

На правах рукописи

**МАКАРОВ ЕВГЕНИЙ ИГОРЕВИЧ**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ МАРКИ  
08X18N10T, ОБЛУЧЁННОЙ ДО ВЫСОКИХ НЕЙТРОННЫХ  
ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 330 – 420 °С**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2020

Работа выполнена на кафедре радиационных технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и в отделении реакторного материаловедения Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР») Государственной корпорации по атомной энергии Росатом

**Научный руководитель:**

Неустроев Виктор Степанович, доктор технических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

Чернов Иван Ильич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», отделение ядерной физики и технологии офиса образовательных программ, профессор отделения;

Поролло Сергей Иванович, кандидат технических наук, АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», лаборатория 24 ОИРМиТ, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

Защита диссертации состоится «24» апреля 2020 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.278.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная р. Свияги, д. 106, к. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа <https://www.ulsu.ru>, а также с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ – <https://vak.minobrnauki.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.278.01,  
кандидат физико-математических наук

Л.Н. Вострцова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В связи с наметившейся тенденцией к продлению срока эксплуатации реакторов ВВЭР и зарубежных реакторов PWR в конце 90-х годов прошлого века появилось большое количество научно-исследовательских программ и работ, посвящённых изучению радиационных явлений в аустенитных сталях при условиях, моделирующих режимы эксплуатации внутрикорпусных устройств (ВКУ) энергетических реакторов [1–3]. Эти радиационные явления оказались примерно теми же, что наблюдались и при изучении элементов тепловыделяющих сборок (ТВС) активных зон реакторов на быстрых нейтронах, но с некоторыми отличиями, связанными с используемыми сталями и интервалом температуры облучения.

В 2011 году на совместном заседании НТС Госкорпорации «Росатом» и научно-технического совета ОАО «Концерн Росэнергоатом» по вопросу «Обоснования продления срока службы ВКУ реакторов ВВЭР-1000 до 60 лет» были приняты решения о создании программ проведения материаловедческих работ по обоснованию и обеспечению прочности и ресурса ВКУ реакторов ВВЭР-1000 при эксплуатации и продлении срока службы до 60 лет и по прогнозированию физико-механических свойств материала ВКУ для проекта ВВЭР-ТОИ, облучённого до повреждающей дозы 164 сна. Эти программы включают работы по исследованию закономерностей радиационной ползучести стали марки X18H10T.

Особенностью элементов ВКУ и, в первую очередь, выгородки реактора ВВЭР-1000 является то, что в процессе эксплуатации они накапливают значительную нейтронную повреждающую дозу и эксплуатируются при температурах от 300 до 420°C [4] в массиве выгородки, при которых может происходить радиационное распухание аустенитной стали.

Нейтронно-физические расчёты показывают, что максимальная нейтронная повреждающая доза на отдельных участках выгородки через 30 лет эксплуатации может достигать до 50 смещений на атом (сна) и даже (по некоторым оценкам) до 75 сна, а при планируемом увеличении срока службы реактора до 40 – 45 и даже до 60 лет – более 100 сна [4, 5].

В результате того, что значения температуры и повреждающей дозы в сечениях выгородки реактора ВВЭР-1000 имеют большие градиенты, возможно возникновение напряжений более 200 МПа [5], что может быть выше предела текучести материала ВКУ при рабочей температуре, и деформирование конструкции в целом.

В сложных по геометрии конструкциях ВКУ с большим количеством цилиндрических каналов для охлаждения возможно образование областей с различными значениями растягивающего и сжимающего напряжения, поэтому важно исследовать влияние напряжения разного типа на свойства и структуру материала. Эксперименты по изучению влияния растягивающего напряжения на свойства и структуру различных аустенитных сталей проводились в России (АО «ГНЦ НИИАР», АО «ГНЦ РФ ФЭИ», АО «ВНИИНМ» и др.) и в зарубежных странах, но влияние сжимающего напряжения не исследовалось. Поэтому в настоящее время актуальны

работы по определению возможности продления ресурса внутрикорпусных устройств действующих реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и обоснованию работоспособности материалов ВКУ новых реакторов ВВЭР-1200 (ВВЭР-ТОИ) на срок службы до 60 лет с учетом данных по радиационной стойкости аустенитной стали марки 08X18H10T.

Работы по изучению радиационной ползучести аустенитных сталей проводили в основном на материалах оболочек твэлов и чехлов ТВС реакторов на быстрых нейтронах. Данные по исследованию ползучести и распухания сталей с основой X18H10 и особенно X18H9 (сталь 304) были получены в основном за рубежом. Для российской же стали марки 08X18H10T в аустенизированном состоянии, облучённой нейтронами до высокой повреждающей дозы при низкой (характерной для внутрикорпусных устройств водо-водяных энергетических реакторов) температуре, такие данные отсутствовали.

В связи с этим необходимо было изучить закономерности радиационной ползучести этой стали при низкотемпературном облучении до высоких значений повреждающей дозы.

Все вышесказанное свидетельствует об *актуальности* данной работы.

### **Цель и задачи работы**

Целью работы является экспериментальное определение закономерностей радиационной ползучести и влияния напряжённого состояния на деформацию ползучести и характеристик микроструктуры стали марки 08X18H10T, облучённой до различных значений повреждающей дозы в реакторе БОР-60 при температуре, характерной для ВКУ водо-водяных энергетических реакторов.

Для достижения поставленной цели автором решались *следующие задачи*:

1. Разработка и испытание газонаполненного образца новой конструкции, в котором одновременно реализуются растягивающее и сжимающее напряжение, а также использование разработанного способа испытания материалов при облучении газонаполненных образцов новой конструкции в ядерном реакторе.

2. Экспериментальное получение зависимостей деформации от повреждающей дозы и напряжений газонаполненных образцов и модуля радиационной ползучести (на стадии установившейся ползучести) стали марки 08X18H10T до повреждающей дозы 90 сна в интервалах температуры облучения 330 – 350 и 400 – 420 °С.

3. Экспериментальное исследование изменения характеристик радиационно-индуцированной микроструктуры, в частности, пористости и дислокационных петель в стали марки 08X18H10T после облучения в реакторе БОР-60 в интервалах температуры облучения 330 – 350 и 400 – 420 °С при наличии растягивающего и сжимающего напряжения.

### **Научная новизна полученных автором результатов**

1. Разработаны и испытаны газонаполненные образцы новой конструкции и применен разработанный способ испытания материалов при облучении газонаполненных образцов новой конструкции в ядерном реакторе, защищённые патентами.

2. Получены новые экспериментальные зависимости деформации от повреждающей дозы и значений растягивающего и сжимающего напряжения газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 в интервалах температуры 330 – 350 и 400 – 420 °С.

3. На основе полученных экспериментальных данных рассчитан модуль радиационной ползучести стали марки 08X18H10T —  $(2,4 \pm 0,4)10^{-6}$  (МПа·сна)<sup>-1</sup> (на стадии установившейся ползучести) для значений повреждающей дозы до 90 сна в интервале температуры облучения от 330 до 350 °С, необходимый для проведения прочностных расчётов для обоснования срока службы внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР.

4. На основе обобщения и анализа полученных данных построены зависимости параметров микроструктуры и пористости (распухания) стали марки 08X18H10T, облучённой в реакторе БОР-60 в интервалах температуры облучения 330 – 350 и 400 – 420 °С, от значений растягивающего и сжимающего напряжения.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Полученные результаты важны для понимания физических процессов, протекающих в металлах и сплавах под облучением, и возможных причин деградации физико-механических свойств материалов внутрикорпусных устройств реакторов на тепловых нейтронах (водо-водяных энергетических реакторов).

2. Разработан газонаполненный образец новой конструкции для исследования деформации ползучести и радиационного распухания, в котором одновременно реализуются сжимающее и растягивающее напряжение при одинаковых температурно-дозовых условиях и применён способ испытания материалов в ядерном реакторе с использованием газонаполненных образцов новой конструкции.

3. Полученные дозные зависимости деформации газонаполненных образцов и характеристик пористости при растягивающем и сжимающем напряжении, а также значение модуля радиационной ползучести позволяют прогнозировать поведение материалов при высоких значениях повреждающей дозы.

4. Результаты исследований радиационной ползучести (модуля радиационной ползучести) стали марки 08X18H10T использовались в расчётах прочности при продлении срока службы внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000 и для обоснования срока службы выгородки на 60 лет в новых проектах реактора ВВЭР-1200 (ВВЭР-ТОИ).

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методический подход к исследованию влияния значений растягивающего и сжимающего напряжения на радиационное распухание и деформацию ползучести газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T, включающий использование образцов новой конструкции и применение способа испытания материалов при облучении таких образцов в ядерном реакторе.

2. Экспериментальные зависимости деформации газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 в интервалах температуры

330 – 350 и 400 – 420 °С, от повреждающей дозы и значений растягивающего и сжимающего напряжения. Значение модуля радиационной ползучести стали марки 08X18H10T составляет  $(2,4 \pm 0,4)10^{-6}$  (МПа·сна)<sup>-1</sup> для повреждающей дозы до 90 сна на стадии установившейся ползучести в интервале температуры облучения 330 – 350 °С.

