Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий

Кафедра физических проблем материаловедения

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**к курсовому проекту по дисциплине**

**"Физическое материаловедение"**

**на тему:**

**«РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА АНТИДЕБРИЗНОГО ФИЛЬТРА РЕАКТОРА**

**ВВЭР-100»**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вариант № 7 |  |  | Группа Б16-103 |
| Выполнил студент |  |  | А. В. Хафизов |
| Научный руководитель | (подпись) |  | М.Г. Исаенкова |
| профессор  Преподаватель | (подпись) |  | А.Н. Сучков |
| доцент, к. т. н  Эксперт-метролог | (подпись) |  | Я.А. Бабич |
| инженер  Консультанты | (подпись) |  | А.Н. Сучков |
| доцент, к. т. н  профессор, д. ф-м. н. | (подпись) |  | В.Л. Якушин |
| доцент, к. т. н | (подпись) |  | А.В. Шульга |
| Заведующий кафедрой  профессор, д. ф-м. н. | (подпись) |  | Б.А. Калин |

(подпись)

Москва 2019 г.

**Введение**

Водо-водяной реактор ВВЭР является в настоящее время одной из самых распространенных ядерных энергетических установок во всем мире. ВВЭР имеет двухконтурную схему, где жидкость первого контура является теплоносителем тепловыделяющей сборки ТВС, а второй – содержит воду, пары которой непосредственно воздействуют на турбину. Со временем, под действием агрессивной среды, происходит эрозия металла и продуктов его коррозии с поверхности первого контура, что приводит к загрязнению воду в этом контуре. Эти загрязняющие вещества многократно циркулируют через ТВС и могут привести к засорению каналов, а также к повреждению поверхности ТВЭЛов.

Антидебризный фильтр является конструктивным элементом, который осуществляет фильтрацию жидкости теплоносителя от загрязнений. Очевидно, что материал фильтра должен иметь высокую коррозионную и радиационную стойкость в условиях жесткого нейтронного облучения, поэтому для эксплуатации данного элемента реактора необходим подбор оптимального состава материала с учетом всех эксплуатационных (высокой температуры, большого флюэнса облучения) и технологических требований (изготовление, способ крепления к ТВС).

**Целью работы является:** разработка материала антидебризного фильтра для ВВЭР-1000.

# **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ПРОЕКТУ**

## **Условия работы материала**

Для выполнения курсового проекта в рамках дисциплины «Физическое материаловедение», было получено задание, представленное в таблице 1.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант№ | Материал | Конструктивный элемент | Условия работы материала | | | | |
| Т,  °С | σр,  МПа | Среда | Флюенс нейтронов  1022н./см2 | Средняя энергия нейтронов  Е1, МэВ |
| 7 | Fe-Cr-Ni | Антидебризный фильтр | 320 | 190 | H2O | 7 | 1,9 |

Таблица 1.1 – Условия работы антидебризного фильтра

## **Описание конструктивного элемента**

Антидибризный фильтр (АДФ) служит для уменьшения числа отказов тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторных установок из-за повреждения оболочек тепловыделяющих элементов (твэл) присутствующими в теплоносителе посторонними частицами (дебризом).

