



Акционерное общество «Ордена
Трудового Красного Знамени и ордена
труда ЧССР опытное конструкторское
бюро «ГИДРОПРЕСС»
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)



Joint Stock Company
"Experimental and Design Organization
"GIDROPRESS" awarded the Order of the Red
Banner of Labour and CZSR Order of Labour"
(OKB "GIDROPRESS")

24 АВГ 2017 № 044-0-3.05-01/14290

На № 13-05/1339 от 07.007.2017г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

В.В. Джангобегов

«28» 08 2017г.

О Т З Ы В

ведущей организации АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на диссертационную работу
**«Прогнозирование вязкости разрушения для расчета прочности корпусов реакторов типа
ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей и локального критерия хрупкого
разрушения»**, представляемую к защите на соискание ученой степени кандидата технических
наук В.Н.Фоменко
по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)»

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном унитарном
предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский
институт».

Актуальность работы

В настоящее время ведутся работы по продлению срока эксплуатации атомных реакторов
типа ВВЭР до 60 лет. Корпус реактора (КР) подобного типа является незаменимым элементом
и продление его срока службы является необходимым условием продления срока службы
реакторной установки в целом. При эксплуатации корпус реактора подвергается воздействию
нейтронного облучения, которое приводит к охрупчиванию материала. Сочетание значительной
деградации свойств материала и высоких нагрузок, возникающих при аварийном
расхолаживании корпуса реактора, приводит к тому, что вопрос сопротивления хрупкому
разрушению (СХР) корпуса реактора при продлении срока службы является одним из
определяющих.

Исполнитель Петрова О.Ю.

Телефон ((4967) 65-29-07

ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск, Московская обл., 142103, РФ
21 Ordzhonikidze street, 142103 Podolsk, Moscow region, RF
Тел./Tel. (4967) 54-2516; (495) 502-7910; (495) 502-7920
Факс/Fax (4967) 54-2733; (4967) 69-9783; (4967) 54-2516

E-mail grpress@grpress.podolsk.ru
www.gidropress.podolsk.ru
ОКПО 08624607 ОГРН 1085074009503
ИНН 5036092340 КПП 503601001

НИИ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 3085	в ДЕЛО
25.08.2017г.	№
5 л.	подп.

Наиболее объективную оценку трещиностойкости материалов конкретного корпуса реактора, с учетом охрупчивания в процессе эксплуатации можно получить на основании испытаний образцов-свидетелей. Но до недавнего времени отсутствовала научно обоснованная методика позволяющая использовать результаты испытаний образцов-свидетелей для расчета корпусов реакторов на сопротивление хрупкому разрушению.

Кроме того, при расчете КР на сопротивление хрупкому разрушению при аварийном расхолаживании необходимо рассчитать K_J (значение коэффициента интенсивности напряжений полученное на основе J-интеграла) как при нагружении, так и при разгрузке до уровня 0,9 от максимального значения температурной зависимости трещиностойкости $K_{JC}(T)$. В этом случае применение J-интеграла может быть затруднено: при нагружении, отличном от простого, J-интеграл зависит от контура интегрирования.

В связи с этим диссертационная работа, посвященная вопросам разработке методики позволяющей использовать результаты испытаний образцов-свидетелей для расчета корпусов реакторов на сопротивление хрупкому разрушению и разработке методики определения J-интеграла при расчете корпуса реактора на СХР при аварийном расхолаживании весьма актуальна.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- получила развитие вероятностная модель хрупкого разрушения, известная как «Прометей модель»: в частности получено соотношение для расчета вероятности разрушения элементарной ячейки и уточнена формулировка условия зарождения микротрещин скола. Разработана и апробирована процедура определения параметров усовершенствованной модели («Прометей-М»). Эта модель позволила описать разрушение образцов различного типа (образцы с трещиной, образцы с надрезом, гладкие образцы) при различных температурах испытаний и с различной степенью охрупчивания материала при одних и тех же параметрах модели;