3. Зависимости концентрации и среднего размера петель в стали марки 08X18H10T после облучения в реакторе БОР-60 при температуре от 330 до 350 °С от абсолютных значений растягивающего и сжимающего напряжения.

4. Зависимости объёмной доли, среднего размера и концентрации пор в стали марки 08X18H10T после облучения в реакторе БОР-60 в интервале температуры 400 – 420 °С от абсолютных значений растягивающего и сжимающего напряжения.

### **Апробация работы**

Основные результаты и материалы диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях и семинарах: IX–XIII Международных уральских семинарах «Радиационная физика металлов и сплавов» (г. Кыштым, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг.); Международном симпозиуме Fontevraud-7 «Contribution of materials investigations to improve the safety and performance of LWRs» (Франция, 2010 г.); XV Международной конференции по материалам термоядерных реакторов (USA, 2011 г.); Международной школе-семинаре для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, 2012 г.); XIX Европейской конференции по разрушению «Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety» (г. Казань, 2012 г.); X и XI Российской конференциях по реакторному материаловедению (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, 2013 г., 2019 г.), Международной научной конференции «Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики» (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, 2014 г.); XVII Международной конференции по материалам термоядерных реакторов ICFRM-17 (Германия, 2015 г.); XVIII Международной научно-технической конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, 2016 г.); XV Международной школе-конференции для молодых учёных и специалистов «Новые материалы» (НИЯУ МИФИ, г. Москва, 2017 г.); Всероссийской молодёжной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, 2018 г.).

### **Личный вклад**

Под общим руководством доктора технических наук Неустроева В.С. автором проведены подготовка экспериментов и исследования газонаполненных образцов, необлучённых и облучённых в реакторе БОР-60, а также были лично проведены статистическая обработка, обобщение и анализ собственных и литературных данных.

Автор принимал непосредственное участие:

– в разработке патентов и представлении результатов диссертации на международных и российских конференциях и семинарах.

– в моделировании напряжённо-деформированного состояния газонаполненного образца новой конструкции с применением программного комплекса ANSYS Mechanical.

– в проведении ТЭМ-исследований микроструктуры материала образцов и обработке результатов.

Личный вклад соискателя в получении основных результатов работы, представленной к защите, является определяющим.

#### **Участие в научных проектах**

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, были высоко оценены научными премиями, что подтверждает высокую актуальность работы. Диссертант является победителем и лауреатом:

– конкурса на получение стипендии Президента РФ для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (конкурс 2015–2017 гг.

– грант № СП-1836.2015.1 «Влияние высокодозного нейтронного облучения на радиационные эффекты в аустенитной стали X18H10T», приказ МИНОБРНАУКИ РОССИИ № 184 от 10.03.2015 г.);

– открытого конкурса на присуждение премии Госкорпорации «Росатом» молодым учёным атомной отрасли, достигшим конкретных высоких результатов в научно-исследовательской деятельности, 2013 и 2016 гг. (Приказ № 1/1239-П от 13.12.2016 г.);

– лауреатом XV Всероссийского конкурса «Инженер года-2014» по итогам конкурса по версии «Инженерное искусство молодых» в номинации «Атомная энергетика (научно-техническое обеспечение)», 2014 г. (диплом лауреата № 15-1840 от 23.01.2015 г.).

#### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается:

– воспроизводимостью полученных экспериментальных данных на большом количестве исследованных образцов;

– применением взаимодополняющих методов исследования;

– применением сертифицированных методик испытаний и аттестованного оборудования, наличием системы обеспечения качества в АО «ГНЦ НИИАР»;

– согласованностью полученных экспериментальных данных с экспериментальными данными и теоретическими работами в области радиационных повреждений материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе.

**Публикация.** По теме диссертации в различных изданиях опубликована 21 научная работа, из которых 4 статьи в рецензируемых журналах и два патента (на изобретение и полезную модель).

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём работы составляет 126 страниц, включая 65 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 65 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён анализ литературных данных по влиянию нейтронного облучения и напряжения на структуру аустенитных сталей.

Рассмотрены зависимости распухания аустенитных сталей от температуры, повреждающей дозы, скорости набора повреждающей дозы. Показана взаимосвязь радиационной ползучести и распухания аустенитных сталей, используемых для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Представлены и проанализированы имеющиеся данные о влиянии типа напряжённого состояния на радиационную ползучесть и радиационное распухание, а также на параметры микроструктуры аустенитных сталей.

Анализ литературных данных показал, что накоплен большой объём экспериментальных данных по радиационным явлениям, проявляющимся в аустенитных сталях при облучении в широких интервалах температуры и флюенса нейтронов. Исследований влияния растягивающего напряжения на распухание и вакансионную пористость аустенитных сталей в России и в мире было проведено достаточно много, а влияние сжимающего напряжения на распухание и ползучесть практически не изучали. Единственное достаточно полное исследование [6] этого вопроса (на изогнутых облучённых стальных пластинах) сопровождается большим количеством вопросов по методике создания напряжения разного знака и сопровождавших эту методику приближений. Из анализа опубликованных работ [6, 7] следует, что проблема влияния сжимающего напряжения на распухание и ползучесть аустенитных сталей экспериментально практически не изучена.

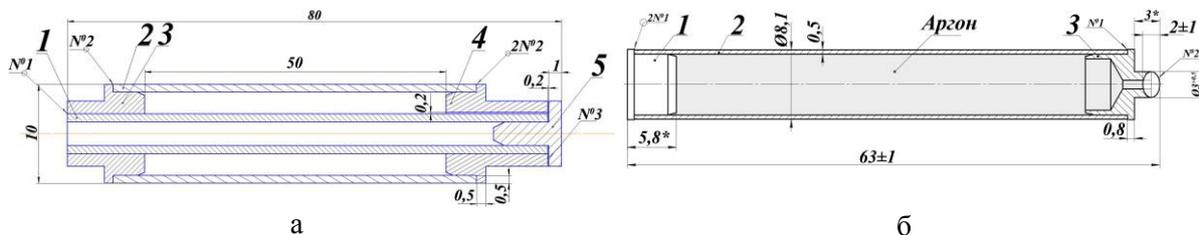
По результатам анализа литературных данных сделано заключение, что в литературе нет однозначной позиции по сравнительному влиянию значений сжимающего и растягивающего напряжения на распухание и параметры микроструктуры, что выявило необходимость постановки специальных экспериментов для решения данной проблемы. Также не ясно, применимы ли выявленные для растягивающего напряжения закономерности радиационной ползучести к случаю сжимающего напряжения. В связи с этим был сделан вывод о необходимости экспериментального изучения закономерностей влияния напряжения разного знака на радиационное распухание и деформацию ползучести аустенитной стали марки 08X18H10T — материала ВКУ реакторов ВВЭР и сравнения их с известными в литературе представлениями об этих явлениях.

**Во второй главе** приведены характеристики и расчёт напряженно-деформированного состояния исследуемых образцов, описаны условия реакторного облучения и методики до и послереакторных исследований.

В работе исследовали газонаполненные образцы двух конструкций (рисунок 1), состоящие: 1) из двух коаксиальных трубок; 2) одной трубки и концевых деталей.

Все газонаполненные образцы были изготовлены из стали марки 08X18H10T в аустенизированном состоянии — материала ВКУ, действующих и разрабатываемых реакторов ВВЭР. Исходная термообработка стали включала нагрев до температуры 1050 °С, выдержку в течение 30 мин и охлаждение на воздухе. С помощью аргонно-дуговой сварки газонаполненные образцы были загерметизированы под давлением в специальной камере.

Уникальность газонаполненного образца, состоящего из двух коаксиальных трубок, заключается в том, что в образце одновременно реализованы два принципиально различных напряжённо-деформированные состояния. На внутренней трубке реализуется сжимающее кольцевое напряжение, а на внешней — растягивающее кольцевое напряжение за счёт избыточного давления газа, заполняющего пространство между трубками. Конструкция газонаполненного образца (патент на полезную модель № 137631), состоящего из двух коаксиальных трубок, позволяла теплоносителю (натрию) омывать обе трубки одновременно. Температура внутренней и внешней трубок образцов практически не отличалась.



- а
- 1 — внутренний трубчатый элемент;
  - 2 — внешний трубчатый элемент;
  - 3 — нижняя кольцевая пробка;
  - 4 — верхняя кольцевая пробка;
  - 5 — технологическая заглушка

- б
- 1 — нижняя заглушка;
  - 2 — внешний трубчатый элемент;
  - 3 — технологическая заглушка

Рисунок 1 – Конструкция трубчатых газонаполненных образцов, состоящих из двух коаксиальных трубок (а) и одной трубки и концевых деталей (б)

Способ испытания материалов в ядерном реакторе (патент на изобретение № 2494480) заключается в применении газонаполненного образца, состоящего из двух коаксиальных трубок, для исследования изменений свойств реакторных материалов при различных типах напряжённо-деформированного состояния при практически одинаковых дозно-температурных условиях.