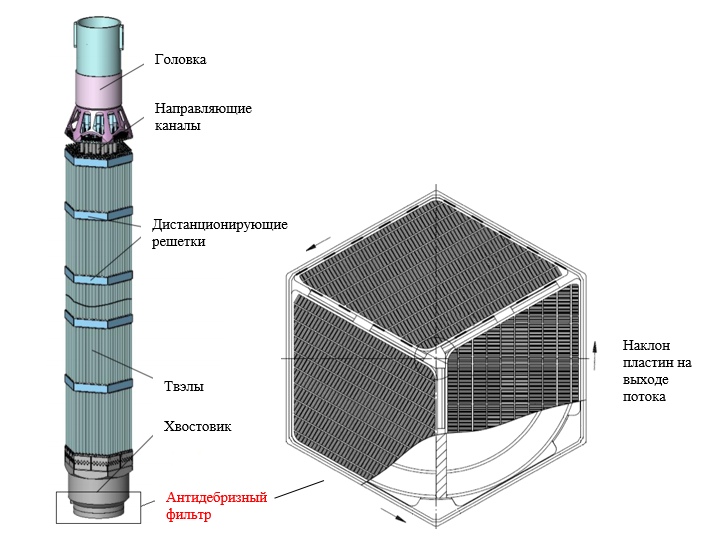
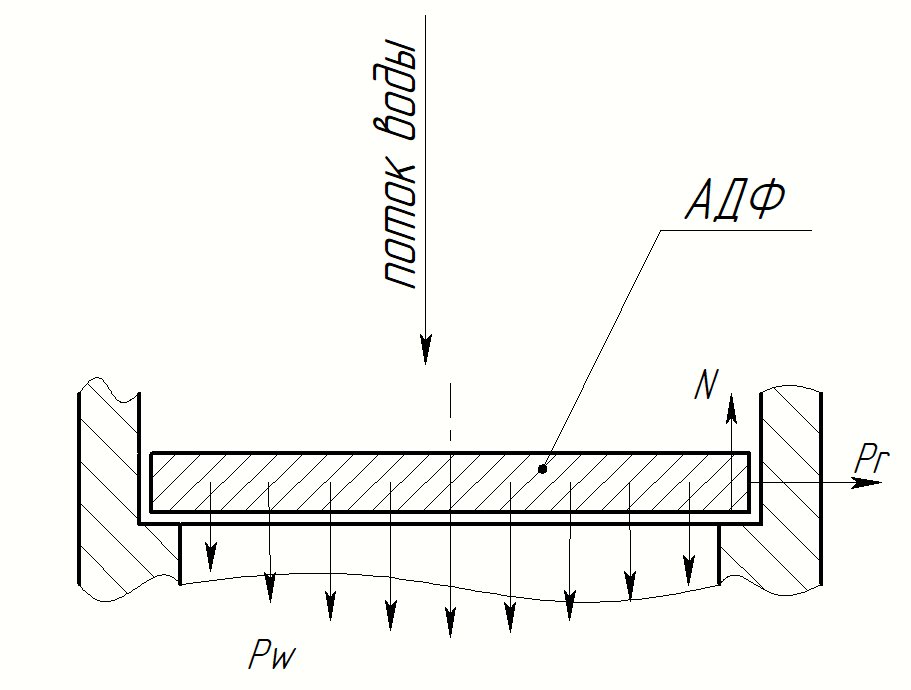


Рисунок 1.1 – Схема ТВС активной зоны ВВЭР-1000

АДФ выполняют из нескольких фильтрующих элементов пластинчатой конструкции с пазами для протока теплоносителя в форме вытянутых прямоугольников, наклоненных к оси ТВС в одной из двух взаимно перпендикулярных плоскостей под определенным углом, обеспечивающим отсутствие просвета фильтрующего элемента в направлении, параллельном оси тепловыделяющей сборки. На рисунке 1.1 изображена тепловыделяющая сборка ВВЭР-1000 и расположение в ней АДФ.

При эксплуатации АДФ испытывает на себе гидродинамическое давление в следствии циркуляции воды, а также соударения с дебриз-частицами. Также, учитвая что элемент находится под высоким радиационным облучением, возможна его деформация – распухание, которое будет являться причиной давления на стенки элементов трубопровода. Распределение действующих сил на антидебризный представлено на рисунке 1.2.



Pw – гидродинамическое давление создаваемое потоком воды, содержащим дебриз элементы; N – реакция опоры узла трубопровода; Pr – давление на узел трубопровода в следствие распухания материала

