для процессов диффузии, проницаемости в твердых телах и для кинетики скорости процессов абсорбции газов. Для растворимости примесей энергия активации на порядок и более ниже, чем энергия активации для диффузионных процессов. Следует заметить, что для одного и того же процесса энергии активации для различных материалов могут отличаться в несколько раз, в некоторых случаях на порядок.

Качественный анализ поведения примесей в жидкометаллических системах БН-ВТ в различных режимах эксплуатации показывает, что очистка теплоносителя от примесей в режимах приема натрия из транспортных емкостей, пусконаладочных работ (ПНР) и стояночных может производиться в холодных ловушках (ХЛ). В режимах приема натрия из транспортных емкостей и ПНР могут быть использованы обычные схемы подключения ХЛ. В стояночных режимах, если они реализуются после режимов выхода на номинальные параметры и эксплуатации на номинальных параметрах, следует учитывать неизбежное появление радиоактивности в теплоносителе.

В высокотемпературных системах при концентрациях углерода в десятки млн.⁻¹ его термодинамическая активность из-за высокой растворимости в натрии по сравнению с ЯЭУ типа БН-600 возрастает на порядки. Поэтому во избежание науглероживания конструкционных материалов может потребоваться очистка от углерода горячей ловушкой перед выходом на номинальные параметры.

Очистка в режимах эксплуатации на номинальных параметрах и стояночных требовала специального анализа, так как интенсивность источников водорода, трития, продуктов коррозии возрастает на порядки.

ОЧИСТКА НАТРИЯ ОТ ВОДОРОДА И ТРИТИЯ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

Особенность поведения водорода, трития и цезия и очистки от них рассмотрена в [3, 4], поэтому остановимся лишь на основных результатах, полученных для БН-ВТ мощностью 600 МВт.

При возрастании потоков водорода из третьего контура во второй на два – три порядка по сравнению с источниками водорода на АЭС с БН-600 создание компактных систем очистки (СО) с необходимой производительностью возможно при концентрациях водорода десятки миллионов в минус первой степени, так как производительность СОР в первом приближении пропорциональна концентрации водорода в натрии. При этом очистку натрия от водорода и трития следует производить не холодной ловушкой (ХЛ), а вакуумированием их через мембраны из ванадия или ниобия. Сочетание этих двух факторов позволит создать компактные высокоэффективные системы очистки натрия от водорода.

Очистка натрия от трития до концентраций, обеспечивающих в производимом водороде его предельно допустимую концентрацию (ПДК) 3,6 БК/л, предъявляет более жесткие требования к системе очистки от водорода – ее производительность (коэффициент проницаемости, а следовательно, и габариты) необходимо увеличить. При выпол-

нении этих условий для ЯЭУ БН-ВТ основная масса трития, 98%, будет аккумулироваться в компактных системах очистки (СО) натрия второго контура, 0,6% (~ $4 \cdot 10^4$ Бк/с) поступит в окружающую среду, а 1,3% – в производимый продукт. При выбросе в компактных СО ~ $4 \cdot 10^4$ Бк/с требования обеспечения нормальной экологической обстановки, изложенные в [5], могут быть легко удовлетворены использованием методов, широко применяемых сегодня в атомной промышленности.

Поскольку значительная масса трития аккумулируется в компактных СО, при масштабном использовании таких ЯЭУ вопрос о дальнейшей судьбе водорода требует специального рассмотрения.

ПОВЕДЕНИЕ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В УСТАНОВКАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Продукты коррозии при эксплуатации установок постоянно поступают в натрий. Многочисленные исследования коррозии конструкционных материалов приведены в монографиях [6, 7]. Исследования в этой области продолжаются в последние 20 лет (например, [8 – 11]).