Результаты моделирования напряжённо-деформированного состояния газонаполненного образца новой конструкции методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical показали, что при рабочей температуре облучения в загерметизированном газонаполненном образце, состоящем из двух коаксиальных трубок, газ (гелий или аргон), закачиваемый в межтрубное пространство, создаёт на внутренней трубке кольцевое сжимающее, а на внешней трубке — кольцевое растягивающее напряжение. Радиальным напряжением можно пренебречь из-за малости его абсолютных значений. Осевое напряжение примерно в 2 раза меньше кольцевого в обеих трубках, что согласуется

с аналитическим расчётом, по формулам, представленным в ПНАЭ Г-7-002-86.

В реакторе БОР-60 были проведены три эксперимента с газонаполненными образцами:

1) состоящими из одной трубки и концевых деталей, в течение восьми лет при температуре облучения 330 – 350 °С. Максимальное значение флюенса нейтронов с энергией  $E > 0,1$  МэВ для газонаполненных образцов за время облучения составило  $23 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ , что соответствует повреждающей дозе 90 сна. Растягивающее кольцевое напряжение в оболочке образцов в начале облучения составило 2; 76; 153 и 192 МПа.

2) состоящими из двух коаксиальных трубок и концевых деталей, в течение шести лет при температуре облучения 330 – 350 °С. Максимальное значение флюенса нейтронов с энергией  $E > 0,1$  МэВ для газонаполненных образцов за время облучения составило  $15 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ , что соответствует повреждающей дозе 60 сна. Было изготовлено по два дублирующих образца на каждый уровень значений приложенного напряжения. Абсолютное значение растягивающего кольцевого напряжения в начале облучения равнялось (реализующегося на внешней трубке образца) 82; 124; 185 и 247 МПа, а сжимающего кольцевого (реализующегося на внутренней трубке образца) — 44; 67; 99 и 133 МПа. Первую партию дублирующих образцов извлекали для материаловедческих исследований по достижению повреждающей дозы 36 сна.

3) состоящими из двух коаксиальных трубок и концевых деталей, в течение четырёх лет при температуре облучения 400 – 420 °С до максимального флюенса нейтронов  $9 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$  ( $E > 0,1$  МэВ), что соответствует повреждающей дозе 36 сна. Было изготовлено по два дублирующих образца на каждый уровень приложенного напряжения. Первую партию дублирующих образцов извлекали для материаловедческих исследований по достижению повреждающей дозы 17 сна, а вторая партия дублирующих образцов оставалась в реакторе и по достижению повреждающей дозы 36 сна также была извлечена для исследований. Абсолютное значение растягивающего кольцевого напряжения (реализующегося на внешней трубке образца) равнялось 52; 144 и 206 МПа, а сжимающего кольцевого напряжения (реализующегося на внутренней трубке образца) составляло 28; 77 и 111 МПа.

Периодические измерения линейных размеров (диаметра и длины) газонаполненных образцов проводили в радиационно-защитной камере реактора БОР-60 во время плано-предупредительных работ на реакторе с помощью специальных дистанционных устройств, оснащённых микрометрическими индикаторными головками с погрешностью измерений диаметра и длины, составившей  $\pm 5$  и  $\pm 10$  мкм соответственно. Измерения диаметра проводили в центральной плоскости образцов в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.

Исследование газонаполненных образцов включало: измерение геометрических размеров, определение плотности материала методом гидростатического взвешивания, оптическую металлографию и трансмиссионную электронную микроскопию (ТЭМ) структуры стали, измерение микротвёрдости, определение химического состава образцов эмиссионно-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой.

**В третьей главе** представлены экспериментальные результаты исследования

радиационной ползучести и микроструктуры стали марки 08X18H10T, облучённой при температуре 330 – 350 °С.

Газонаполненные образцы новой конструкции с двумя коаксиальными трубками. По результатам измерения размеров газонаполненных образцов были построены зависимости изменения диаметра от повреждающей дозы (рисунок 2, а) для каждого отдельного образца при заданной температуре облучения и для серии образцов от напряжения (рисунок 2, б). Диаметр внешних трубок при различных уровнях растягивающего напряжения увеличивается пропорционально повреждающей дозе. В образцах без напряжения диаметр оболочек увеличивается слабо, а наличие сжимающего напряжения приводит к уменьшению диаметра (не превышающего 0,3 %) внутренних трубок газонаполненных образцов при разных уровнях приложенного напряжения.

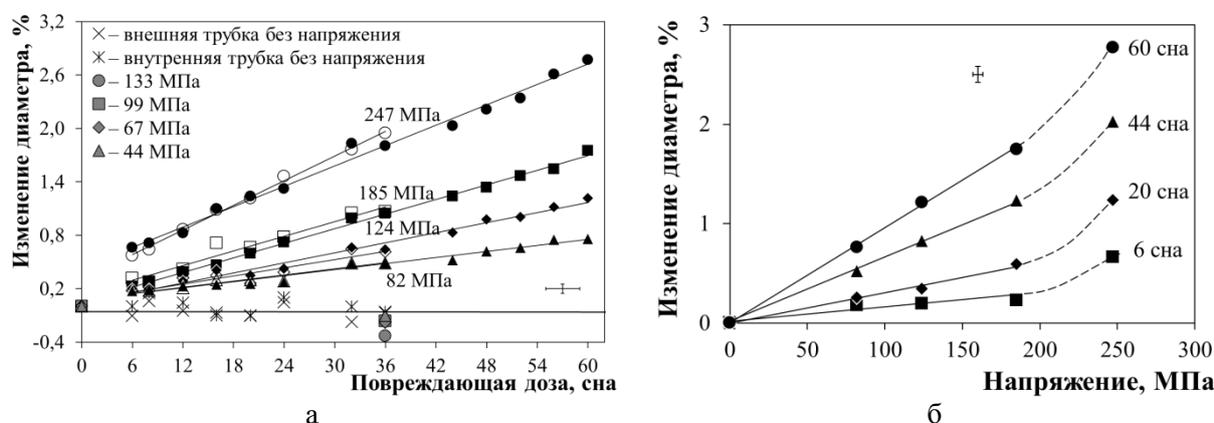


Рисунок 2 – Дозная зависимость изменения диаметра (а) и изменение диаметра от напряжения (б) газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T

В этом эксперименте деформирование внешних трубок, находящихся при растягивающем напряжении, на начальном этапе облучения до шести сна происходит быстрее, что соответствует первой стадии ползучести.

Для образцов с напряжением меньше 180 МПа (предел текучести необлучённого материала при температуре испытания 350 °С) наблюдается линейное увеличение диаметра с ростом напряжения. При росте напряжения выше указанного значения зависимость имеет вид, отличный от линейного (рисунок 2, б). В этом эксперименте было обнаружено небольшое увеличение длины (не превышало 0,3 %) газонаполненных образцов при всех значениях повреждающей дозы.

В экспериментах с газонаполненными образцами одной из самых важных задач является получение информации о модулях радиационной ползучести. Для расчёта модуля ползучести использовали известное соотношение [8], основанное на теории Von Mises, связывающее переход от окружной деформации  $\varepsilon_H$  и напряжения  $\sigma_H$  к эквивалентной деформации  $\varepsilon_{EQ}$  и напряжению  $\sigma_{EQ}$ :

$$\frac{\varepsilon_{EQ}}{\sigma_{EQ}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\varepsilon_H}{\sigma_H} = Bkt. \quad (1)$$

Переход от измеряемой диаметральной деформации  $\Delta D/D$  к окружной деформации

$\varepsilon_H$  проводили по формуле:

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta D}{D \cdot A}, \quad (2)$$

где постоянная  $A$  в нашем эксперименте равнялась 1,05.

Зависимости модуля ползучести стали  $B$ , вычисленные по описанной методике для различных значений повреждающей дозы, показаны на рисунке 3. На стадии установившейся ползучести, примерно после 20 сна, среднее значение модуля ползучести лежит в интервале  $(2,4 \pm 0,2)10^{-6}$  (МПа·сна) $^{-1}$ . Полученное значение модуля ползучести хорошо согласуется с литературными данными, согласно которым модуль радиационной ползучести  $B$  для сталей SA 304L и CW316 [8, 9] лежит в интервале  $(1,8 \div 3,0)10^{-6}$  (МПа·сна) $^{-1}$ . В образцах с напряжением 247 МПа для внешней трубки модуль ползучести оказался несколько выше, чем для других уровней напряжения. Возможно, это произошло из-за дополнительной деформации за счёт напряжения, превышающего предел текучести материала образцов в начальный момент облучения.

