

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д411.006.01
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ПРОМЕТЕЙ» ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело N _____

решение диссертационного совета от 13 мая 2015г. N 47д

О присуждении **Юрченко Елене Владимировне**, гражданке России, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование и прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР» по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение) принята к защите 04 марта 2015г., протокол N 46д диссертационным советом Д411.006.01 на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» Министерства образования и науки Российской Федерации, 191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49, созданным приказом Минобрнауки России №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель **Юрченко Елена Владимировна**, 1970 года рождения. В 1993 году окончила Санкт-Петербургский государственный технический университет (СПбГТУ), в июле 2014 г. окончила обучение в аспирантуре ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», работает в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» Министерства образования и науки Российской Федерации с 1993г, с 2004г по настоящее время в должности ведущего инженера.

Диссертация выполнена в научно-производственном комплексе №6 «Материалы и вопросы безопасности энергетических установок» Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей». Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Марголин Борис Захарович, начальник лаборатории прочности и ресурса энергетического оборудования -

заместитель начальника научно-производственного комплекса №6 «Материалы и вопросы безопасности энергетических установок» Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».

Официальные оппоненты:

Неустроев Виктор Степанович - доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории конструкционных материалов и материаловедческого надзора за эксплуатацией реакторных установок Акционерного общества «Государственный научный центр - Научно-исследовательский институт атомных реакторов»,

Печенкин Валерий Александрович - кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории радиационной физики твердого тела Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научный центр РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Московской области, в своем положительном заключении, подписанном Зубченко Александром Степановичем д.т.н., профессором - заместителем генерального директора по научной работе, Сероштаном Сергеем Ивановичем - заместителем генерального конструктора - начальником отделения конструкционной целостности, Комоловым Владимиром Михайловичем - начальником отдела материаловедения и Петровой Ольгой Юрьевной ученым секретарём отделения конструкционной целостности указала, что диссертация посвящена актуальной и практически важной теме, содержит новые научные результаты. Достоверность выполненных разработок оценена путем верификации разработанных моделей и методов с экспериментальными результатами по охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР под воздействием нейтронного облучения и теплового старения. Результаты диссертационной работы в полной мере отражены в научных публикациях автора и доложены на научных форумах различного уровня. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Ведущая организация отметила, что представленная диссертация является научной работой, вносящей существенный вклад в развитие исследований радиационного и теплового охрупчивания корпусных материалов, применяемых в реакторных установках типа ВВЭР, представляет теоретическую и прикладную целостность.

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, все по теме диссертации, общим

объемом 168 печатных страниц; авторский вклад составляет от 56 до 83% объема, в том числе 4 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, 1 патент РФ и 6 работ в международных изданиях, включенных в международные базы цитируемости.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Николаев В.А., Морозов А.М., **Юрченко Е.В.** О влияние легирующих примесных элементов на радиационное охрупчивание никельсодержащих корпусных материалов реакторов ВВЭР-1000. // Вопросы материаловедения. Радиационное материаловедение и конструкционная прочность реакторных материалов. Юбилейный сборник. – СПб: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2002г., с.52-60.
2. Карзов Г.П., Николаев В.А., **Юрченко Е.В.** Дозовые зависимости радиационного охрупчивания российских материалов для корпусов энергетических реакторов ВВЭР-440. // Вопросы материаловедения. -2009.-№4(60).-с.124-135.
3. Марголин Б.З., Николаев В.А., **Юрченко Е.В.**, Николаев Ю.А., Ерак Д.Ю., Николаева А.В. Анализ охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. // Вопросы материаловедения. -2009. -№4(60). -с.108-123.
4. Марголин Б.З., **Юрченко Е.В.**, Морозов А.М., Пирогова Н.Е. Анализ эффекта флакса нейтронов применительно к радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР. // Вопросы материаловедения.- 2012.-№2(70).-стр. 177-196.
5. Margolin B.Z., **Yurchenko E.V.**, Morozov A.M., Pirogova N.E., Brumovsky M. Analysis of a link of embrittlement mechanisms and neutron flux effect as applied to reactor pressure vessel materials of WWER. // In: J.Nucl.Mater., 434 (2013), pp. 347-356.
6. Margolin B.Z., **Yurchenko E.V.**, Morozov A.M., Chistyakov D.A. Prediction of the effects of thermal ageing on the embrittlement of reactor pressure vessel steels. // In: J.Nucl.Mater., 447 (2014) Issues 1-3, pp.107-114.

