|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| **Национальный исследовательский ядерный университет**  **«МИФИ»** | | |
|  | | |
| Институт ядерной физики и технологий | | |
| Кафедра «Физические проблемы материаловедения» | | |
|  | | |
| ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ | | |
| на тему: | | |
| Разработка антидебризного фильтра для ВВЭР-1200  **Вариант 7** | | |
|  | | |
| Дипломник  (Студент группы Б16-103) |  | Хафизов А.В. |
|  |  |  |
| Научный руководитель  *(Профессор)* |  | Исаенкова М.Г. |
|  |  |  |
|  |  |  |
| Эксперт-метролог  инж., канд.техн.наук |  | Ананьин В.М. |
|  |  |  |
| Рецензент  *(должность, степень)* |  | Ф.И.О. |
|  |  |  |
| Заведующий кафедрой  проф., д-р физ.-мат. наук |  | Калин Б.А. |
|  | Москва 2020 г. |  |

Введение

Водо-водяной реактор на быстрых нейтронах 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 жидкость, 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 жидкости в этом контуре. Эти загрязняющие вещества многократно циркулируют через ТВС и могут привести к засорению каналов, а также к повреждению ТВЭЛов.

Антидебризный фильтр является конструкционным элементом, размещенным на входе ТВС, 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 антидебризного фильтра для ВВЭР-1200.

# **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 |

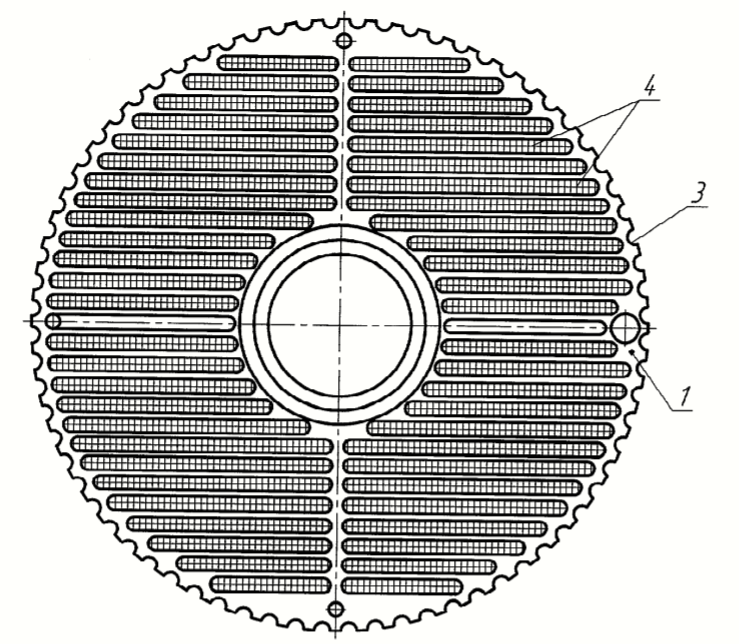
Таблица 1.1 – Условия работы антидебризного фильтра

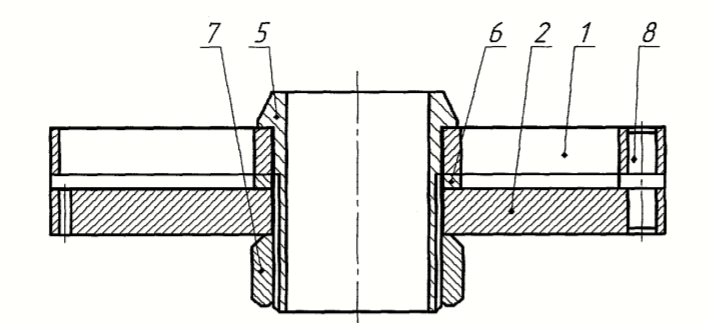
## **Описание конструктивного элемента**

### **Описание изделия**

Основной задачей фильтра является очистка жидкости первого контура реактора от дебриз-предметов: мелкой загрязняющей субстанции, представляющей собой частицы конструкционных материалов ТВС, топлива и других отходов. Поэтому упрощенно фильтр можно представить как металлическую решетку, закрепленную на одном из концов ТВС.