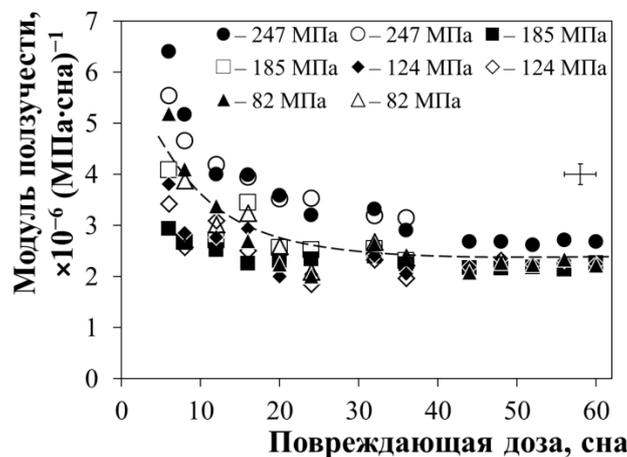


Рисунок 3 – Зависимость модуля ползучести от повреждающей дозы для газонаполненных образцов из стали марки 08X18H10T с разным уровнем значений приложенного напряжения

*Исследование микроструктуры стали марки 08X18H10T газонаполненных образцов.* Процессы радиационной повреждаемости (в том числе деформации радиационной ползучести) сталей в условиях приложенного напряжения всегда зависели от эволюции микроструктуры, в связи с чем были проведены ТЭМ-исследования материалов газонаполненных образцов, облучённых до повреждающей дозы 36 сна. Исследования проводили с помощью трансмиссионного электронного микроскопа JEM-2000FXII на вырезанных из внешних и внутренних трубок образцах с растягивающим и сжимающим напряжением. Материал образцов — сталь марки 08X18H10T в аустенизированном состоянии.

Во всех облучённых образцах наблюдали равноосные зёрна аустенита и равномерно распределённые в объёме материала глобулярные выделения второй фазы (рисунок 4), частицы радиационно-индуцированной мелкодисперсной фазы (рисунок 5, а), дислокационные петли (рисунок 5, б, в), а также двойники деформации. Глобулярные выделения — частицы карбонитридов титана Ti(C,N) — присутствуют в исследованной стали в исходном состоянии. Размер частиц находится в интервале

от 0,1 до 1,2 мкм, а максимальная концентрация локально составила  $3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Эти частицы располагаются как в теле зерна, так и на межзёрнных границах. Поры в материале всех исследованных образцов отсутствовали.

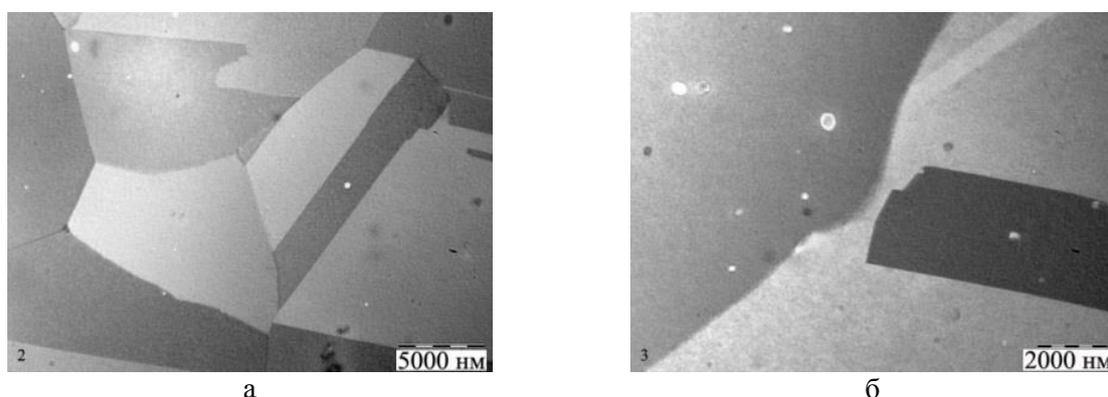


Рисунок 4 – Микроструктура стали марки 08X18N10T при различных уровнях сжимающего и растягивающего напряжения: – 67 МПа (а) и + 247 МПа (б)

Нейтронное облучение привело к образованию в стали радиационно-индуцированной мелкодисперсной фазы (рисунок 5, а) и радиационно-дислокационных петель Франка (рисунок 5, б, в).

Мелкодисперсные частицы имеют округлую форму и равномерно распределены в теле зёрен (см. рисунок 5, а). Средний размер частиц для всех образцов составил около 6 нм и не зависел от значения и знака приложенного напряжения. Результаты ранее проводимых нами и зарубежными коллегами исследований подобного типа стали после нейтронного облучения при температуре примерно 350 – 400 °С позволяют предположить, что это частицы G-фазы ( $\text{Me}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ , с ГЦК-структурой с параметром решётки  $a = 1,1 \text{ нм}$ ).

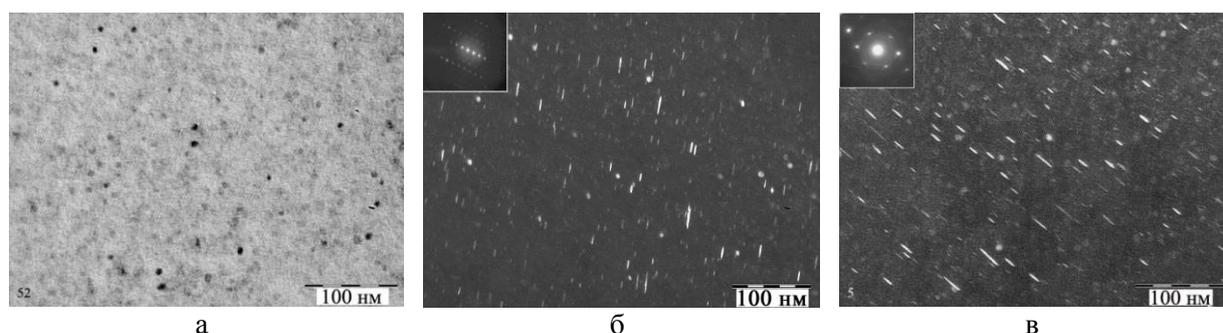


Рисунок 5 – Микроструктура стали марки 08X18N10T, облучённой в реакторе БОР-60 до повреждающей дозы 36 сна при температуре 330 – 350 °С: мелкодисперсные частицы G-фазы в светлом поле в образце с напряжением – 99 МПа (а) и темнопольные изображения петель Франка в рефлексе типа [111] в образцах с напряжением – 133 МПа (б) и + 247 МПа (в)

Наиболее важной частью микроструктуры, зависящей от приложенного напряжения, является дислокационная структура и, в частности, дислокационные петли. На рисунке б, а представлена зависимость концентрации петель Франка от значений сжимающего и растягивающего напряжения в стали марки 08X18N10T. Хорошо видно, что с ростом абсолютных значений напряжения концентрация петель в облучённой стали увеличивается. Размер дислокационных петель не зависит

от значений и знака приложенного напряжения (рисунок 6, б).

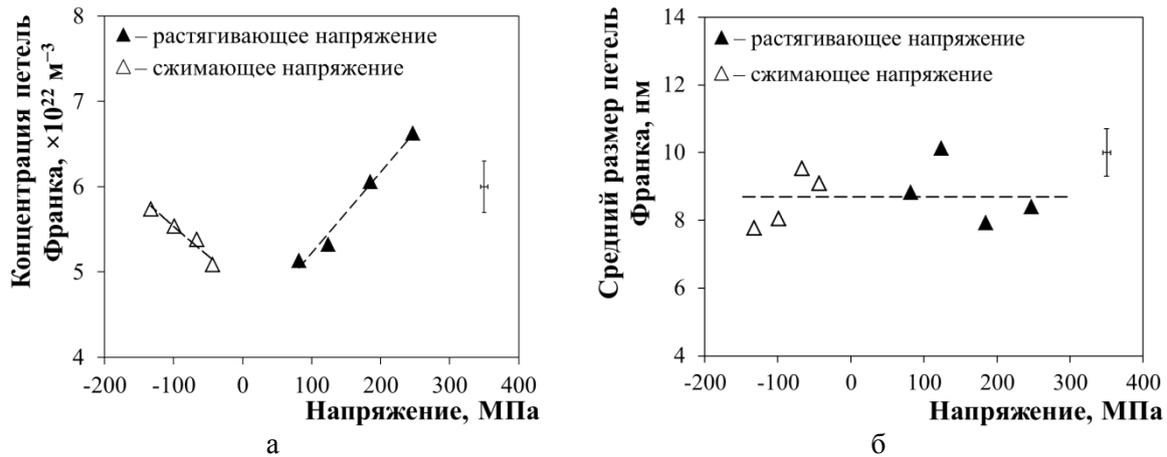


Рисунок 6 – Зависимости концентрации (а) и среднего размера петель Франка (б) от значений сжимающего и растягивающего напряжения в облучённой нейтронами стали марки 08X18H10T при температуре 330 – 350 °С

Следующий эксперимент по изучению радиационной ползучести стали марки 08X18H10T проводили на газонаполненных образцах с одной трубкой и заглушками с созданием растягивающего напряжения в оболочке образцов. Большую часть экспериментов по исследованию радиационной ползучести различных материалов во всём мире проводили на образцах такого типа. Полученная дозная зависимость изменения диаметра газонаполненных образцов из стали марки 08X18H10T является линейно-возрастающей для всех значений приложенного напряжения (рисунок 7, а).