- на основе модели «Прометей-М» модернизирован инженерный метод получения температурной зависимости трещиностойкости «Единая кривая» позволяющий прогнозировать температурную зависимость трещиностойкости (K_{JC}) в области хрупкого разрушения, для материалов с различной степенью охрупчивания как при низких, так и при высоких (до 350°C) температурах;

- разработана и апробирована процедура определения температурной зависимости $K_{JC}(T)$ для расчета сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов типа ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей (ОС). Для этого предложена методология введения и определения системы запасов, которые учитывают стохастическую природу хрупкого разрушения, пространственную неоднородность материала, ограниченное количество и тип испытываемых образцов. Получены уравнения для определения $K_{JC}(T)$ для расчета сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов типа ВВЭР;

- разработана методика определения коэффициента запаса, учитывающего пространственную неоднородность материала, исходя из рассмотрения критической температуры хрупкости (T_K) в зоне постулированного дефекта и T_K в зоне вырезки ОС как двух случайных величин из одной генеральной совокупности, а также исходя из допустимой вероятности разрушения корпуса реактора при выполнении условия прочности в детерминистической постановке;

- для исключения необходимости учета коэффициента запаса на тип образца предложена и обоснована модификация образцов типа Шарпи с трещиной и разработаны требования к технологии изготовления реконструированных образцов из обломов ранее испытанных образцов;

- разработана методика определения размера контура для определения J-интеграла для расчета прочности корпуса реактора при его аварийном расхолаживании.

Практическая значимость работы:

Результаты работы вошли в следующие нормативные документы АО «Концерн «Росэнергоатом»:

- 1.3.2.01.0061-2009 «Положение по контролю механических свойств металла эксплуатирующихся корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 по результатам испытаний образцов-свидетелей»;

- РД ЭО 1.1.2.09.0789-2012 «Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000»;

- РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012 «Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет»;

- МТ 1.1.4.02.1204-2017 «Расчет на СХР корпусов реакторов ВВЭР-440 (В-179, В-230) с учетом их отжига при продлении срока эксплуатации до 60 лет» - «Расчет на СХР корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000, в том числе прошедших отжиг при продлении срока эксплуатации до 60 лет» (проходит процедуру одобрения в «Ростехнадзоре»);

одобренный МАГАТЭ документ «Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation «VERLIFE» 2014г.

На базе указанных выше методик выполнено обоснование продления сроков эксплуатации до 60 лет КР ВВЭР-1000 блоков №1 и 2 Калининской АЭС, блоков №2, 3 и 4 Балаковской АЭС, блока №5 Нововоронежской АЭС и блока №5 АЭС Козлодуй (Болгария), а также обоснован срок эксплуатации 60 лет КР ВВЭР-1200 АЭС Ханхикиви (Финляндия) и выполняется обоснование продления сроков эксплуатации до 60 лет КР ВВЭР-440.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из 6 глав и выводов по диссертации. Библиографический указатель состоит из 162 источников.

В главе 1 проводится анализ существующей процедуры расчета корпусов ВВЭР и PWR (Pressurized water reactor) на СХР.

В главе 2 выполнен анализ и модернизация вероятностной модели хрупкого разрушения «Прометей». Уточнена формулировка условия зарождения микротрещин скола. Предложено новое уравнение для расчета вероятности хрупкого разрушения элементарной ячейки. Выполнена верификация модернизированной модели «Прометей-М» для образцов различного типа изготовленных из двух материалов с различной степенью охрупчивания.

В главе 3 выполнен анализ и модернизация метода «Единой кривой». Для этого с помощью модели «Прометей-М» выполнено моделирование зависимостей $K_{JC}(T)$ по трем вариантам: охрупчивание материала по неупрочняющему механизму, по упрочняющему механизму, и по двум механизмам одновременно для различных степеней охрупчивания материала. На основе нормализации указанных зависимостей получено новое уравнение для прогнозирования $K_{JC}(T)$ для различных степеней охрупчивания материала. Выполнена верификация нового уравнения путем сопоставления модернизированного метода с широко известным методом «Мастер кривая» и не модернизированной «Единой кривой».