Рисунок 1.2 – Распределение давлений, действующих на элемент АДФ

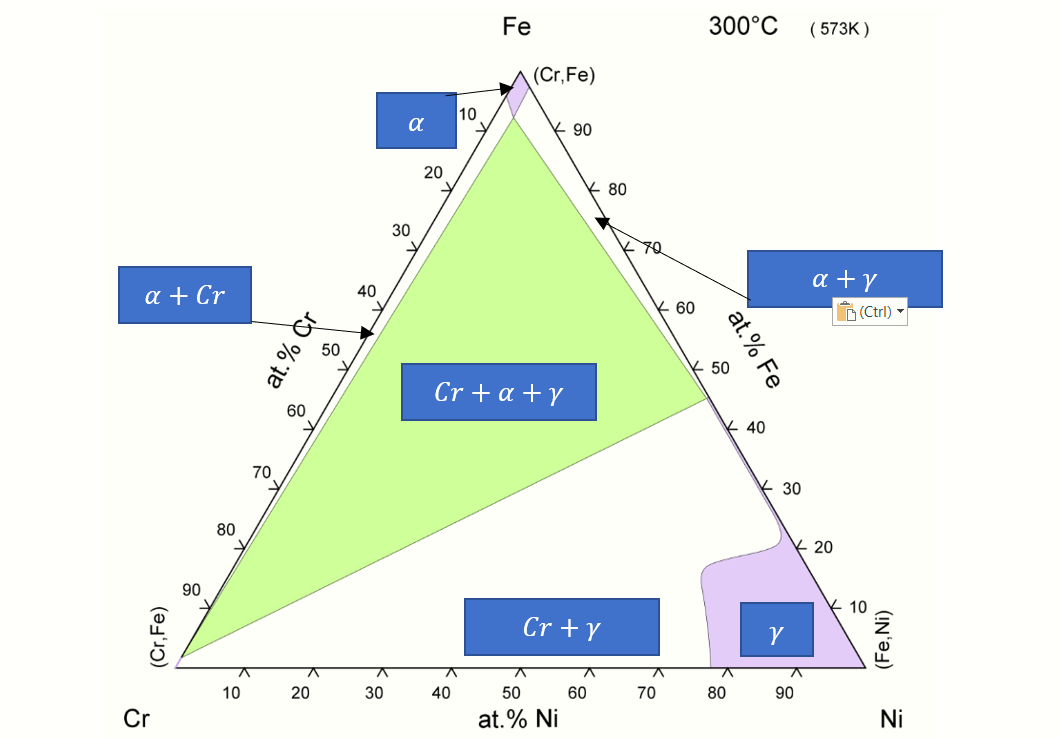
* 1. **Характеристика основы**

Главным компонентом основы разрабатываемого материала является железо. Железо – химический элемент четвертого периода и побочной подгруппы VIII группы периодической системы. Атом железа содержит восемь валентных электронов, однако в соединениях железо обычно проявляет степени окисления (+2) и (+3), редко – (+6).

Железо – серебристо-белый, ковкий и пластичный тугоплавкий (т. пл. 1535°C, т. кип. 2870°C) металл, при температурах ниже 769°C обладает ферромагнетизмом. Материал существует в форме нескольких полиморфных (аллотропных) модификаций. При температурах ниже устойчиво железо с объемно-центрированной кристаллической решеткой - феррит (-Fe), в интервале температур – более плотная модификация аустенита с кубической гранецентрированной (), а выше этой температуры и вплоть до температуры плавления вновь становится устойчивой структура с объемно-центрированной ячейкой (δ-Fe).

Чистый никель – это пластичный, ковкий, химически малоактивный переходной металл серебристо-белого цвета. Этот металл имеет ГЦК структуру с параметром решетки a=3,524 Å и обладает ферромагнитными свойствами с точкой Кюри 358℃. Температура плавления никеля – 1453℃. Никель – довольно распространенный материал в природе, его содержание в земной коре составляет около 0.01 мас. %, однако в связи с трудностью технологии его получения, данный материал не является дешевым. Данный элемент широко используется в качестве легирующего в коррозионностойких сталях (68%), цветных сплавах (10%), а также при гальванизации изделий (9%) [1].

Хром является тяжелым тугоплавким металлом с температурой плавления 1875 ℃. Чистый хром пластичен, однако даже незначительные примеси кислорода и азота делают его хрупким и твердым материалом, имеющим низкую ударную вязкость. Хром так же, как и никель является элементом, использующимся для повышения коррозионной стойкость железа [2], но при этом является дешевым материалом. Хром имеет ОЦК структуру с параметром решетки a=2.885 Å.