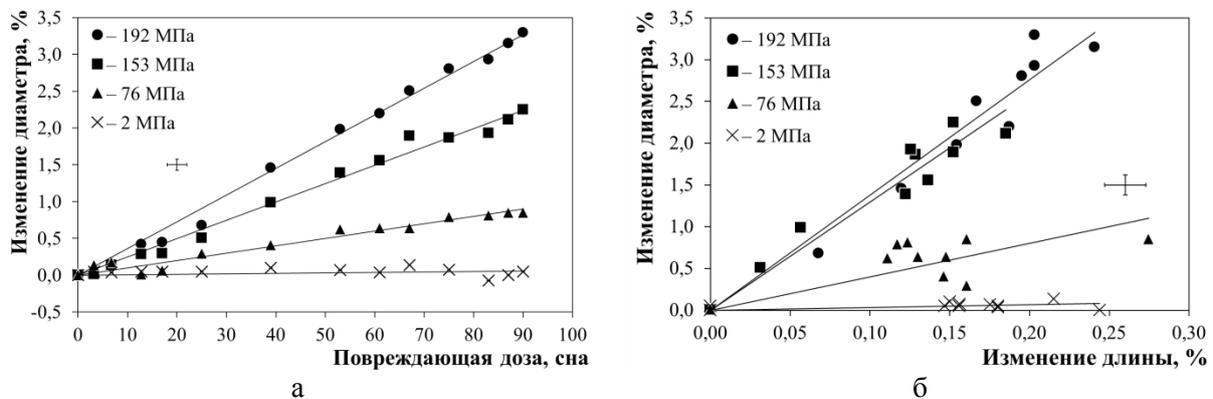


Рисунок 7 – Дозная зависимость изменения диаметра (а) и корреляция между изменением диаметра и длины (б) газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T

Зависимость изменения диаметра от изменения длины также является линейной для всех значений напряжения в образцах (рисунок 7, б). Несмотря на значительные изменения диаметра образцов (до 3,3 %) удлинение образцов не превышает 0,3 % при всех значениях повреждающей дозы до 90 сна.

В зависимости изменения диаметра от напряжения можно выделить переходную стадию (до 76 МПа), когда эта зависимость имеет вид, отличный от линейного (рисунок 8, а) для разных значений повреждающей дозы. В дальнейшем приведённая зависимость после выхода на стадию установившейся ползучести становится линейной

для всех значений повреждающей дозы и уровней напряжения, что важно для прикладных оценок деформации для ВКУ реакторов ВВЭР.

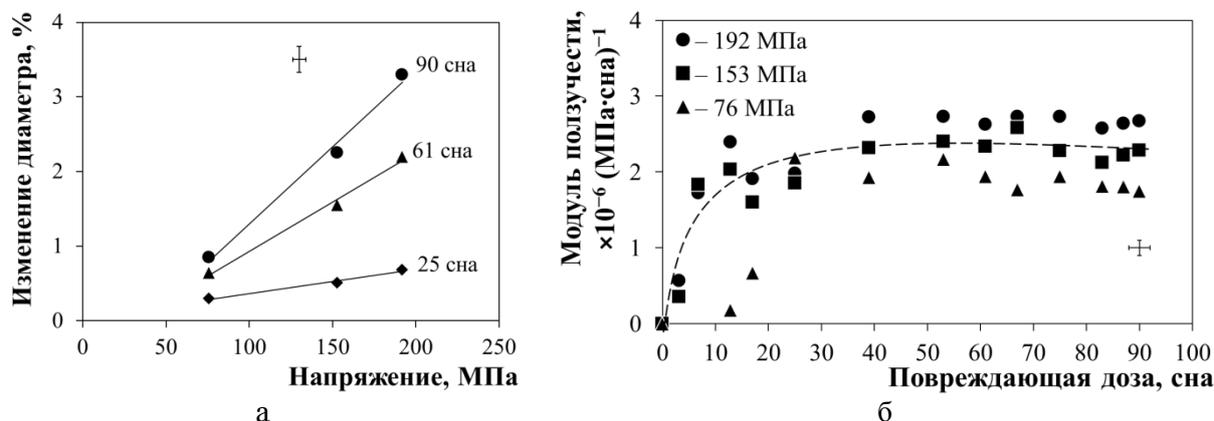


Рисунок 8 – Зависимости изменения диаметра от напряжения (а) и модуля ползучести от повреждающей дозы (б) для газонаполненных образцов стали марки 08X18N10T, облучённых при температуре 330 – 350 °С

Среднее значение модуля ползучести на стадии установившейся ползучести (выше 20 сна) для газонаполненных образцов стали марки 08X18N10T в аустенизированном состоянии составило  $(2,3 \pm 0,4)10^{-6}$  (МПа·сна)<sup>-1</sup> (рисунок 8, б). Полученное значение модуля радиационной ползучести хорошо согласуется со значением модуля ползучести для стали марки SA 304L [7, 8].

**В четвёртой главе** рассмотрены результаты эксперимента по исследованию ползучести и распухания с применением газонаполненных образцов новой конструкции аустенитной стали, облучённых до максимальной повреждающей дозы 36 сна при температуре 400 – 420 °С, когда в микроструктуре образцов появляются вакансионные поры и деформация газонаполненных образцов при облучении происходит за счёт ползучести и распухания.

Газонаполненные образцы новой конструкции, изготовленные из стали марки 08X18N10T в аустенизированном состоянии, облучались в реакторе БОР-60 при температуре 400 – 420 °С в два этапа: 1) в течение двух лет до повреждающей дозы 17 сна; 2) в течение четырёх лет до повреждающей дозы 36 сна. По достижению выбранной повреждающей дозы один из образцов из каждой пары с одинаковыми уровнями напряжения извлекали для разрушающих исследований, а второй возвращали на дальнейшее облучение в реакторе БОР-60.

Полученные зависимости изменения диаметра газонаполненных образцов от повреждающей дозы являются линейно возрастающими в интервале повреждающей дозы от 6 до 13 ÷ 27 сна при разных уровнях приложенного напряжения (рисунок 9, а). Диаметр образца без приложенного напряжения начал увеличиваться за счёт радиационного распухания, начиная с дозы 17 сна и еще более значительно — с 27 сна. Изменение длины газонаполненных образцов с ростом повреждающей дозы после первого этапа облучения (до 17 сна) не превышало 0,5 % (рисунок 9, б). А на втором этапе (после 27 сна) возрастало более значительно, что связано с ростом распухания, вносящего свой вклад в общее изменение диаметра и длины газонаполненных образцов (рисунок 9).

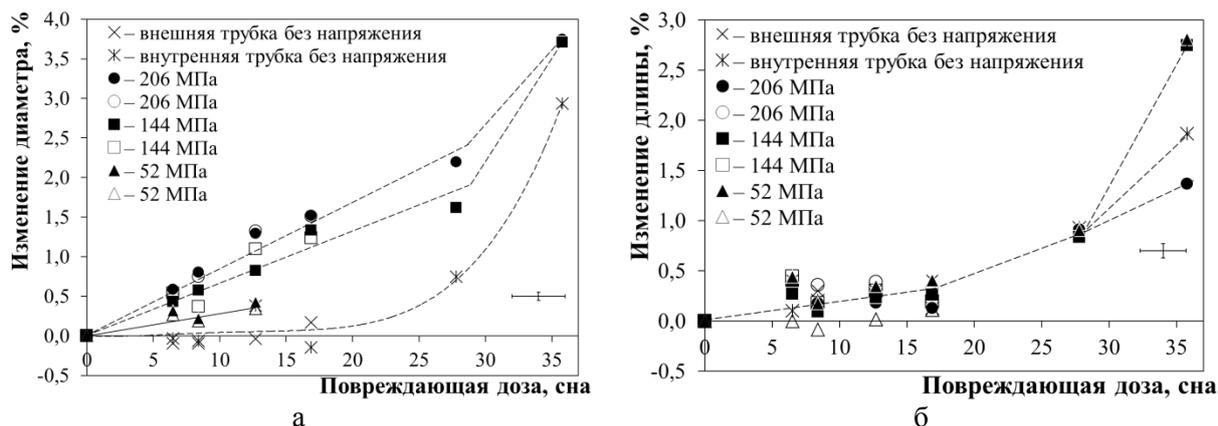


Рисунок 9 – Дозные зависимости изменения диаметра (а) и длины (б) газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T, облученных до повреждающей дозы 36 сна при температуре 400 – 420 °С

Зависимости модуля ползучести стали  $B$ , вычисленные по формуле (1) для различных значений повреждающей дозы, приведены на рисунке 10. Видно, что при малых значениях повреждающей дозы нет такого большого снижения модуля ползучести, как это происходило при низкотемпературном облучении (рисунок 3) с последующим выходом на стадию установившейся ползучести при практически отсутствующем распухании (до 17 сна) и его среднее значение составляет  $(7,0 \pm 1,0)10^{-6} \text{ (МПа}\cdot\text{сна)}^{-1}$ . После 27 сна распухание вносит существенный вклад в общую деформацию газонаполненных образцов, одновременно и модуль ползучести заметно увеличивается при повреждающей дозе от 27 к 36 сна. Такая корреляция позволяет оценить взаимосвязь процессов ползучести и распухания.