Существует множество конструкций антидебризных фильтров, которые различаются в зависимости от страны изготовления и модели реактора [1..3]. Для реакторов большой мощности (РБМК) антидебризный фильтр тепловыделяющей сборки содержит две пластины с прямыми параллельными пазами, установленные с осевым зазором между ними, а проекции пазов на плоскость, параллельную поверхностям пластин, перекрещиваются, предпочтительно под прямым углом, с образованием проекций проходных отверстий для теплоносителя. Дополнительно по периметру каждой пластины могут быть выполнены полуотверстия. Кроме того, для дополнительного повышения прочности по меньшей мере н одной из пластин на каждом пазе может быть выполнена, по меньшей мере, одна перемычка, разделяющая паз.

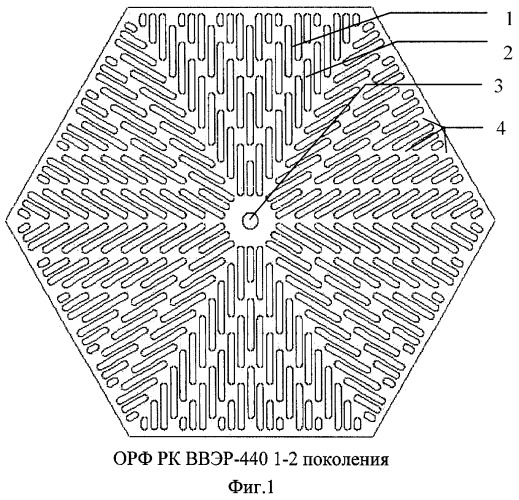




1 — Перемычки между пазами шириной не менее 1 мм; 2 – Пазы шириной 2..2.2 мм; 3 – Отверстие для крепления центральной трубы (ЦТ): 4 – площадки размером 4..5 мм для упора ТВЭЛов

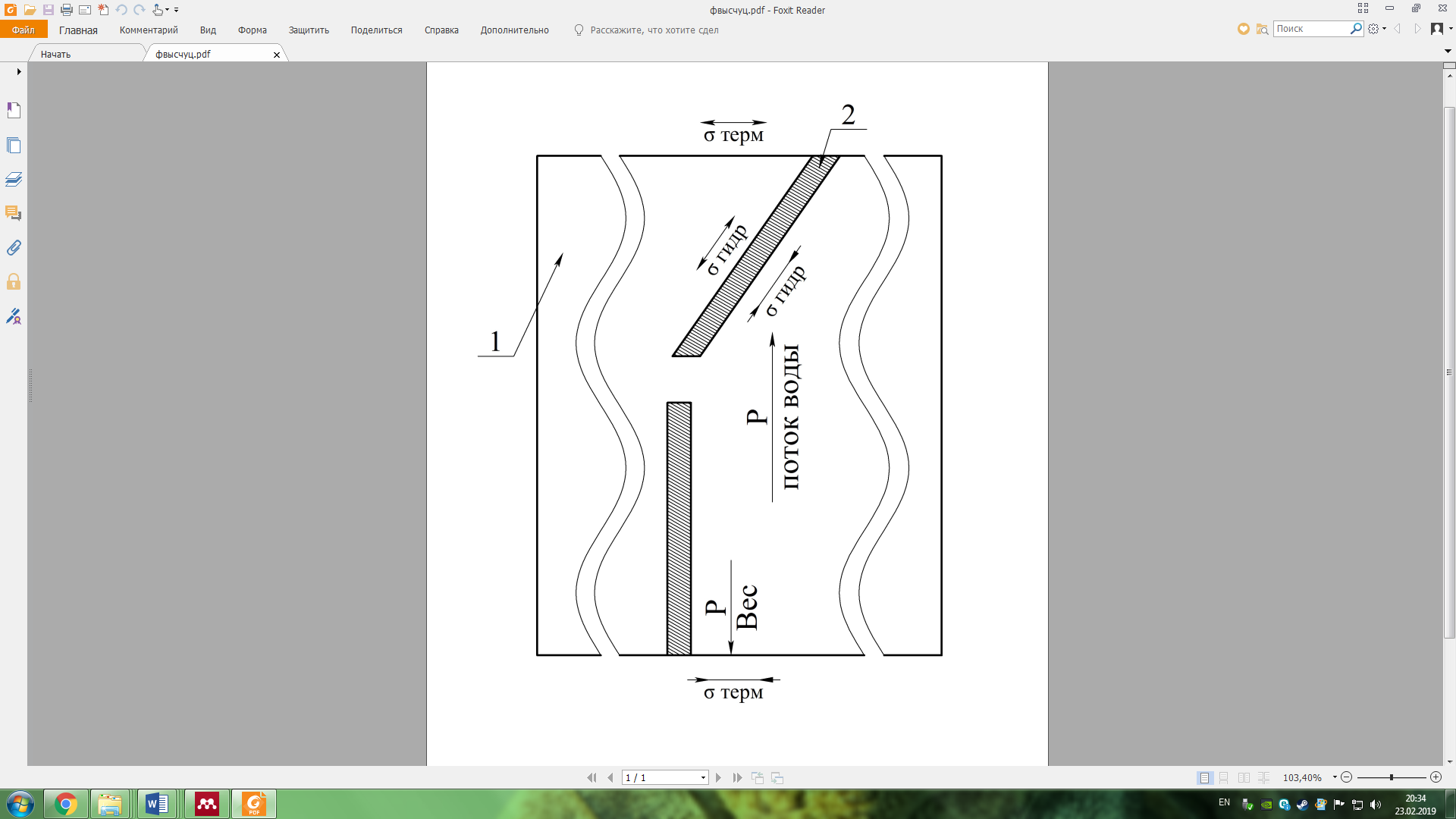
Рисунок 1.1 — Внешний вид антидебризной-опорной решетки фильтра ОРФ РК ВВЭР-440 1-2 поколения