– феррит; – аустенит

Рисунок 1.3 – Сечение тройной диаграммы состояния Fe-Cr-Ni при температуре 300 ℃[3]

Влияние хрома и никеля на структуру железа позволяет получать стали и сплавы различных классов. Хром оказывает влияние на коррозийную стойкость: наличие этого элемента более 12-13% увеличивает коррозийную стойкость железа. Никель, в свою очередь является аустенизатором железа, которое является причиной усиление прочностных свойств сплава.

Сплавы Fe-Cr-Ni является достаточно хорошо изученным. Для предполагаемой температуры использования (T=320°С), наиболее близким является сечение при 300°С, которое представлено на рисунке 1.3.

Из рисунка 1.3 видно, что никель является аустенито-стабилизирующим химическим элементом, что является причиной повышения прочностных свойств сплавов. Никель также является компонентом сплава, который наиболее сильно снижает температуру хладноломкости Tхл (в небольших концентрациях) и увеличивает ударную вязкость, противодействия распространению трещин в сплавах железа [4], при этом, не ухудшая их технологичность. В больших концентрациях (более 3%), Ni приводит к негативным эффектам: снижению Tхл и к повышению хрупкости.

Зависимость прочностных характеристик от концентрации аустенитообразующих элементов представлена на рисунке 1.4. Из данного графика видно, что присутствие никеля в пределах от 2% достаточно для достижения максимальной твердости материала и дальнейшие добавки нецелесообразны в виду высокой стоимости никеля.

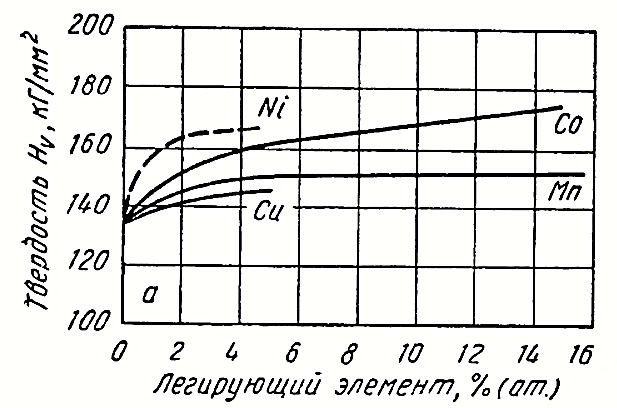


Рисунок 1.4 – Влияние аустенитообразующих элементов на твердость никеля [5]

Хром является феррито-стабилизирующим (зона на рисунке 1.3) элементом из-за изоморфности структур чистого Cr и и близких значениях параметров их кристаллических решеток. Сплавы, содержащие более 13 % хрома, называются сталями ферритного класса, которые заметно уступают аустенитным сплавам в прочностных характеристиках при высокой температуре [4]. Также, следует отметить, что стали с содержанием более 17% склонны к образованию грубой зернистой структуры при сварке, которая не устраняется термической обработкой. Это заметно ухудшает технологические свойства изделий.

Влияние количества хрома на прочностные характеристики сплавов представлено на рисунке 1.5 (а). Из данных зависимостей видно, что количество хрома прямо пропорционально увеличению предела прочности, твердости и обратно пропорционально пластичности. При наличии хрома более 15 % происходит переход сталей, закаливающихся на мартенсит, к ферритным и происходит изменение физических свойств, о чем свидетельствует разрыв кривых на графике.

На рисунке 1.5 (б) видно, что максимум ударной вязкости приходится на 25% хрома, и дальнейшее увеличение добавки этого компонента приводит к охрупчиванию. При наличии хрома от 10%, ударная вязкость отличается не более чем на 10% от максимального значения. Учитывая этот факт, а также то, что феррит обладает низкой жаропрочностью, оптимальным, с точки зрения механических характеристик, количеством хрома в нашем материале будет являться значение в пределах от 10 до 15%.

|  |  |
| --- | --- |
| а | б |

а – влияние хрома на прочностные характеристики отожженных хромистых сталей с 0.10% С; б - влияние количества хрома на ударную вязкость (по Шарпи) железохромистых сталей

Рисунок 1.5 – Влияние количества хрома на механические характеристик сплава [6]

Положительным свойством легирования хромом является повышение коррозийной стойкости материала. Так, стали содержащие более 13% Cr называются коррозийно-стойкими и обладают высоким сопротивлением к окислению.