Очевидно, что интенсивность поступления продуктов коррозии (ПК) в натрий определяется скоростью коррозии конструкционных материалов. При расчете интенсивности источников ПК для первого и второго контуров БН-ВТ использовали уравнение [12]

$$J_{\text{вх}} = J_0 \cdot C_0^m \cdot f \cdot \exp(-B/T), \quad (4)$$

где J_0 – предэкспоненциальный множитель, кг/м²·с; C_0^m – концентрация кислорода в теплоносителе, млн⁻¹; $f = (w/w_k)^{0,33}$ при скорости потока $w \leq w_k$ и $f = 1$ при $w > w_k$, w_k – предельная скорость теплоносителя, м/с; T – температура, К; $m = 1,2$, $B = 12900$ К – параметры.

При расчете для стали ЭП-912-ВД принималось $J_0 = 7,5 \cdot 10^{-4}$ кг/м²·с, $C_0 = 1$ млн⁻¹, максимальная температура оболочки твэла – 1025°С и учитывалось распределение температур по длине активной зоны промежуточного теплообменника. Результаты оценки интенсивности источников ПК в контурах БН-ВТ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность поступления ПК в натрий первого и второго контуров БН-ВТ при работе на номинальных параметрах, кг/год

Первый контур		Второй контур*)		
Гомогенная система	Гетерогенная система		Гомогенная система	
Все оборудование – ЭП-912-ВД	Твэл – Молибден (Сплавы)	ПТО – ЭП-912-ВД	ПТО – ЭП-912-ВД	ТРУБОПРОВОД – ЭП-912-ВД
900	Пренебрежимо мало	464	662	914
*) На шесть петель второго контура в натрий каждой петли поступает 263 кг/год ПК				

Следует заметить, что в неизотермической системе скорость коррозии в высокотемпературной зоне должна зависеть от разности температур в горячей и холодной зонах контура: с ее уменьшением в высокотемпературной зоне она должна уменьшаться. В уравнении (4) этот эффект не учитывается, поэтому можно утверждать, что приведенные в таблице результаты дают завышенную оценку. В результате оценок, проведенных нами, принято, что количество ПК, поступающих в натрий, уменьшается в шесть раз.

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ НАТРИЯ ОТ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ

Возможные конструкторские решения системы очистки от продуктов коррозии (СОПК). Известно, что эффективность ХЛ при очистке натрия современных АЭС от ПК низкая. Однако специальными опытами было показано, что на сетчатом фильтре, установленном за теплообменником, в котором температура натрия понижалась с 750°C (при этой температуре натрий омывал источник примесей ПК) до 420°C, эффективно удерживаются ПК (рис. 1).



Рис. 1. Фильтр после эксперимента: общее количество отложений – 6,2 г, в том числе на дне фильтра – 5,2 г, на сетке фильтра – 1 г

Причем коэффициент удержания продуктов коррозии по оценкам близок к единице, а доля примесей, осевших на поверхности теплообменной трубки, ~ 3% от количества ПК, найденных в фильтре. Учитывая эти результаты, для разработки СОПК был выбран принцип работы ХЛ: натрий охлаждается до необходимой температуры с последующим удержанием взвесей продуктов коррозии на сетчатых фильтрах.

Будем считать, что СОПК, включенная в комбинированную систему очистки БН-ВТ, конструктивно выполняется из рекуперативного теплообменника (ТО), объединенного с сетчатым фильтром. Для исключения кристаллизации продуктов коррозии в низкотемпературной зоне необходимо, чтобы очистка СОПК обеспечивала концентрацию ПК в потоке $C_{\text{пот}} < C_{\text{ПК}}^{\text{нас}}(T_{\text{мин}} - \Delta T)$. При дальнейших расчетах без оптимизации принято $\Delta T = 30^\circ\text{C}$.