Для реакторов типа ВВЭР антидебризный фильтр также может являться опорной решеткой [4], которая представлена на рисунке 1.2. Такая опорная решетка-фильтр (ОРФ) выполнена в виде перфорированной пластины с круглыми отверстиями, предназначенными для установки направляющих каналов или несущих труб и центральной трубы, и отверстиями для прохода теплоносителя. Каждое отверстие для прохода теплоносителя образовано двумя прямыми параллельными линиями и двумя дугами окружностей и имеет длину не более , где s - шаг твэлов в пучке. При этом в каждом секторе симметрии решетки отверстия для прохода теплоносителя параллельны друг другу и образуют между собой площадки, расположенные по правильной треугольной сетке с шагом s.



1 — Перемычки между пазами шириной не менее 1 мм; 2 – Пазы шириной 2..2.2 мм; 3 – Отверстие для крепления центральной трубы (ЦТ): 4 – площадки размером 4..5 мм для упора ТВЭЛов

Рисунок 1.2 — Внешний вид антидебризной-опорной решетки фильтра ОРФ РК ВВЭР-440 1-2 поколения



1 — Основные стенки фильтра; 2 – Пластины, отклоняющие поток воды

Рисунок 1.2 – Эскиз антидебризного фильтра

За кампанию реактора конструктивные элементы облучаются до флюенса порядка 1023 нейтр./см2. Это приводит к накоплению радиационных дефектов, а значит и к таким эффектам как: радиационное распухание, упрочнение, охрупчивание, ползучесть, изменение структурно-фазового состояния (СФС), что негативно влияет на механические свойства изделия.

При эксплуатации фильтра поток воды под давлением встречается с пластинами, собирающими шлам и изменяющими направление потока. Гидравлические напряжения, возникающие в пластинах, являются следствием этого воздействия, они могут вызывать деформацию (изгиб) элемента. Большое количество шлама и других элементов в сочетании с водно-химических режимом (ВХР) реактора может усиливать коррозионное воздействие на конструктивный элемент. Наиболее подвержены коррозии места соединений пластин в решетке. Кроме коррозионной стойкости необходима и устойчивость к эрозии поверхности.

Кроме гидравлических напряжений при пуске и отставке реактора могут возникать места локального перегрева, что вызывает термические напряжения. Так как изделие работает при повышенных температурах, то важное значение имеет коэффициент термического расширения (КТР) основного металла и припоя. Большая разница в КТР может привести к значительным нагрузкам на планы. На основание фильтра приходится давление всего веса изделия, однако, ввиду малого веса конструкции это давление несущественно.

### Описание разрабатываемого функционального материала

Разрабатываемый в курсовом проекте материал предназначен для пайки антидебризного фильтра, изготавливаемого из коррозионностойкой стали.

При пайке не происходит оплавления кромок соединяемых деталей, плавится только вводимый между ними металл, обладающей низкой температурой плавления – припой. Соединение деталей происходит за счёт образования химических связей между расплавленным припоем и основным металлом, а также за счёт взаимной диффузии.