На диссертацию и автореферат поступили **18 отзывов, все положительные.**

Отзывы поступили от следующих организаций:

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ») г.Москва, отзыв подписан начальником отдела прочности к.т.н. Рубцовым Валерием Семеновичем; **АО «Государственный научный центр научно-исследовательский институт атомных реакторов»(АО «ГНЦ НИИАР»)** г. Димитровград, отзыв подписан заместителем начальника лаборатории отделения Реакторного материаловедения к.т.н. Шамардиным Валентином Кузьмичем; **ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)** г. Санкт-

Петербург, отзыв подписан ведущим научным сотрудником отдела ресурса, технической диагностики и ремонтно-восстановительной технологий металлов электрооборудования д.т.н. Гецовым Леонидом Борисовичем; **Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого**, г. Санкт-Петербург, отзыв подписан заведующим кафедрой «Сопротивление материалов» д.т.н., профессором Мельниковым Борисом Евгеньевичем; **Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)**, г. Москва, отзыв подписан заслуженным деятелем науки РФ, д.ф.-м.н., профессором, заведующим кафедрой «Теоретическая механика» Бондарем Валентином Степановичем; **АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» (АО «НИКИЭТ»)** г. Москва, отзыв подписан научным руководителем направления целостности конструкций к.т.н. Европиным Сергеем Владимировичем; **ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН» (ИПМаш РАН)** г. Санкт-Петербург, отзыв подписан заведующим лабораторией прикладных исследований, ведущим научным специалистом, д.т.н. Полянским Владимиром Анатольевичем; **Филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС)** г. Нововоронеж, отзыв подписан главным инженером Федоровым Анатолием Ивановичем; **ФГБУ «Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”** г. Москва, отзыв подписан заместителем руководителя Комплекса по реакторным материалам и технологиям, д.т.н., профессором Гуровичем Борисом Ароновичем; **ГНЦ РФ АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)** г. Москва, отзыв подписан заведующим отдела прочности материалов и конструкций д.т.н., профессором Казанцевым Александром Георгиевичем; **ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет»**, г. Ульяновск, отзыв подписан д.ф.-м.н., профессором Светухиным Вячеславом Викторовичем и к.ф.-м.н., в.н.с. Козловым Д.В.; **ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)** г. Москва, отзыв подписан заведующим кафедрой «Физические проблемы материаловедения» д.ф.-м.н., профессором Калином Борисом Александровичем и профессором кафедры «Физические проблемы материаловедения» д.ф.-м.н., профессором Черновым Иваном Ильичем; **ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**, г. Санкт-Петербург, отзыв подписан заведующим кафедрой «Механика деформируемого твердого тела» д.т.н., профессором Санниковым В.А. и д.т.н., профессором кафедры Душиным Юрием Александровичем; **АО «Государственный**

научный центр РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ), г.Обнинск, отзыв подписан советником генерального директора д.ф.м.н., профессором Конобеевым Юрием Васильевичем; Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Балаковская атомная станция», г. Балаково, отзыв подписан заместителем главного инженера по безопасности и надежности Рыжковым Юрием Анатольевичем; Проектно-конструкторский филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» (филиал «Энергоатомпроект»), г.Москва, отзыв подписан директором д.т.н. Давиденковым Николай Никифорович; АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловской обл., отзыв подписан главным научным сотрудником отделения радиационного материаловедения, д.т.н. Козловым Александром Владимировичем; ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» РАН, г. Москва, отзыв подписан член-корреспондентом РАН, д.т.н., профессором, советником РАН, главным научным сотрудником ИМАШ РАН Махутовым Николаем Андреевичем