Температурный режим СОПК. В таком устройстве натрий может охлаждаться до 110°C. При этом переход ПК в кристаллическую фазу максимален, но и снимаемая мощность максимальна. С уменьшением теплосъема в СОПК температура на выходе будет повышаться, количество кристаллизующихся в СОПК продуктов коррозии уменьшится, следовательно, уменьшится и производительность СОПК. Этот эффект можно рассчитать по уравнению

$$\beta = (C_{\text{пот}} - C_{\text{нас}}(T)) / (C_{\text{пот}} - C_{\text{нас}}(423 \text{ K})) . \quad (5)$$

При расчетах принято, что растворимость хрома в зависимости от температуры выражается уравнениями:

$$C_{\text{Cr}}^{\text{нас}} = 10^{5,8-5800/T}, \quad (6)$$

$$C_{\text{Cr}}^{\text{нас}} = 10^{9,35-9010/T}, \quad (7)$$

$$C_{\text{Cr}}^{\text{нас}} = \exp(16,2-20746/T) = 10^{7,04-9014/T}. \quad (8)$$

Результаты расчета приведены на рис. 2. Видно, что для $C_{\text{пот}}$ при 775°C (первый контур) более 95% продуктов коррозии должно переходить в кристаллическую фазу

при температуре на выходе из СОПК 575°C. Поэтому при понижении температуры до 100 – 150°C нецелесообразно снимаемая мощность увеличится более чем в три раза, а эффективность очистки возрастет максимум на 5%.

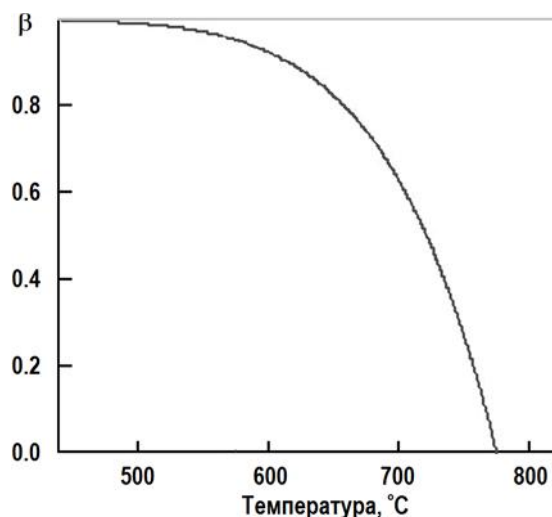


Рис. 2. Эффективность кристаллизации хрома в зависимости от температуры на выходе из СОПК первого контура БН-ВТ

С учетом необходимости включения СОПК в комбинированную СО эта температура была увеличена до 650°C.

Расход натрия через СОПК (Q_{CO}). Если принять, что в СОПК натрий охлаждается до T_K^{min} , то поток ПК в нее (ее производительность) удовлетворяет соотношению

$$J_{ПК} < Q_{CO} [C_{пот} (T_K^{min} - 30) - C'_{CO} (T_{CO}^{min})] \beta. \quad (9)$$

Отсюда расход натрия через СОПК должен быть не менее

$$Q_{CO} \geq J_{ПК} / \{ [C_{пот} (T_K^{min} - 30) - C'_{CO} (T_{CO}^{min})] \beta \}. \quad (10)$$

В расчетах принято, что интенсивность источников в первом и втором контурах равна: для первого контура 151 и 77 кг/год для гомогенной и гетерогенной систем соответственно и 44 кг/год на каждую петлю второго контура. Учитывая, что расчет производился по хрому, принимали, что $J_{ПК} = 5J_{Cr}$. Расчет выполнен для минимальной температуры СОПК 650°C и трех зависимостей растворимости хрома в натрии от температуры (6) – (8). Коэффициент удержания ПК в СОПК принят равным единице. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Необходимый расход через СОПК первого ($C_{пот}^{нас}$ (1043 К)) и второго ($C_{пот}^{нас}$ (1018 К)) контуров

Растворимость хрома	Первый контур	Второй контур
$C_{Cr}^{нас} = 10^{5,8-5800/T}$ (6) *)	2,5	1,1
$C_{Cr}^{нас} = 10^{9,35-9010/T}$ (7)	0,7	0,36
$C_{Cr}^{нас} = 10^{7,04-9014/T}$ (8)	150	77
*) формула (6) получена Е.В. Варсеевым по данным из литературных источников		