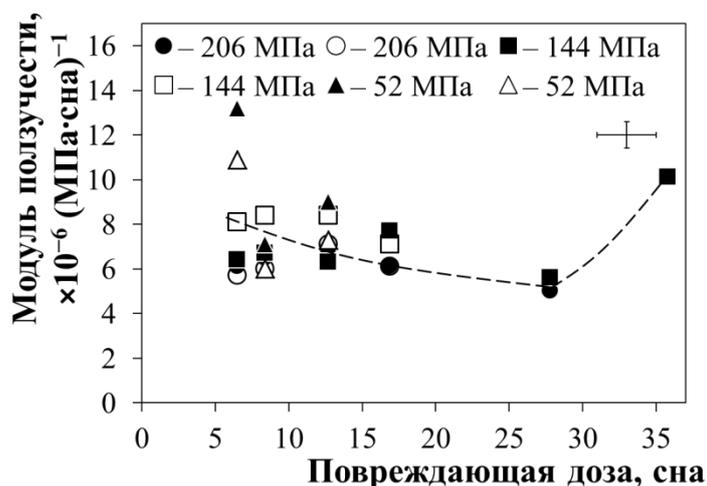


Рисунок 10 – Зависимость модуля ползучести от повреждающей дозы для газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T с разным уровнем приложенного напряжения, облученных до повреждающей дозы 36 сна при температуре 400 – 420 °С

В условиях, когда распухание в значительной степени влияет на общую деформацию образца, можно определить коэффициент  $D$  корреляции скорости распухания и модуля ползучести в формуле:  $B = B_0 + D \cdot \dot{S}$ , где  $B_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ (МПа}\cdot\text{сна)}^{-1}$ . Коэффициент  $D$  для стали марки 08X18H10T равен  $(1,5 \div 3,0)10^{-3} \text{ (МПа)}^{-1}$

в зависимости от оценки скорости распухания по изменению диаметра (0,7 %/сна) либо длины (0,3 %/сна) образца. Полученная оценка коэффициента  $D$  достаточно хорошо совпадает с литературными данными для аустенитных сталей [2, 10].

Результаты проведённого двухстадийного эксперимента для изучения ползучести стали марки 08X18H10T при температуре 400 – 420 °С, когда наблюдается радиационное распухание, позволили изучить характер изменения радиационно-индуцированной микроструктуры при возрастании повреждающей дозы. При проведении ТЭМ-исследований были обнаружены характерные для облучённых до малых повреждающих доз (17 сна) при такой температуре структурные составляющие: дислокационные петли небольшого размера, отдельные дислокации (рисунок 11) и первичные карбиды титана, а в некоторых образцах наблюдались вакансионные поры и дефекты упаковки. Такая структура характерна для инкубационного периода распухания, когда вакансионных пор практически нет и концентрация дислокационных петель невелика.

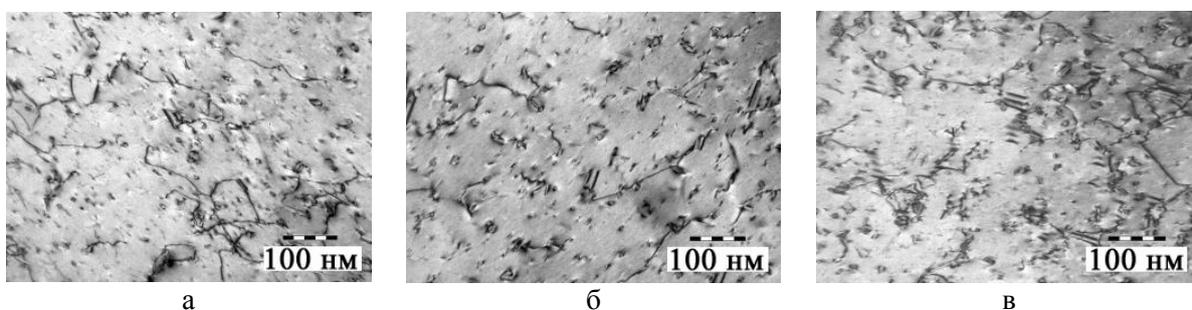


Рисунок 11 – Дислокационная структура стали марки 08X18H10T: без напряжения (а); с растягивающим напряжением + 206 МПа (б); со сжимающим напряжением – 111 МПа (в)

Количественная обработка изображений микроструктуры материала облучённых образцов позволила сделать вывод о том, что с увеличением абсолютных значений сжимающего и растягивающего кольцевого напряжения увеличивается концентрация дислокационных петель и вакансионных пор (рисунок 12).

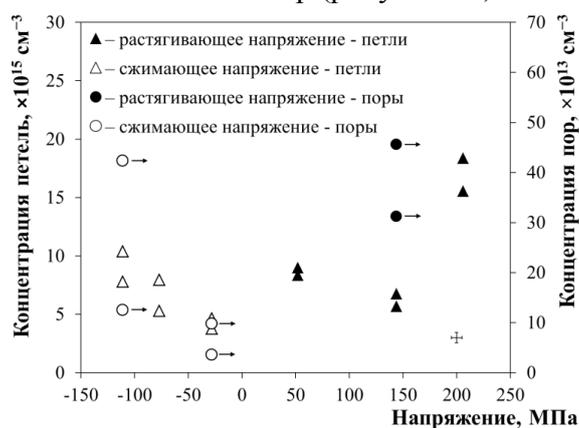


Рисунок 12 – Зависимость концентрации петель и пор в стали марки 08X18H10T, облучённой до повреждающей дозы 17 сна при температуре 400 – 420 °С, от значений сжимающего и растягивающего напряжения

Размеры пор и петель практически не меняются с ростом значений напряжения как растягивающего, так и сжимающего (рисунок 13). Такое поведение микроструктуры

характерно для инкубационного периода распухания. Действительно, объёмная доля пор не превышала 0,04 %, что соответствует инкубационному периоду распухания.

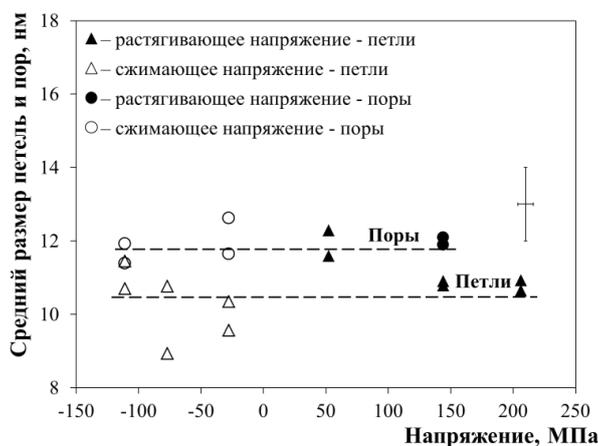


Рисунок 13 – Зависимость среднего размера петель и пор в стали марки 08X18H10T, облучённой до повреждающей дозы 17 сна при температуре 400 – 420 °С, от значений сжимающего и растягивающего напряжения

Полученные экспериментальные данные по микроструктуре газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 до повреждающей дозы 17 сна при температуре 400 – 420 °С, подтвердили данные [6], согласно которым, при температуре облучения 420 – 423 °С и распухании не больше 1 % значения напряжения различного знака одинаковым образом влияют на концентрацию петель и пор на стадии инкубационного периода распухания в стали марки 316 в холоднодеформированном состоянии.

После завершения второго этапа облучения в реакторе БОР-60 при  $T_{\text{обл}} = 400 - 420$  °С до повреждающей дозы 36 сна были также проведены ТЭМ-исследования образцов, вырезанных из внешней и внутренней трубок газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T. Результаты этих исследований также показали наличие одинаковых структурных составляющих в материале облучённых образцов с разными значениями сжимающего и растягивающего напряжения: частиц вторичных фаз, дислокационных петель, а также вакансионных пор разного размера и концентрации (рисунок 14).

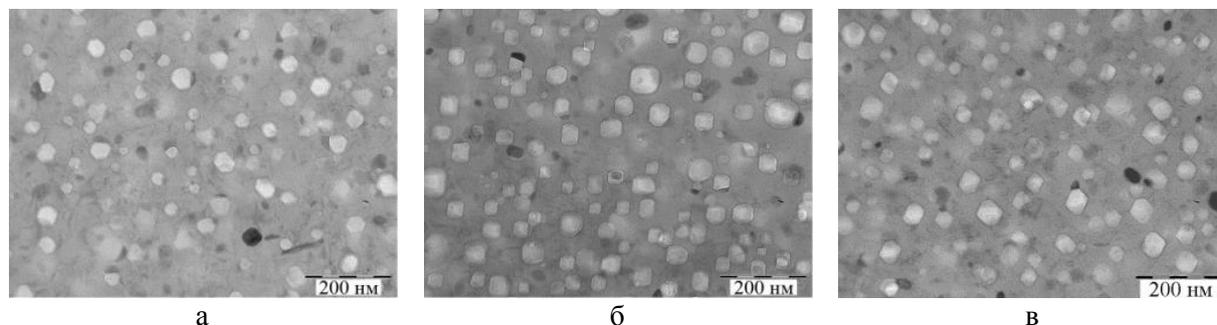


Рисунок 14 – Вакансионная пористость стали марки 08X18H10T, облучённой до повреждающей дозы 36 сна при температуре 400 – 420 °С: без напряжения (а); с растягивающим напряжением + 206 МПа (б); со сжимающим напряжением – 111 МПа (в)

Средний размер вакансионных пор и их объёмная доля увеличиваются с ростом

абсолютных значений сжимающего и растягивающего напряжения в образцах (рисунок 15), однако концентрация пор в образцах практически не менялась (рисунок 16), из чего следует, что величина распухания определяется в основном за счёт изменения размеров пор.