Работа охарактеризована, как комплексное, расчетно-экспериментальное исследование, в котором применены теория радиационно-индуцированной диффузии, физические основы прочности и разрушения металлических материалов, основные закономерности накопления радиационных повреждений материалов и методы математической статистики для обоснования полученных в результате работы эмпирических зависимостей. Выявлены основные закономерности и определено влияние интенсивности нейтронного облучения на радиационное охрупчивание корпусных материалов ВВЭР в зависимости от доминирующих механизмов радиационного повреждения. Решены актуальные задачи прогнозирования радиационного и теплового охрупчивания корпусных материалов для легководных реакторов под давлением при различных условиях их эксплуатации (температуры облучения) с учетом влияния легирующих и примесных элементов на темп накопления повреждений. Полученные новые дозовые и дозо-временные зависимости введены в ряд руководящих документов ОАО «Концерн Росэнергоатом». Разработанный в рамках диссертации новый экспериментально-расчётный метод для прогнозирования теплового старения материалов КР ВВЭР позволяет выполнить оценки максимально возможного сдвига критической температуры хрупкости для материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 на срок эксплуатации 60 лет и более.

По автореферату сделаны следующие замечания:

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»

Отсутствует анализ эффекта существенного повышения доли хрупкого межзеренного разрушения при отжиге облученной стали 15Х2НМФА при температуре 450°С, рис 7.

Следовало бы изучить процессы релаксационного восстановления структуры, образованной в процессе охрупчивания в зависимости от температуры и времени нагрева.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

1. В автореферате отсутствует какое-либо пояснение различия коэффициента k в примесном эквиваленте для стали типа 15Х2МФА и для металла ее сварных швов.

2. Нет пояснения существуют ли аналогичные пороговые и предельные значения для стали типа 15Х2НМФА и металла ее сварных швов.

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН»

- в автореферате отсутствует обсуждение влияния уровня напряженного состояния на процесс охрупчивания;

- отсутствуют данные о доверительных интервалах у эмпирических зависимостей коэффициентов охрупчивания.

АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А.Доллежала» (АО «НИКИЭТ»)

1. В формуле (12), описывающей такой важный параметр как сдвиг критической температуры хрупкости вследствие термического старения, не приведены численные значения коэффициентов, что снижает практическую ценность данной формулы.

2. Значения предельных содержаний фосфора и меди превышают в разы регламентированные техническими условиями на корпусные стали, в связи с чем назначение полученных цифр не понятно.

Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

Не ясно, почему с увеличением продолжительности отжига доля хрупкого межзеренного разрушения на поверхности излома образцов увеличивается, а свойства материала улучшаются.

ФГБУ «Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”

1) Вызывает сомнение независимость вкладов Cu и P в радиационное охрупчивание корпусных материалов, поскольку в ряде работ показано взаимно-усиливающее действие этих элементов.

2) В автореферате не указана верхняя граница температуры облучения применимости полученных в работе пороговых значений содержания примесных элементов поскольку

существует температурная зависимость растворимости Cu в железе.

3) В работах НИЦ «Курчатовский институт», а также в последнем аттестационном отчете ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», в котором представлены данные НИЦ «КИ», показано посредством ТЭМ и РЭМ исследований отсутствие каких либо структурных изменений карбидной фазы при тепловом старении корпусных материалов ВВЭР. Данный вывод не согласуется с результатами приведенными в автореферате.

4) Из автореферата не ясен принцип подразделения экспериментальных данных для МШ стали 15X2НМФА с содержанием никеля более 1,5% и менее 1,34%.

5) Исследования, проведенные в НИЦ КИ показали, что провоцирующая термообработка при повышенной температуре позволяет получить концентрацию фосфора до 0,2-0,3 монослоев за довольно непродолжительное время (~2-3 тыс.ч), что соответствует концентрации фосфора для ОС (сталь 15X2НМФА) со временем облучения ~ 200 000 ч. Поэтому проведение тепловых выдержек при повышенных температурах, при условии правильно выбранного режима, дает консервативные представления о тепловом старении исследуемых материалов.