Наблюдается расхождение результатов, полученных с использованием данных по растворимости [13, 14] на два порядка. Следует отметить, что при использовании дан-

ных по так называемой «растворимости сталей» [15] расход через СОПК первого контура должен быть равен примерно 104 т/ч. Детальный анализ наших данных, полученных в высокотемпературных опытах, в частности, по коэффициенту удержания ПК на фильтре, говорит о том, что за основу следует принять результаты, полученные с использованием уравнения (6). Проведенные расчеты показывают, что при этом размеры основных компонентов СОПК (рекуперативный теплообменник, сетчатый фильтр) БН-ВТ будут приемлемыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов по предложенной методике расчета массопереноса водорода и трития с учетом в натриевых контурах показано, что КПД такой системы ~ 40%, а объем производимого водорода равен 28 м³/с (при нормальных условиях). Реальная опасность от трития в готовом продукте возникает в случае сгорания водорода в атмосфере. При этом основная масса трития будет присутствовать в виде соединения НТО (водород-третий-кислород). Поэтому при расчетах параметров системы очистки и рабочих концентраций водорода и трития в натрии второго контура, согласно НРБ-99/2009, было принято, что предельно допустимая концентрация трития в производимом водороде не должна превышать 3,26 Бк/л. Значения предельно допустимой концентрации трития в воздухе почти на три порядка выше – 2,44·10³ Бк/л. Очистка натрия от трития предъявляет дополнительные требования к системе очистки от водорода – коэффициент проницаемости системы очистки второго контура по тритию должен превышать 140 кг/с.

Для первого контура БН-ВТ количество продуктов коррозии, образующихся при концентрациях кислорода в натрии, равных 1 млн⁻¹, превышает 900 кг/год, когда оболочки твэлов изготовлены из стали ЭП-912-ВД, и 464 кг/год – из молибденового сплава; для второго контура это 263 кг/год на каждую петлю. С учетом результатов высокотемпературных опытов (температура 900 и 750°С), в которых показана высокая эффективность удержания взвесей ПК на фильтрах (коэффициент удержания близок к единице), установленных в низкотемпературной зоне, предложено охлаждать натрий до необходимой температуры с одновременным удержанием ПК на поверхностях массообмена, включая фильтры.

Реактор типа БН-ВТ с тепловой мощностью 600 МВт при использовании 30% мощности для производства водорода с эффективностью 50% мог бы производить около 0,6·10⁶ л водорода в сутки, что достаточно для современного крупного предприятия, перерабатывающего сырую нефть среднего качества и других технологий.

Литература

1. Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Богословская Г.П., Иванов А.П., Коновалов М.А., Морозов А.В., Стогов В.Ю. Нейтронно-физические и теплофизические исследования в обоснование высокотемпературной ядерной энерготехнологии с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для производства водорода // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – №3. – С. 104-115.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959.
3. Kozlov F.A., Sorokin A.P., Alekseev V.V. The High Temperature Sodium Coolant Technology in Nuclear Power Installations for Hydrogen Power Engineering // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61. – No. 5. – PP. 348-356.
4. Козлов Ф.А., Коновалов М.А., Сорокин А.П., Алексеев В.В. Особенности массопереноса трития в высокотемпературной ЯЭУ с натриевым теплоносителем для производства водорода / Сборник тезисов докладов конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2013)», г. Обнинск, 30 октября – 1 ноября 2013 г. – Обнинск: ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2013. – С. 197-198.
5. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

6. Невзоров Б.А., Зотов В.В., Иванов В.А., Старков О.В., Краев Н.Д., Умняшкин Е.Б., Соловьев В.А. Коррозия конструкционных материалов в жидких щелочных металлах. – М.: Атомиздат, 1977.