В процессе взаимной диффузии происходит изменение состава припоя. Элементы, изначально содержащиеся в припое, после его плавления начинаю взаимодействовать с материалом паяемых деталей. Локальное изменение химического состава основного металла детали и припоя влияют на конечные свойства соединения.

Основные требования, предъявляемые к припою это: обеспечение качества соединения (механические свойства), хорошая смачиваемость основного металла, низкая эрозионная активность, коррозионная стойкость, соответствие температуры плавления циклам термообработки соединяемых материалов [4].

Широкое применение при создании высокопрочных соединений получила диффузионная пайка. Она отличается длительной выдержкой, необходимой для упрочнения соединения за счёт диффузии компонентов припоя и паяемых металлов. Перспективными припоями, применяемыми для пайки коррозионностойких, жаропрочных сталей являются быстрозакаленные сплавы на основе никеля [4,5].

## Характеристика основы

### Основные свойства

Никель – ферромагнитный переходный металл IV периода, с недостроенной d оболочкой. У него отсутствуют аллотропические превращения, и вплоть до температуры кипения он имеет ГЦК решетку. Сплавы на основе никеля имеют хорошие технологические свойства (деформируемость, свариваемость, ковкость), а также высокую жаропрочность и коррозионную стойкость в различных средах. На его основе изготавливают сплавы с особыми физическими свойствами (высокая магнитная проницаемость, сверх малый КТР). Для никеля характерно сочетание высокой прочности (σв=400÷560 МПа) и модуля упругости (Е=22 000 кгс/мм2) с хорошей пластичностью (δ=35÷40 %). Химические и физические свойства (Ni) представлены в таблице 1.2.

Чистый никель используется в основном в аккумуляторных батареях [6], в промышленности наибольшее распространение получили сплавы никеля с хромом, железом, титаном и другими элементами.

Таблица 1.2 – Свойства никеля при комнатной температуре [7–10]

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика | Значение |
| Номер в периодической таблице | 28 |
| Атомная масса, а.е.м | 58,693 а.е.м |
| Электронная конфигурация | 1s22s22p63s23p63d84s2 |
| Степени окисления | 0, 2, 3, |

Продолжение таблицы 1.2

|  |  |
| --- | --- |
| Энергия дефектообразования эВ | 33 |
| Параметр решетки, Ǻ | 3,5236 |
| Атомный диаметр, Ǻ | 2,48 |
| Физико-химические свойства | |
| Стандартный электродный потенциал, В | -0,25 |
| Физические свойства | |
| Плотность при н.у. ρ, г/см3 | 8,902 |
| Температура плавления, °С | 1453 |
| Удельная теплоёмкость Сp, кДж/(кг\*К) | 0,625 |
| Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м\*К) | 90,4 |
| КТР (Т=100°С) α ˑ106, 1/К | 13,8 |
| Удельное сопротивление, мкОм м | 0,068 |

### Механические свойства никеля

Основные механические характеристики при комнатной температуре представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Механические характеристики никеля [7,11]

|  |  |
| --- | --- |
| Механические свойства (Т=20 °С) | |
| Модуль сдвига G, ГПа | 71,5 |
| Модуль упругости E, ГПа | 196÷220 |
| Предел прочности σв, МПа  (отожжённый) | 400÷560 |
| Предел текучести σ0,2, МПа (отожжённый) | 280÷320 |
| Предел ползучести σпол, МПа | 150÷228 |

Продолжение таблицы 1.3

|  |  |
| --- | --- |
| Относительное удлинение δ,% | 30÷40 |
| Твердость HB | 60-70 |

Зависимости основных механических свойств технически чистого никеля показаны на рисунках 1.3 – 1.6. Как и у других металлов механические характеристики никеля зависят от его чистоты, способа изготовления и температуры. Никель подвергнутый холодной деформации обладает гораздо более высокими прочностными характеристиками. Резкий спад пределов прочности и текучести наблюдается в диапазоне температур от 400 °С и выше.