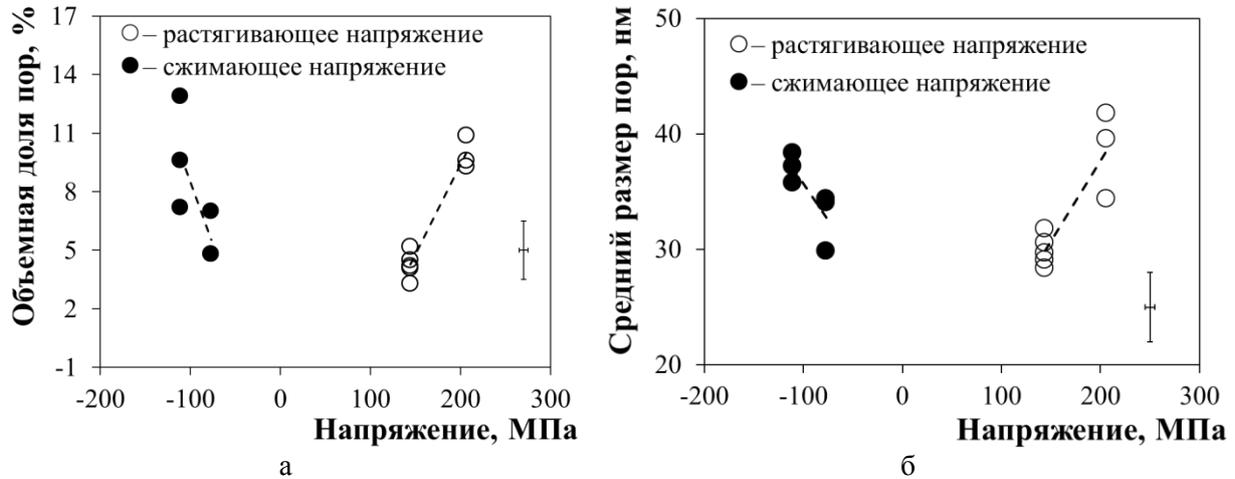


Рисунок 15 – Зависимости объёмной доли (распухания) (а) и среднего размера пор (б) в стали марки 08X18Н10Т, облучённой до повреждающей дозы 36 сна при температуре 400 – 420 °С, от значений сжимающего и растягивающего напряжения



Рисунок 16 – Зависимость концентрации пор в стали марки 08X18Н10Т, облучённой до повреждающей дозы 36 сна при температуре 400 – 420 °С, от значений сжимающего и растягивающего напряжения

На основе анализа данных по зависимости объёмной доли пор (распухания) от напряжения можно оценить коэффициент  $P$  ( $\text{МПа}^{-1}$ ) в эмпирической зависимости распухания стали марки 08X18Н10Т от значений напряжения  $S = S_0(1 + P\sigma)$ , где  $S$ , % — распухание в присутствии напряжения 206 МПа;  $S_0$ , % — распухание в отсутствие напряжения;  $\sigma$ , МПа — растягивающее кольцевое напряжение [8, 11]. В этом случае коэффициент  $P = (0,005 \pm 0,002) \text{ МПа}^{-1}$ .

Коэффициент  $P$  также можно оценить по формуле из работы [10]  $S = S_0(1 + P\sigma_{eff}) = S_0(1 + P((1 - \eta)\sigma_m + \eta\sigma_{eq}))$ , где  $\sigma_{eff}$ , МПа — эффективное напряжение;  $\sigma_m$ , МПа — гидростатическое напряжение;  $\sigma_{eq}$ , МПа — интенсивность напряжения;  $\eta = 0,15$  — константа материала, в общем случае зависящая от распухания. В этом случае коэффициент  $P = (0,007 \pm 0,002) \text{ МПа}^{-1}$ . Оба значения коэффициента  $P$  согласуются с литературными данными для аустенитных сталей [2, 8, 10, 12].

## ВЫВОДЫ

Проведены исследования радиационной ползучести и микроструктуры стали марки 08X18H10T — материала внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000 (ВВЭР-ТОИ) в трёх длительных экспериментах в реакторе БОР-60 в широком диапазоне условий облучения.

1. Обоснован и применён методический подход к исследованию влияния сжимающего и растягивающего напряжения на деформацию радиационной ползучести и микроструктуры стали марки 08X18H10T, включающий использование предложенных газонаполненных образцов новой конструкции и применение способа испытания материалов при облучении таких образцов в ядерном реакторе.

2. Получены экспериментальные линейно-возрастающие зависимости деформации газонаполненных образцов стали марки 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 в интервалах температуры 330 – 350 и 400 – 420 °С, от повреждающей дозы (в интервале доз от 5 до 90 сна) и значений растягивающего (до 180 МПа) и сжимающего (до 133 МПа) тангенциального напряжения.

3. На основе полученных экспериментальных данных рассчитан модуль радиационной ползучести стали марки 08X18H10T, равный  $(2,4 \pm 0,4)10^{-6}$  (МПа·сна)<sup>-1</sup> для значений повреждающей дозы до 90 сна в интервале температуры облучения 330 – 350 °С.

4. В интервалах температуры облучения 330 – 350 °С при повреждающей дозе 36 сна и 400 – 420 °С при 17 сна, когда распухание близко к нулю (инкубационный период), концентрация петель и пор возрастает при постоянных их размерах с ростом значений сжимающего и растягивающего тангенциального напряжения.

5. В интервале температуры облучения 400 – 420 °С при повреждающей дозе 36 сна, когда распухание превышает 8 %, значение сжимающего тангенциального напряжения, как и растягивающего, приводит к увеличению объёмной доли пор за счёт роста средних размеров пор при постоянной их концентрации.

6. Результаты исследований радиационной ползучести (модуль радиационной ползучести) стали марки 08X18H10T использовались в расчётах прочности при продлении срока службы ВКУ реакторов ВВЭР-1000 и для обоснования продления срока службы выгородки до 60 лет в новых проектах реакторов ВВЭР-1200 (ВВЭР-ТОИ).

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Neustroev, V. S. **Effect of tensile and compressive stresses on the radiation swelling and creep strain in austenitic steel Kh18N10T** [Текст] / V. S. Neustroev, S. V. Belozerov, E. I. Makarov, Z. E. Ostrovskii // **Physics of Metals and Metallography**. – 2010. – V.110 (Issue 4). DOI: 10.1134/S0031918X10100108. – P. 394-397 (Scopus).

2. Neustroev, V. S. **Effect of tensile stresses on the evolution of vacancy porosity in the Fe-18% Cr-10% Ni-Ti steel irradiated in BOR-60 reactor** [Текст] / V. S. Neustroev, S. V. Belozerov, E. I. Makarov, A. V. Obukhov // **Physics of Metals and Metallography**. – 2014. – V. 115 (Issue 10). DOI: 10.1134/S0031918X14100111. – P. 1007-1011 (Scopus).