7. Бескоровайный Н.М., Иолтуховский А.Г. Конструкционные материалы и жидкометаллические теплоносители. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

8. Краев Н.Д. Коррозия и массоперенос конструкционных материалов в натриевом и натрий-калиевом теплоносителях // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – №3. – С. 40-48.

9. Zhang J., Marcille T.F., Kapernick R. Theoretical Analysis of Corrosion by Liquid Sodium and Sodium-Potassium Alloys // Corrosion. – 2008. – Vol. 64. – No. 7. – PP. 563-573.

10. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Загоруйко Ю.И. Исследование массопереноса никеля и хрома в неизотермическом участке циркуляционного натриевого контура: Препринт ФЭИ-2666. – Обнинск: ФЭИ, 1997.

11. Thorley A.W. Mass Transfer Behavior of SS in Flowing Sodium Environment at Different Oxygen Levels / 4-th Int. Conf. on liquid metal engineering and technology. – Avignon, France, 1988.

12. Краев Н.Д., Умняшкин Е.Б., Старков О.В. Влияние физико-химических параметров на скорость массопереноса в жидких щелочных металлах. – Обзорная информация. ОБ-122. – Обнинск: ФЭИ, 1981.

13. Singer R.M., Fleitman A.H., Weeks J.A., Isaacs H.S. Corrosion by Liquid Metals. – Eds. J.E. Draley, J.R. Weeks. – New-York: Plenum Press, 1970.

14. Алексеев В.В. Массоперенос трития и продуктов коррозии конструкционных материалов в контурах с натриевым теплоносителем: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2002.

15. Schad M. Zur Korrosion von Austenitischen Stählen in Natrium-Kreislaufen. KfK 2582 – Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau. – Karlsruhe: KfK GMBH. – 1978. – P. 118. URL: <http://bibliothek.fzk.de/zb/kfk-berichte/KfK2582.pdf>.

Поступила в редакцию 18.08.2016 г.

Авторы

Козлов Федор Алексеевич, советник директора Отделения безопасности ядерно-энергетических установок, д-р техн. наук, профессор,
E-mail: kozlov@ippe.ru

Калякин Сергей Георгиевич, д-р техн. наук.

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора Отделения безопасности ядерно-энергетических установок, доктор техн. наук
E-mail: sorokin@ippe.ru

Алексеев Виктор Васильевич, главный научный сотрудник, Отделение безопасности ядерно-энергетических установок, д-р техн. наук
E-mail: alexeev@ippe.ru

Труфанов Александр Анатольевич, заместитель генерального директора, директор Отделения безопасности ядерно-энергетических установок
тел.: (484) 399-83-63, e-mail: tral@ippe.ru

Коновалов Михаил Александрович, аспирант НИЯУ «МИФИ»
E-mail: kozlov@ippe.ru

Орлова Екатерина Андреевна, ведущий научный сотрудник Отделения безопасности ядерно-энергетических установок, канд. техн. наук
E-mail: eorlova@ippe.ru

FEATURES OF TECHNOLOGY OF PURIFICATION FROM IMPURITIES OF HIGH-TEMPERATURE SODIUM COOLANT IN A FAST REACTOR FOR HYDROGEN PRODUCTION AND OTHER INNOVATIVE APPLICATIONS

Kozlov F.A.*, Kalyakin S.G.*, Sorokin A.P.*, Alekseev V.V.*, Trufanov A.A.*,
Konovalov M.A.**, Orlova E.A.*