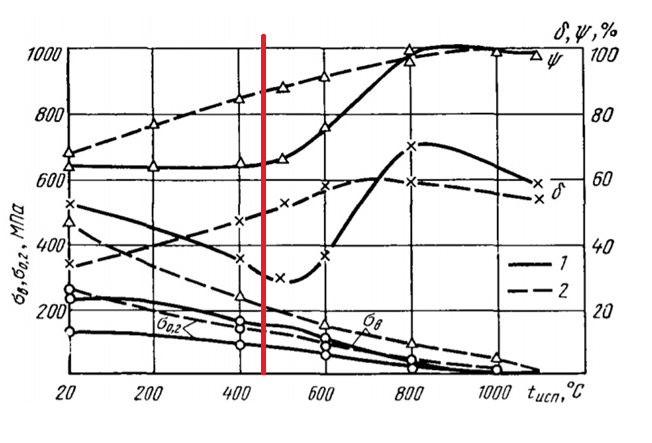


Рисунок 1.3 — Зависимость механических характеристик никеля разной чистоты от температуры [12]

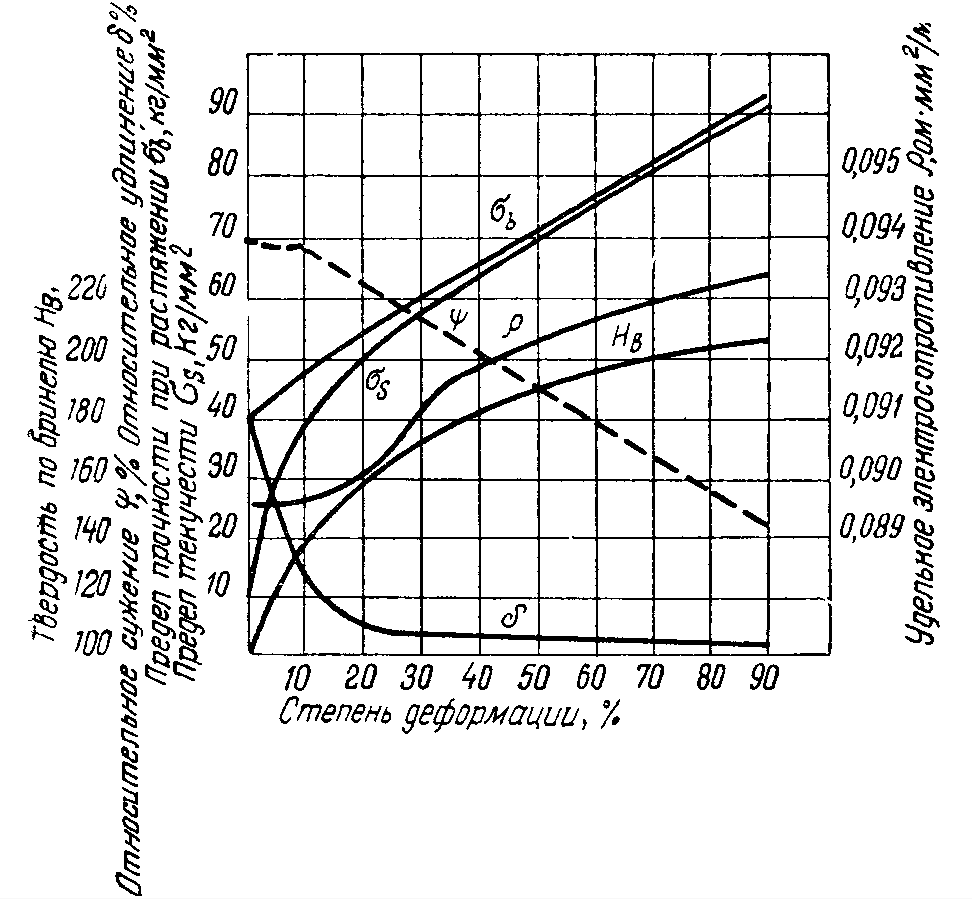
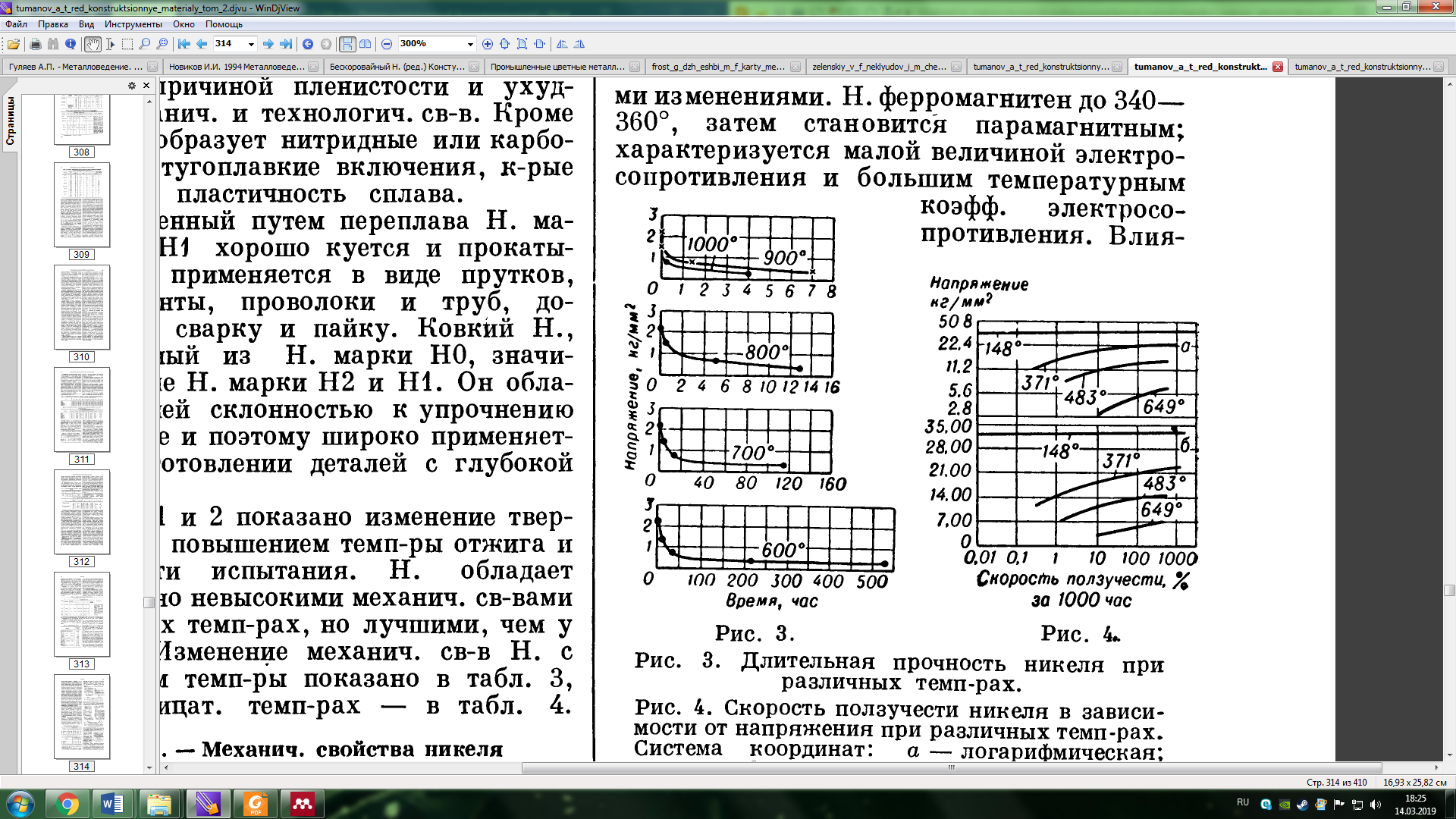