Учитывая, что в нашем случае необходимо наличие высокой коррозийной стойкости и жаропрочности одновременно, а также принимая во внимание высокую стоимость никеля, принимаем за приблизительны состав сплава:

1. Количество хрома находится в пределах от 13% до 15%
2. Никель – от 4% до 35%
3. Железо – от 35% до 83%

Рассмотрим подробне

В настоящее время существует множество отечественных и зарубежных разработок хромоникелевых сплавов **не в те дебри полез**, одним из которых является инколой. Рассмотрим, например, сплав инколой-800. Он представляет собой сталь, проявляющую хорошую жаростойкость и коррозийную стойкость в жидких средах при высоких температурах. Это является главной причиной его использования в трубопроводных системах, турбинах парогенераторах и теплообменниках ядерных реакторов [5]. Состав инкалоя-800 представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Состав инколоя-800 [6]

|  |  |
| --- | --- |
| Элемент | Количество, % |
| Ni | 30,0-35,0 |
| Fe | До 39,5 |
| Cr | 19,0-23,0 |
| C | До 0,10 |
| Mn | До 1,50 |
| S | До 1,0 |
| Si | До 0,75 |
| Cu | 0,15 – 0,60 |
| Al | 0,15 – 0,60 |
| Ti |  |

Инколой обладает высокими жаропрочными характеристиками, зависимость корорых от температуры представлена на рисунке 1.4.

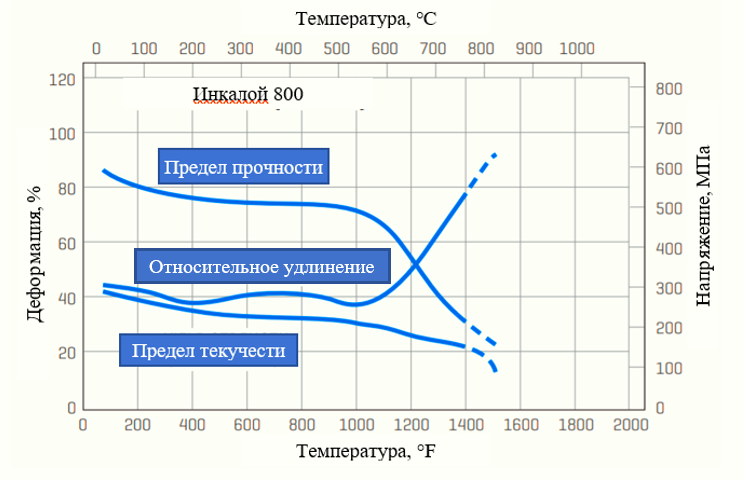


Рисунок 1.4 – Зависимость механических инкаллоя 800 свойств от температуры [6]

Из рисунка 1.4 видно, что предел прочности уменьшается только при высоких температурах (выше 600 ℃), но имеет приемлемые значения при температуре эксплуатации (320 ℃). Материал довольно пластичен и склонен к деформации, не смотря на высокое содержание хрома. Малое количество углерода и избыток хрома является причиной наличия большого количества свободного хрома, не связанного в карбиды, что понижает вероятность межкристаллитной коррозии.

Большие значения относительного удлинения являются негативным фактором, который свидетельствует о высокой пластичности сплава. Это может привести к деформации пластин фильтра под давлением и тем самым к закупорке его каналов, что впоследствии будет являться причиной фильтра выхода из строя и необходимости его замены.