6) Вызывает сомнение факт повышения доли хрупкого межзеренного разрушения при проведении отжига для облученных образцов с 12% до 70%, поскольку в НИЦ «Курчатовский институт» неоднократно проводили отжиги в широком интервале температур ускоренно облученных образцов сталей КР, и никогда доля хрупкого межзеренного разрушения для сталей КР ВВЭР-1000 не превышала 20%. Тем не менее, автор правильно указывал, что равновесная концентрация фосфора на границах зерен и межфазных границах зависит только от температуры и практически не зависит от нейтронного облучения.

АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)

1. Отсутствует статистическое обоснование достоверности полученных оценок значений критической температуры хрупкости T_k и сдвигов ΔT_K .
2. Следовало отразить уровень консервативности предложенных дозовременных зависимостей материалов с учетом эффекта флакса нейтронов.

**ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
АО «Государственный научный центр РФ - Физико-энергетический институт им.
А.И. Лейпунского»**

1. Допущения «влияние фосфора и меди на охрупчивание металла взаимно независимое» и «вклад фосфора и меди в охрупчивание металла описывается подобными зависимостями», приведенные на стр. 10, выглядят несколько надуманными.

2. По рис. 7: хотелось бы видеть физическое объяснение того, почему при отжигах облученной стали доля межзеренного разрушения возрастает.

3. Е.В. Юрченко разработала корреляционные зависимости радиационного охрупчивания корпусных сталей отдельно для основного металла и металла сварных швов. Между тем хотя бы для основного металла представляется полезным получить корреляционную зависимость, единую для всех модификаций стали 15X2МФА (в том числе легированных никелем), сложив полученные массивы данных по охрупчиванию.

Проектно-конструкторский филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» (филиал «Энергоатомпроект»), АО «Институт реакторных материалов»

Следовало бы указать в автореферате максимальные значения сдвига критической температуры хрупкости для основного металла и для металла сварных швов.

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» РАН

По автореферату возникли вопросы:

- как учесть тот факт, что радиационное повреждение имеет непрерывный и устойчивый характер и описывается степенным уравнением, а старение более неустойчиво по температурам и времени;
- в какой степени и в какой форме полученные в диссертации результаты дают основания для уточнения или снятия погрешностей в действующих нормативных документах;

Отзыв АО «Государственный научный центр научно-исследовательский институт атомных реакторов» - без замечаний

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются ведущими специалистами в области радиационного материаловедения и работают в базовых организациях по исследованию физики реакторных процессов, физики радиационных повреждений материалов, обеспечению прочности и безопасной эксплуатации атомных энергетических установок. Ведущая организация является головным Конструкторским Бюро по разработке реакторов типа ВВЭР, а ее специалисты являются экспертами по инженерным основам в области физики реакторов, теплогидравлики, прочности и материаловедению.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработан новый подход к учету влияния флакса нейтронов на радиационное охрупчивание материалов корпусов реакторов типа ВВЭР в зависимости от доминирующих механизмов радиационного повреждения. Разработана новая экспериментально-расчетная методика по оценке теплового старения на длительные временные базы (до 60 лет) посредством кратковременного нейтронного облучения материала с последующим отжигом и дано ее теоретическое обоснование. В диссертации разработаны новые дозо-временные зависимости для прогнозирования радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов в зависимости от различных эксплуатационных и металлургических факторов, что значительно расширило диапазон их применимости для различных легководных реакторов.

Все экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании. В диссертационной работе проведена статистическая обработка экспериментальных данных и определены доверительные интервалы применимости полученных параметров.

Показана воспроизводимость результатов исследования на базе проведения работы по

сопоставлению экспериментальных результатов в различных европейских и российских лабораториях.