Рисунок 1.4 — Зависимость механических свойств и электросопротивления технического никеля от степени деформации [12]



а – логарифмическая, б – полулогарифмическая система координат [11]

Рисунок 1.5 – Скорость ползучести никеля в зависимости от напряжения при различных температурах;

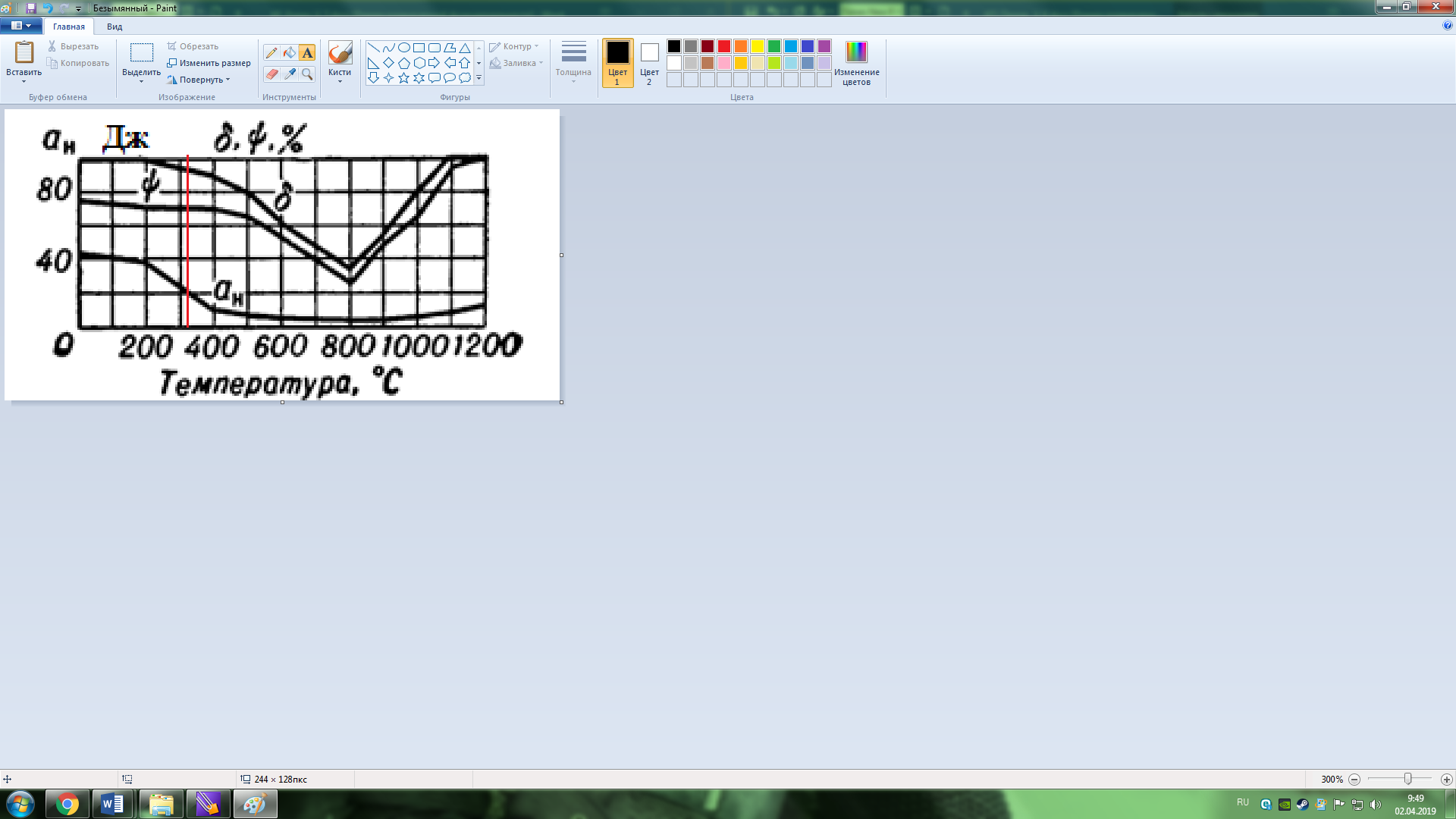


Рисунок 1.6 – Зависимость пластичности и работы разрушения от температуры [11]

При рабочей температуре 320 °С предел текучести близок по значению к пределу длительной прочности на базе 1000 часов, что не позволяет использовать чистый никель в условиях внешней нагрузки.

Таблица 1.4 – Механические характеристики никеля [7,11]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Механические свойства при рабочей температуре Т=320 °С | | | |
| Предел прочности σв, МПа | Предел текучести σ0,2, МПа | Предел длительной прочности σдл,, на базе 1000 часов, МПа | Относительное удлинение при δ,% |
| 430 | 112 | 98 | 31 |

### Коррозионная стойкость никеля

Никель практически не взаимодействует с такими кислотами как: фосфорная, серная, плавиковая. Концентрированная азотная кислота пассивирует никель. Он стоек к коррозии в сухом и влажном воздухе и воде. Сплавы с высоким содержанием никеля перспективны для использования в агрессивных средах [8].

Никель обладает меньшим по сравнению с железом сродством к кислороду ΔG⁰298= -211,8 кДж/г-ат.О, и образует сплошную пленку (Vок/Vме = 1,56) окисла никеля NiO с ГЦК решеткой. Никель является слабым восстановителем, стандартный электродный потенциал =-0,25 В. Оксид никеля способен взаимодействовать с оксидами других элементов с образованием структуры с решеткой шпинели.