В сравнении с некоторыми другими инколоевыми сплавами (как, например с 600, который содержит 58% Ni 27% Cr и 7%Fe), новый 800-ый сплав имеет более склонен к коррозии в жидких средах под влиянием температуры [7] и подвержен незначительному коррозийному растрескиванию [8]. Высокая коррозийная стойкость связана с наличием у сплава 600 большого количества хрома и никеля, однако это является экономически не выгодным в связи с высокой стоимостью никеля [9]. **У тебя сплав не на основе никеля**

В процессе эксплуатации происходит разрушение детали АДФ в следствие кавитационной коррозии. Подробно кинетика коррозийных процессов описана в работе Лукана и др. [10], где было проведено исследование сплава инкалой-800, использующийся в качестве материала второго контура реактора CANDU в приблизительно схожих с предъевляемыми нами условиях. Эксперимент, представленный в публикации, проводился в щелочной среде (PH=9.5) при давлении 5.1 и температуре 260 °С: были построены зависимости, представленные на рисунке 1.5. Как видно из этих графиков, скорость коррозии замедляется с течением времени, что является достоинством данного материала. Это объясняется процессом пассивации анодных участков сплава.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рисунок 1.5 – Зависимость скорости коррозии и потери металла с течением времени для инкалоя-800 в щелочной среде (PH=9.5) при давлении 5.1 и температуре 260 °С [10]

Отдельно следует отметить, что материал будет подвержен радиационному облучению тепловыми нейтронами, что может вызывать его радиационный рост и распухание. Следует отметить, что благодаря свойству никеля стабилизировать вакансионные скопления, материал также может быть подвержен радиационном упрочнению и охрупчиванию [4]. Это может быть положительным фактором, так как сплав изначально обладает излишней пластичностью, как уже указывалось выше. Это к четвертой главе ближе

Таким образом, главными достоинствами основы являются:

1. Жаропрочность
2. Коррозийная стойкость
3. Технологичность

Ярко выраженными недостатками являются:

1. Пластичность
2. Высокая стоимость никеля

## **Характеристика теплоносителя**

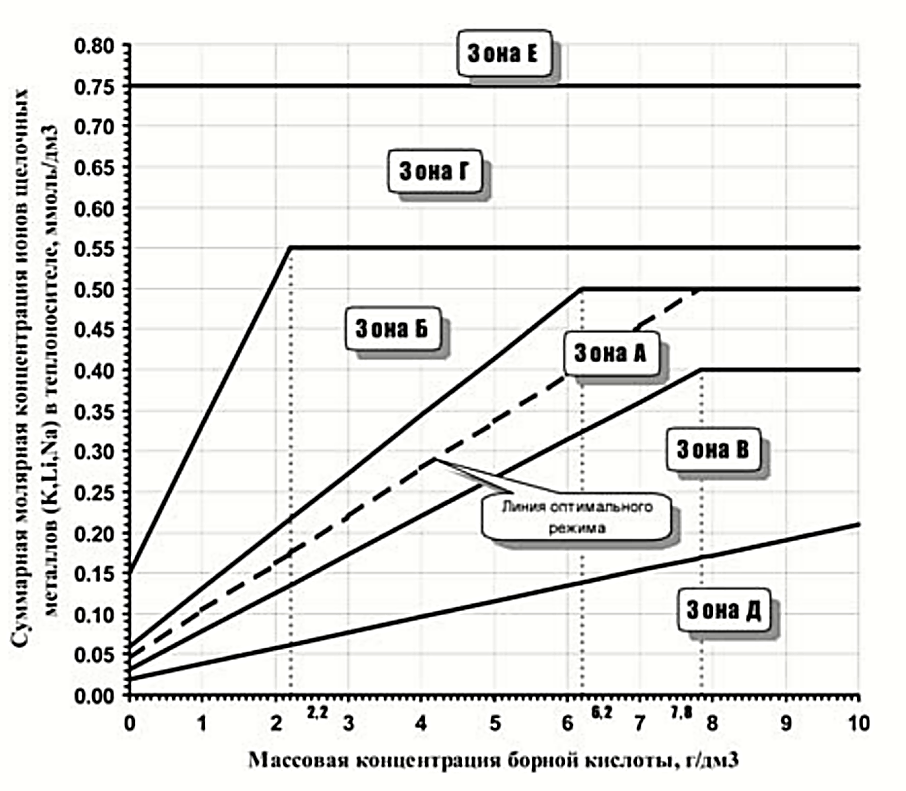
В процессе эксплуатации энергоблоков типа ВВЭР характеристики теплоносителя определяются стандартом организации (ОАО «Концерн Росэнергоатом») СТО 1.1.1.02.005.0004-2012 «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения». Основными, интересующими нас, задачами этого стандарта являются:

* подавление образования окислительных продуктов радиолиза при работе на мощности;
* обеспечение проектной коррозионной стойкости конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение всего срока эксплуатации энергоблока;
* обеспечение минимального количества накоплений активированных продуктов коррозии;
* минимизация количества радиоактивных технологических отходов

В соответствие с этими требованиями, нормализуются показатели, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3.