*JSC «State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

** NRNU «MEPhI»,

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

When creating large-scale atomic-hydrogen energy the most important becomes the decision of questions of technological character, associated with high temperature level in the reactor facility (900°C) and large concentrations of hydrogen on long-lasting resources available: the establishment of technology of sodium coolant at high temperatures and concentration range of hydrogen for a long resources, provide corrosion resistance high-temperature radiation-resistant high-temperature structural materials in the oxygen content in the sodium coolant at the level of 0.1 PPM. The paper considers the issues of technology of purification from impurities high temperature of sodium used as a coolant in high-temperature fast reactor (BN-HT) 600 MW (th), earmarked for the production of hydrogen and other innovative applications. Examines the behavior of impurities in the circuits of BN-HT associated with the intensification of the processes of heat and mass transfer at high temperature (regularity of Arrhenius), with different regimes of operation. Special attention is paid to the purification of sodium in the BN-HT of hydrogen and tritium and corrosion products. Cleaning of sodium from the hydrogen and tritium with the use of vacuum distillation through the membrane of vanadium or niobium will allow you to create compact, highly efficient effective cleaning systems sodium from the hydrogen. It is shown that the clearance of sodium from tritium concentrations, which are produced by the hydrogen its maximum allowable concentration (3,6 Bq/l according to NRB-99/2009), imposes more stringent requirements for the purification system from the hydrogen permeability coefficient of the cleaning system of the second contour from tritium to exceed 140 kg/s. When performing these conditions for BN-HT foundations of probability mass of tritium, 98%, will be accumulated in a compact purification system sodium loop of the second contour, 0,6% ($\sim 4 \cdot 10^4$ Bq/s) will be released to the environment, and 1.3% – in the produced product (hydrogen). Intensity of inflow of corrosion products (PC) in the sodium determination is the rate of corrosion of structural materials in high temperature sodium flows a significant amount of corrosion products. The calculations showed that for the first circuit of BN-HT quantity of corrosion products generated in the oxygen concentration in sodium of 1 million⁻¹, more than 900 kg/year, if shell fuel rods made of steel EP-912-VD, and 464 kg/year, with shells made of molybdenum alloy. For the second circuit, the quantity of corrosion products is 263 kg/year for each loop. Given the high temperature experiments which illustrate the high effectiveness of the holding of suspensions of corrosion products on the filters in the low-temperature area proposed to cool the sodium to the required temperature with simultaneous retaining of corrosion products on the surfaces of the mass transfer, including filters. It is shown that at use 30% of capacity for the production of

hydrogen with 50% efficiency of BN-HT could produce about $0.6 \cdot 10^6$ m³ of hydrogen per day, enough for a big modern, the refinery crude oil of average quality, and the implementation of other technologies.

Keywords: fast reactor, integral arrangement, a three-loop diagram, high temperature, sodium, impurities, hydrogen, corrosion products, system cleaning, security, steel.