Предложены оригинальные подходы к количественной оценке влияния содержания легирующих и примесных элементов и эффекта флакса нейтронов на радиационное охрупчивание корпусных материалов, а также предложен принцип подобия процессов фосфорного охрупчивания материалов при тепловом старении и воздействии нейтронного облучения.

Экспериментально доказано значительное ускорение процессов фосфорного охрупчивания материалов при нейтронном облучении по сравнению с тепловым охрупчиванием.

Введены новые понятия о пороговых и предельных значениях содержания примесных элементов (фосфора и меди).

Теоретическая значимость и научная новизна исследования:

- Разработана методология прогнозирования радиационного охрупчивания корпусных реакторных материалов и получены новые дозо-временные зависимости для материалов КР ВВЭР, учитывающие влияние примесных и легирующих элементов, а также температуры облучения.
- Выявлены закономерности и определено влияние интенсивности нейтронного облучения (эффект флакса нейтронов) на радиационное охрупчивание корпусных материалов ВВЭР (сдвиг критической температуры хрупкости) в зависимости от доминирующих механизмов радиационного повреждения.
- Предложен подход к определению пороговых и предельных значений концентрации примесных элементов для материалов КР ВВЭР. Пороговое значение концентрации примесного элемента равно растворимости данного элемента в матрице материала в состоянии после нейтронного облучения. Кроме того, пороговое значение может быть определено как точка пересечения экстраполяционной кривой дозовой зависимости в область низких концентраций примесного элемента с осредненными значениями экспериментальных данных в этой области. Предельное значение концентрации примесного элемента равно растворимости данного элемента в матрице материала в исходном состоянии после отпуска. Кроме того, предельное значение может быть определено как точка пересечения экстраполяционной кривой дозовой зависимости в область высоких концентраций примесного элемента с осредненными значениями экспериментальных данных в этой области. Получены конкретные пороговые и предельные значения содержания фосфора и меди для материалов КР ВВЭР.

- Разработан новый экспериментально-расчетный метод для прогнозирования теплового старения материалов КР ВВЭР. Получен патент на изобретение №2531342 «Способ оценки степени охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в результате теплового старения».

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанные дозо-временные зависимости и расчетные методики включены в ряд руководящих документов ОАО «Концерн Росэнергоатом», одобренных Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (МТ 1.2.1.15.0232-2014, РД ЭО 1.1.2.09.0789-2012, РД ЭО 1.1.2.99.0920-2014, РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012).

Полученные закономерности по влиянию интенсивности потока нейтронов (флакса нейтронов) на сдвиг критической температуры хрупкости послужили обоснованием корректности получения дозовых зависимостей для стали 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б корпусов реакторов ВВЭР-ТОИ (поколение 3+) на базе результатов испытаний ускоренно облученных образцов.

Полученные дозовые и дозо-временные зависимости для материалов ВВЭР включены в международный код МАГАТЭ “Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs “Verlife”, 2003-2012”.

Получен патент на изобретение №2531342 «Способ оценки степени охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в результате теплового старения».

Личный вклад соискателя состоит:

В разработке дозо-временных зависимостей радиационного и теплового охрупчивания материалов КР ВВЭР, проведении обработки первичных экспериментальных данных, статистического и регрессионного анализа, компьютерном моделировании радиационно-индуцированных дефектов.

В развитии подходов и методов для:

- учета влияния флакса нейтронов на радиационное охрупчивание корпусных сталей;
- моделирования теплового старения посредством нейтронного облучения корпусных сталей;
- установления пороговых и предельных значений содержания примесных элементов, влияющих на радиационное охрупчивание сталей, а также постановки экспериментальных исследований и методологии обработки результатов.

Основные результаты выполненной работы подготовлены к публикации автором диссертации.

На заседании 13 мая 2015г. диссертационный совет Д411.006.01 принял решение присудить Юрченко Елене Владимировне ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета



Орыщенко Алексей Сергеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Малышевский Виктор Андреевич

13.05.2015 г.