### Радиационная стойкость никеля

В условиях нейтронного облучения никель проявляет склонность к радиационному распуханию, ползучести, охрупчиванию и упрочнению. Никель характеризуется высоким значение сечения рассеяния тепловых нейтронов 17,6 барн и сечением поглощения 4.6 барн.

## Характеристики теплоносителя

Вода – химическое соединение из двух атомов водорода и одно атома кислорода. Она является хорошим растворителем и обычно содержит большое количество примесей. Основные физические свойства воды представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Основные свойства воды при комнатной температуре [13]

|  |  |
| --- | --- |
| Относительная молекулярная масса, г/моль | 18 |
| **Плотность при 293 К, г/см3** | 0,998 |
| Температура максимальной плотности, К | 276,98 |
| **Температура плавления при н.у., К** | 273 |
| Температура кипения при н.у., К | 373 |
| Критическая температура, К | 647,15 |
| Критическое давление, МПа | 22,565 |
| Критическая плотность, г/см3 | 0,308 |
| Теплота парообразования, кДж/кг | 2253 |
| Теплоемкость при 293 К, кДж/(кг\*К) | 4,18 |

В первом контуре ВВЭР используется очищенная вода с добавлением корректирующих добавок, предназначенных для регуляции уровня pH. В таблице 1.6 представлен ВХР работы первого контура.

В качестве корректирующих добавок в теплоноситель могут вводить борную кислоту H3BO3, гидроксид калия КОН либо гидроксид лития LiOH (на зарубежных реакторах PWR), аммиак, гидразингидрат N2H4∙2H2O.

Борная кислота устойчива в радиационных полях, в присутствие щелочей является ингибитором коррозии. Введение непосредственно в теплоноситель борной кислоты приводит к резкому снижению величины рН и к необходимости коррекции водного режима путем подщелачивания. Для нейтрализации борной кислоты в контур циркуляции теплоносителя вводится раствор едкого калия.

Таблица 1.6 – Нормы и качества теплоносителя [13]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Нормируемые показатели | | | |
| Наименование показателя | Диапазон допустимых значения | Отклонения от допустимых значения | |
| 1 уровень | 2 уровень |
| Массовая концентрация хлорид-иона, мг/дм3 | Не более 0,1 | Свыше 0,1 до 0,2 | Свыше 0,2 |
| Массовая концентраия растворенного кислорода, мг/дм3 | Не более 0,2 | Свыше 0,1 до 0,2 | Свыше 0,1 |
| Диагностические показатели | | | |
| Наименование показателя | | Контрольные уровни | |
| Водородный показатель pH | | 5,8-10,3 | |
| Массовая концентрация аммиака, мг/дм3, не менее | | 3,0 | |
| Массовая концентрация меди, мг/дм3, не более | | 0,02 | |
| Массовая концентрация железа, мг/дм3, не более | | 0,1 | |
| Массовая концентрация нитрат-иона, мг/дм3, не более | | 0,2 | |
| Массовая концентрация фторид-иона, мг/дм3, не более | | 0,1 | |

Специфические условия, которые существуют в первом контуре реактора ВВЭР-1000, способствуют протеканию радиолиза воды с образованием коррозионно-активных промежуточных радикалов Н, ОН, eaq и других, а также коррозионно-активных молекулярных продуктов Н2, О2 и Н2О2. Факторами, определяющими скорость коррозии нержавеющих сталей, является содержание в теплоносителе хлорид-ионов и кислорода. Особую опасность для аустенитных коррозионностойких сталей представляет коррозия под напряжением, коррозионное растрескивание. Это явление протекает при наличии коррозионно-агрессивной среды, содержащей активаторы и окислители. Активатором процесса коррозии нержавеющих сталей является хлорид-ион, окислителем является кислород.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Riordan III, John E. "Nuclear fuel assembly debris filter." U.S. Patent No. 5,094,802. 10 Mar. 1992.

2. DeMario, Edmund E. "Nuclear fuel assembly debris resistant bottom nozzle." U.S. Patent No. 4,828,791. 9 May 1989.

3. Proebstle, Richard A., and Bruce Matzner. "Lower tie plate debris catcher for a nuclear reactor." U.S. Patent No. 5,519,745. 21 May 1996.

4. Опорная решетка-фильтр для тепловыделяющей сборки ядерного реактора: пат. 2 264 666 C2 USA. Россия // Кострицын В.А. и др.; заявл: 2010.08.12; опубл: 2012.04.10 Открытое акционерное общество "Машиностроительный завод" (RU)