В главе 4 выполнен анализ различных типов образцов-свидетелей и сформулированы предложения по повышению достоверности результатов их испытаний. Приложена и обоснована модификация образцов SEB-10 посредством нанесения на них глубоких боковых канавок. Проанализирована технология реконструкции образцов СТ из

обломков испытанных ранее образцов SEB-10 или Шарпи. Разработаны и обоснованы требования к технология реконструкции таких образцов.

В главе 5 разрабатывается методика построения расчетной кривой $K_{JC}(T)$ для расчета корпусов на СХР на основе испытаний образцов-свидетелей. Разработана и обоснована система запасов, учитывающих стохастическую природу хрупкого разрушения, неоднородность свойств материалов КР (основного металла и металла шва), ограниченное количество испытываемых образцов-свидетелей, а также возможное различие вязкости разрушения полномасштабных образцов и малоразмерных образцов-свидетелей. Получены зависимости для определения величины этих запасов. Для определения одного из них – запаса на пространственную неоднородность материала выполнено масштабное исследование неоднородности материалов КР и разработана процедура оценки вероятности хрупкого разрушения КР при условии выполнения условия прочности.

В главе 6 разрабатывается методика определения размера контура интегрирования J -интеграла для расчета КР на СХР при разгрузке, реализуемой на режиме аварийного расхолаживания. На базе расчетов выполненных МКЭ и по модели «Прометей» получена зависимость для определения размера контура интегрирования J -интеграла для расчета КР на СХР.

В выводах сформулированы основные результаты работы.

В качестве **замечаний** по диссертационной работе можно отметить следующее.

1. В работе не указаны границы применимости разработанных методов «Прометей-М» и «Модернизированной единой кривой» с точки зрения флюенса нейтронов.

2. В работе не указано какой же тип образцов-свидетелей является оптимальным, например СТ и SEB-10 с глубокими канавками.

3. Известно, что для образцов свидетелей «Мастер кривая» совпадает с «Единой кривой». Поэтому недостаточно ясно необходимость использования метода «Единой кривой» применительно к результатам обработки испытаний ОС.

4. Необходимость разработки процедуры расчета J -интеграла при разгрузке (которой посвящена глава 6) вызвано требованием руководящих документов проверять выполнение условия прочности как при нагружении так и при разгрузке до уровня 0,9 от максимального значения зависимости $K_J(T)$. По видимому, это требование было связано с несовершенством методов расчета J -интеграла. Возможно, в будущем, в связи с развитием расчетных методов и компьютерной техники необходимость в расчете J -интеграла при разгрузке будет изъято из руководящих документов.

5. Является ли условие $\dot{K}_J(t) < 0$ достаточным для разгрузки вблизи вершины трещины при аварийном расхолаживании?

Оценивая диссертационную работу в целом можно сделать следующие **выводы**.

1. Диссертация посвящена актуальной и практически важной теме – оценке сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов типа ВВЭР, и содержит без сомнения новые научные результаты.

2. Достоверность результатов подтверждена верификацией полученных расчетных данных и зависимостей на базе оригинальных экспериментальных данных, а также данных из литературных источников.

3. Результаты диссертационной работы хорошо освещены в научных публикациях автора и доложены на научных семинарах и конференциях высокого уровня.

4. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

На основе изложенного можно сделать вывод, что диссертация Валентина Николаевича Фоменко является научной работой, вносящей существенный вклад в

исследования хрупкого разрушения, в частности, материалов КР ВВЭР, и представляет теоретическую и практическую ценность. Работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение), а ее автор – Валентин Николаевич Фоменко, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании секции № 4, отделения 3.00 конструкционной целостности АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Протокол № 61 от 24 августа 2017 года).

Заместитель генерального конструктора –
начальник отделения
конструкционной целостности



С.И. Сероштан

Начальник отдела материаловедения

В.М. Комолов

Ученый секретарь отделения
конструкционной целостности

О.Ю. Петрова

Ознакомлен
28.08.17