3. Пат. 2494480 Российская Федерация, МПК G21C17/06. Способ испытаний материалов в ядерном реакторе [Текст] / Неустроев В. С., Белозёров С. В., Макаров Е. И. ; заявитель и патентообладатель ОАО «ГНЦ НИИАР». – № 2012111846/07 ; заявл. 27.03.2012 ; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. – 7 с. : ил.
4. Пат. 137631 Российская Федерация, МПК G21C17/06. Образец для испытания материалов в ядерном реакторе [Текст] / Неустроев В. С., Белозёров С. В., Макаров Е. И., Костюченко Н. А., Мирошниченко Г. В., Табакин Е. М. ; заявитель и патентообладатель ОАО «ГНЦ НИИАР». – № 2013121654/07 ; заявл. 08.05.2013 ; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. – 4 с. : ил.
5. Makarov, E. Effect of stress on irradiation-induced creep and swelling of Fe–18Cr–10Ni–Ti steel pressurized specimens irradiated in the BOR-60 reactor [Электронный ресурс] / Makarov E., Neustroev V., Belozero S. [et al.] // 15th Int. School-Conference “New materials”. – KnE Materials Science. – 2018. – P. 421–428. Режим доступа: <https://www.knepublishing.com/index.php/KnE-Materials>. DOI 10.18502/kms.v4i1.2193 (Дата обращения: 05.09.2019 г. (Scopus)).
6. Макаров, Е. И. Закономерности радиационной ползучести сталей 08X18H10T и 07X16H12M3T, облученных в реакторе БОР-60 при температуре 330–350°C [Текст] / Е. И. Макаров, В. С. Неустроев, С. В. Белозеров // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9. – № 4. DOI: 101134/S2079562918040139. – С. 1–6.
7. Neustroev, V. S. Effect of compressive and tensile stresses on swelling and creep strain of Fe–18Cr–10Ni–Ti austenitic steel [Текст] / Neustroev V. S., Belozero S. V., Makarov Ye. I., Ostrovsky Z. E. // Тезисы докладов Int. Symp. «Contribution of materials investigations to improve the safety and performance of LWRs». – France. – 2010. – P. 52.
8. Неустроев, В. С. Влияние сжимающих и растягивающих напряжений на радиационное распухание и деформацию ползучести в аустенитных сталях 08X18H10T [Текст] / Неустроев В. С., Макаров Е. И., Белозеров С. В., Островский З. Е. // Тезисы докладов IX Международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов». – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2011. – С. 36.
9. Neustroev, V. S. Effect of the sign of stress on the microstructure, creep and swelling of neutron-irradiated austenitic steel [Электронный ресурс] / Neustroev V. S., Belozero S. V., Makarov Ye. I., Garner F. A. // Тезисы докладов 15 Int. Conf. on Fusion Reactor Materials. – USA: Charleston. – 2011 (USB-флэш-накопитель).
10. Макаров, Е. И. Исследование радиационной ползучести стали X18H10T в экспериментах с газонаполненными образцами в реакторе БОР-60 [Текст] / Макаров Е. И. // Сборник докладов Международной школы-семинара «Черемшанские чтения–2012». – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2012. – С. 280–287.
11. Neustroev, V. S. Investigation of irradiation creep Fe–18Cr–10Ni–Ti stainless steel in experiments with gas-pressurized tubes in reactor BOR-60 [Текст] / Neustroev V. S., Makarov E. I., Belozero S. V. // Тезисы докладов 19 Europ. Conf. on Fracture «Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety». – Kazan: Foliant. – 2012. – P. 405.
12. Неустроев, В. С. Влияние напряжений на развитие вакансионной пористости, радиационное распухание и деформацию ползучести в облучённых нейтронами аустенитных сталях X18H10T [Текст] / Неустроев В. С., Макаров Е. И., Белозеров С. В., Обухов А. В. // Тезисы докладов X Международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов». – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2013. – С. 54–55.
13. Неустроев, В. С. К вопросу о взаимосвязи радиационной ползучести

и распухания в стали X18H10T, облучённой в реакторе БОР-60 [Электронный ресурс] / Неустроев В. С., Макаров Е. И., Белозеров С. В., Обухов А. В. // Сборник докладов X Российской конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2013. – С. 603–614 (CD).

14. Неустроев, В. С. К вопросу о взаимосвязи радиационной ползучести и распухания в стали X18H10T, облучённой в реакторе БОР-60 [Текст] / Неустроев В. С., Макаров Е. И., Белозеров С. В., Обухов А. В. // Тезисы докладов Международной научной конференции «Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики». – Димитровград: НИИАР. – 2014. – С. 74–75.

15. Makarov, E. Effect of stress state on the microstructure, irradiation creep and swelling of Fe–18Cr–10Ni–Ti Stainless steel irradiated in the BOR-60 reactor [Электронный ресурс] / Makarov E., Neustroev V., Markelov D. [et al.] // Тезисы докладов 17 Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-17). – Germany: Aachen. – 2015 (USB-флэш-накопитель).

16. Макаров, Е. И. Влияние напряжений на деформацию ползучести и распухание газонаполненных образцов из стали 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 [Электронный ресурс] / Макаров Е. И., Неустроев В. С., Белозёров С. В. [и др.] // Сборник трудов XVIII Международной научно-технической конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. – Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – 2016. – С. 12. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms-2016/documents/kms2016-030.pdf> (Дата обращения: 08.10.2019 г.).

17. Макаров, Е. И. Результаты исследования ползучести образцов из аустенитной стали, облучённых в БОР-60 при температурах 330 – 350 °С [Текст] / Макаров Е. И., Неустроев В. С., Белозёров С. В. [и др.] // Тезисы докладов XII Международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов». – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2017. – С. 46.

18. Макаров, Е. И. Моделирование напряжённо-деформированного состояния газонаполненного образца сложной формы [Текст] / Макаров Е. И., Киреев Н. В. [и др.] / Тезисы докладов XV Международной школы-конференции для молодых учёных и специалистов «Новые материалы». – М.: НИЯУ МИФИ. – 2017. – С. 54–55.

19. Макаров, Е. И. Закономерности радиационной ползучести стали X18H10T, полученные с использованием газонаполненных образцов, облучённых в реакторе БОР-60 [Текст] / Макаров Е. И., Неустроев В. С. // Тезисы докладов Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения». – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР». – 2018. – С. 89–90.

20. Макаров, Е. И. Радиационная ползучесть сталей X18H10T и X16H12M3T при температурах 330–420°С [Текст] / Макаров Е. И., Неустроев В. С. // Тезисы докладов XIII Международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов». – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2019. – С. 14–15.

21. Макаров, Е. И. Радиационная ползучесть и распухание стали марки 08X18H10T при температуре 350–420°С [Текст] / Макаров Е. И., Неустроев В. С., Обухов А. В., Маркелов Д. Е. // Сборник тезисов докладов XI конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР». – 2019. – С. 189–191.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Неустроев, В. С. Радиационные явления в стали X18H10T, облучённой в различных реакторах при условиях, близких к условиям эксплуатации ВКУ ВВЭР

[Текст] / В. С. Неустроев, В. Н. Голованов, В. К. Шамардин [и др.] // Сборник докладов VI Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, 11–15 сентября, 2000. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2001. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 3–23.

2. Garner, F. A. Potential high fluence response of pressure vessel internals constructed from austenitic stainless steels [Текст] / F. A. Garner, L. R. Greenwood, D. L. Harrod // Water Reactors, The Minerals, Metals, and Materials Society : 6th Int. symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. – Sun Diego. – 1993. – P. 783–790.

3. Massoud, J. P. The effect of irradiation on materials for core internals of PWRs: EDF-CEA-FRAMATOM joint research program [Текст] / J. P. Massoud, N. de Mathan [et al.] // бая Рос. конф. по реакторному материаловедению. Сборник докладов. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2001. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 36–48.

4. Шарый, Н. В. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР [Текст] / Н. В. Шарый, В. П. Семишкин, В. А. Пиминов, Ю. Г. Драгунов // М. : ИздАТ. – 2004. – 496 с.

5. Троянов, В. М. Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учётом эффектов облучения [Текст] / В. М. Троянов, Ю. И. Лихачев [и др.] // Сборник докладов V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, 8–12 сентября, 1997. — Димитровград: ГНЦ РФ «НИИАР». – 1998. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 3–18.

6. Lauritzen, T. Irradiation-induced swelling in AISI 316 steel: Effect of tensile and compressive stresses [Текст] / T. Lauritzen [et al.] // Radiation-Induced changes in Microstructure: Proc. of the 13th Int. symp. – ASTM STP 955 (Part I). – 1987. – P. 101–113.

7. Sahu, H. K. Void swelling and irradiation creep in stainless steel under compressive and tensile stress [Текст] / H. K. Sahu, P. Yung // J. Nucl. Mat. – 1985. – V. 136, № 2/3. – P. 154–158.

8. Garner, F. A. Irradiation performance of cladding and structural steels in liquid metal reactors [Текст] / F. A. Garner // Materials Science and Technology : A Comprehensive Treatment. – 1994. – V. 10A. – P. 419–543.

9. Dubuisson, P. Behavior under neutron irradiation of austenitic stainless steels (representative of French core internals) irradiated in BOR-60 and SM reactors [Текст] / P. Dubuisson [et al.] // бая Рос. конф. по реакторному материаловедению. Сборник докладов. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2001. – Т. 1. – С. 128–145.

10. Марголин, Б. З. Влияние напряжений на радиационное распухание аустенитных сталей [Текст] / Б. З. Марголин, А. И. Мурашова, В. С. Неустроев // Журнал Вопросы материаловедения. – 2011. – № 4 (68). – С. 124–139.

11. Неустроев, В. С. Влияние напряжений на радиационное распухание и параметры вакансионной пористости облученных нейтронами аустенитных сталей [Текст] / В. С. Неустроев, З. Е. Островский, В. К. Шамардин // Физика Металлов и Металловедение. – 1998. – Т. 86. – Вып. 1. – С. 115–125.

12. Neustroev, V. S. Experimental investigation of stress effect on swelling and microstructure of Fe-16Cr-15Ni-3Mo-Nb austenitic stainless steel under low-temperature irradiation up to high damage dose in the BOR-60 reactor [Текст] / V. S. Neustroev, Z. E. Ostrovsky, V. K. Shamardin // J. Nucl. Mat. – 2004. – V. 329–333. – P. 612–616.

МАКАРОВ ЕВГЕНИЙ ИГОРЕВИЧ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ МАРКИ  
08X18H10T, ОБЛУЧЁННОЙ ДО ВЫСОКИХ НЕЙТРОННЫХ  
ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 330 – 420 °С**

01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать . . . 2020 г.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 2,0.  
ГарнитураTimesNewRoman.  
Тираж 120 экз. Заказ №

Отпечатано в Издательском центре  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»  
432970, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42