REFERENCES

1. Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Sorokin A.P., Bogoslovskaya G.P., Ivanov A.P., Konovalov M.A., Morozov A.V., Stogov V.Yu. Issledovaniy v obosnovanie vysokotemperaturnoi jadernoi energotekhnologii s reaktorom na bistrix neitronax s natrievim teplonositelem dlaj proizvodstva vodoroda [Investigations in a substantiation of high temperature nuclear energy technology with fast neutron reactor cooled by sodium for hydrogen production]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2016, no. 3, pp. 104-115 (in Russian).
2. Levich V.G. Fiziko-himicheskaja gidrodinamika [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow. Fizmatgiz Publ., 1959 (in Russian).
3. Kozlov F.A., Sorokin A.P., Alekseev V.V. The High Temperature Sodium Coolant Technology in Nuclear Power Installations for Hydrogen Power Engineering. *Thermal Engineering*, 2014, v. 61, no. 5, pp. 348-356.
4. Kozlov F.A., Konovalov M.A., Sorokin A.P., Alexeev V.V. Osobennosti massoperenosa tritiya v vysokotemperaturnoj YaEU s natrievim teplonositelem dlya proizvodstva vodoroda. Sbornik tezisov dokladov konferentsii «Teplofizika reaktorov na bystryh nejtronah (Teplofizika-2013)» [Features of tritium mass transfer in high-temperature NPP with the sodium coolant for hydrogen production]. Proceedings of conference «Thermal physics of fast reactors (Thermal physics-2013)», Obninsk, October, 30th – November, 1st, 2013. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2013, pp. 197-198 (in Russian).
5. Belovodskij L.F., Gaevoj V.K., Grishmanovskij V.I. Tritij [Tritium]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1985 (in Russian).
6. Nevzorov B.A., Zotov V.V., Ivanov V.A., Starkov O.V., Kraev N.D., Umnjashkin E.B., Solovjev V.A. Korroziya konstruksionnyh materialov v zhidkix shelochnyh metallah [Corrosion of structural materials in liquid alkali metals]. Moscow. Atomizdat Publ., 1977 (in Russian).
7. Beskorovajnyj N.M., Ioltuhovskij A.G. Konstruksionnye materialy i zhidkometallicheskie teplonositeli [Structural material and liquid metal coolants]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983 (in Russian).
8. Kraev N.D. Korroziya i massoperenos konstruksionnyh materialov v natrievom i natrij-kalievom teplonositelyah [Corrosion and mass transfer of structural materials in the sodium and sodium-potassium coolants]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 1999, no. 3, pp. 40-48 (in Russian).
9. Zhang J., Marcille T.F., Kapernick R. Theoretical Analysis of Corrosion by Liquid Sodium and Sodium-Potassium Alloys. *Corrosion*. 2008, v. 64, no. 7, pp. 563-573.
10. Alekseev V.V., Kozlov F.A., Zagorulko Yu.I. Issledovanie massoperenosa nikelya i hroma v neizotermicheskom uchastke tsirkulyatsionnogo natrievogo kontura [Research mass transfer of nickel and chromium in not isothermal section of a circulating sodium contour]: Preprint IPPE-2666. Obninsk. IPPE Publ., 1997 (in Russian).
11. Thorley A.W. Mass Transfer Behavior of SS in Flowing Sodium Environment at Different Oxygen Levels. 4-th Int. Conf. on liquid metal engineering and technology. Avignon, France, 1988.
12. Kraev N.D., Umnjashkin E.B., Starkov O.V. Vliyanie fiziko-himicheskikh parametrov na skorost' massoperenosa v zhidkix shelochnyh metallah [Influence of physical and chemical parameters on mass transfer velocity in liquid alkali metals]. Review information. OB-122. Obninsk. IPPE Publ., 1981 (in Russian).
13. Singer R.M., Fleitman A.H., Weeks J.A., Issaacs H.S. Corrosion by Liquid Metals. Eds. J.E. Draley, J.R. Weeks. New-York: Plemun Press, 1970.
14. Alekseev V.V. Massoperenos i tritiya produktov korrozii konstruksionnyh materialov v konturah s natrievim teplonositelem: Dissertatsiya na soiskanie uchyonoj stepeni doktora tehnikeskikh nauk [Mass transfer tritium and corrosion products of structural materials in contours with the sodium coolant. The dissertation on competition of a scientific degree of a

Dr. Sci. (Engineering). Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2002 (in Russian).

15. Schad M. Zur Korrosion von Austenitischen Stählen in Natrium-Kreislaufen. KfK 2582. Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau. Karlsruhe. KfK GMBH. 1978, 118 p. Available at: <http://bibliothek.fzk.de/zb/kfk-berichte/KfK2582.pdf>.

Authors

Kozlov Feodor Alekseevich, Advisor Director of Department, Professor,

Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kozlov@ippe.ru

Kalyakin Sergey Georgievich, Dr. Sci. (Engineering)

Sorokin Aleksandr Pavlovich, Deputy Director of Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sorokin@ippe.ru

Alekseev Victor Vasilievich, Main Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: alexeev@ippe.ru

Trufanov Aleksandr Anatolievich, Deputy Director General, Director of Department

E-mail: tral@ippe.ru

Konovlov Mikhail Aleksandrovich, PhD Student

E-mail: kozlov@ippe.ru

Orlova Ekaterina Andreevna, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: eorlova@ippe.ru