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование показателей | Количество |
| Концентрация хлорид-иона, мг/дм3 | не более 0,1 |
| Концентрация растворенного кислорода, мг/дм3 | не более 0,005 |
| Концентрация растворенного водорода, мг/дм3 | 2,2 – 4,5 |
| Суммарная молярная концентрация ионов щелочных металлов (калия, лития, натрия) в зависимости от текущей концентрации борной кислоты | Зона А (рисунок 1.6) |



Зона А – область нормируемых значений; Зоны Б и В – области 1-го уровня отклонений; Зоны Г и Д – области 2-го уровня отклонений; Зона Е – область 3-го уровня отклонений.

Рисунок 1.6 – Зависимость суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов (калия, лития, натрия) в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты (энергоблоки АЭС с ВВЭР- 1000 России и зарубежные энергоблоки с РУ с ВВЭР-1000 российского производства) [11]

Концентрация растворенного водорода устанавливается из соображений коррозийной устойчивости конструкционных материалов активной зоны реактора. Исходя из таблицы 1.3 pH может изменяться от нижнего предела 5.9, который обуславливает увеличение сверх допустимых величин скорости водородного охрпчивания металла, до верхнего 10.3, превышение которого грозит коррозийным растрескиванием твэлов. Помимо этого, концентрация водорода в пределах 2.2...4.5 мг/дм3 практически полностью подавляет радиолиз контурной воды и тем самым снижает коррозийное воздействие среды.

Необходимость поддержания определенного уровня хлорид-иона обуславливается тем, что он является сильнейшим активатором электрохимической коррозии. В сочетании с кислородом, даже небольшое количество хлорид ионов может вызвать коррозионное растрескивание материала разрабатываемого АДФ.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. "Nickel Use In Society". Nickel Institute. Archived from the original on September 21, 2017

2. Калин том 2

3. Cr-Fe-Ni Isothermal Section of Ternary Phase Diagram https://materials.springer.com/isp/phase-diagram/docs/c\_1100748 c\_1100748 (Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, © 2016

4. Калин том 6

5. Приданцев, Михаил Васильевич, Николай Павлович Талов, and Феликс Львович Левин. Высокопрочные аустенитные стали. Металлургия,, 1969.

6. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – 1965.

5. Dutta R. S. Corrosion aspects of Ni–Cr–Fe based and Ni–Cu based steam generator tube materials //Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Т. 393. – №. 2. – С. 343-349.

6. Metals, Special. "Product handbook of high performance nickel alloys." Special Metals, Huntington, WV, accessed May 22 (2015): 2017.

7. R.W. Bosch, D. Féron, J.P. Celis, Electrochemistry in light water reactors: reference electrodes, measurements, corrosion and tribocorrosion issues, EFC Publication No. 49, Woodhead Publishing in Materials, Cambridge, England, 2007.

8. Y.B. Qiu, T. Shoji, Z.P. Lu, Effect of dissolved hydrogen on the electrochemical behaviour of Alloy 600 in simulated PWR primary water at 290 C, Corros. Sci. 53 (2011) 1983–1989.

9. Stollery K. R. Mineral depletion with cost as the extraction limit: A model applied to the behavior of prices in the nickel industry //Journal of Environmental Economics and Management. – 1983. – Т. 10. – №. 2. – С. 151-165.

10. Lucan D., Fulger M., Jinescu G. Corrosion process of Incoloy-800 in high pressure and temperature aqueous environment //Rev. Chim. – 2008. – Т. 59. – №. 9. – С. 1026-1029.

11. Трегубова О. И., Брыков С. И., Сусакин С. Н. ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПЕРВОГО КОНТУРА ДЛЯ АЭС С ВВЭР-ТОИ.

12. Акимов А. М. ББК 31.47 А391.