

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Фоменко Валентина Николаевича «Прогнозирование вязкости разрушения для расчета прочности корпусов реакторов типа ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей и локального критерия хрупкого разрушения» по специальности 05.16.09 –материаловедение (машиностроение)

Актуальность темы диссертации.

Корпуса легководных типов реакторов, к которым относятся реакторы ВВЭР, являются незаменимыми элементами конструкции и представляют собой сосуды высокого давления. Материалы корпусов реакторов (КР) претерпевают значительное охрупчивание под воздействием нейтронного облучения. Сочетание высокого давления, больших размеров КР и охрупчивания материала при эксплуатации, еще при проектировании реакторов I поколения, привело к необходимости рассматривать обоснование хрупкой прочности КР, как основу для их проектирования и безопасной эксплуатации реакторов в целом. Поэтому было принято решение сопровождать каждый реактор образцами-свидетелями (ОС), вырезанными из материалов сопровождаемого КР и облучаемых вместе с реактором. Результаты испытаний ОС предполагалось использовать как информацию, подтверждающую нормативные кривые, прогнозирующие охрупчивание материалов КР в процессе эксплуатации.

Для продления срока эксплуатации реакторов типа ВВЭР в первую очередь потребовалось адекватно оценить ресурс каждого реактора, с учетом индивидуальных свойств КР. В таком случае результаты испытаний ОС должны использоваться не как данные, подтверждающие, что нормативные зависимости консервативны, а как информация для построения индивидуальных нормативных кривых для каждого эксплуатируемого реактора. Решение задачи по использованию ОС именно в такой постановке намного сложнее, чем простое подтверждение консервативности нормативных трендов.

НИИ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 3163	в ДЕЛО
«01» 09 2017г.	№
Осн. 10 л.	подп.
Прил. л.	

Рецензируемая диссертационная работа решает задачу построения индивидуальных нормативных кривых для каждого реактора, которая до сих пор не была комплексно решена. Актуальность проведенных исследований подтверждается в частности тем, что результаты, полученные в рецензируемой диссертационной работе, вошли в состав методик, с использованием которых выполнено обоснование продления сроков эксплуатации до 60 лет отечественных КР ВВЭР-1000 и выполняется обоснование продления сроков эксплуатации до 60 лет КР ВВЭР-440.

Анализ диссертационной работы

В первой главе проанализирована «Нормативная процедура» расчета КР на сопротивление хрупкому разрушению (СХР) и обоснован вывод о необходимости построения индивидуальных нормативных кривых для материалов КР на основе результатов испытаний ОС на трещиностойкость.

Использование данных по трещиностойкости, полученных на малоразмерных ОС, влечет за собой необходимость решения большого количества задач, которые автор диссертации решает в последующих 4-х главах.

Думаю, что целесообразно перечислить эти задачи, рассмотреть пути их решения и дать соответствующие комментарии и замечания.

Первая задача – как на основании испытаний малоразмерных образцов, которые корректно могут быть испытаны только при низких температурах, получить представительную температурную кривую трещиностойкости в широком диапазоне температур. Данная задача, на первый взгляд, может быть просто решена при использовании Американского стандарта ASTM E 1921 по «Master Curve». Но этот стандарт не учитывает изменение формы кривой $K_{IC}(T)$ по мере охрупчивания материала, т.е. принимает, что при любой степени охрупчивания зависимость $K_{IC}(T-T_0)$ одна и та же, и мерой охрупчивания является референсная температура T_0 . Реально форма кривой $K_{IC}(T)$ изменяется, и поэтому метод «Master Curve» не рассматривается как приоритетный. Далее рассматривается метод «Единая кривая», разработанный ранее Марголиным Б.З. с соавторами. Данный метод лишен недостатков, присущих

«Master Curve», т.е. учитывает изменение формы кривой $K_{JC}(T)$. Этот метод также имеет недостаток - он дает чрезмерно консервативный прогноз при сильном охрупчивании материала.

Поскольку метод «Единая кривая» был разработан на базе модели хрупкого разрушения «Прометей», то логично, что надо начинать с модернизации модели «Прометей».

Следует отметить, что модернизация модели «Прометей» проведена успешно, т.к. модель позволила описать разрушение различных типов образцов при различных температурах для различных состояний материала с помощью одних и тех же коэффициентов, входящих в уравнения модели. Модель позволила дать адекватный прогноз не только для средних критических параметров, но и описать разброс этих параметров.

Основными вкладами в модернизацию модели «Прометей» являются формулировки уравнений, описывающих вероятность хрупкого разрушения при сложном нагружении материала, что характерно, например, для зоны у вершины притупляющейся трещины. Также к основным вкладам следует отнести зависимость для расчета влияния температуры на коэффициент концентрации локальных напряжений у дислокационного скопления m_T . Предложенная формулировка более физична, чем используемая ранее.

По «Прометей» модели имеются два замечания.

1. Коэффициенты C_1 , C_2 и A_d получены на базе обработки результатов испытаний методом наименьших квадратов, а дальнейшие расчеты выполняются с помощью распределений Вейбулла. Достаточно ли обоснован такой подход?

2. Согласно уравнению (2.9) при термоактивированной части предела текучести, равной нулю, значение m_T также равно нулю. Как это можно объяснить с физической точки зрения.

При дальнейшем изложении все замечания и вопросы будут нумероваться сквозной нумерацией.

Следующей задачей, решаемой в диссертации, была модернизация метода «Единая кривая» с помощью модернизированной модели «Прометей». Как

показано в работе, модернизированный метод «Единая кривая» позволяет прогнозировать $K_{JC}(T)$ точнее, чем метод «Master Curve» и, при высоких степенях охрупчивания, точнее, чем немодernизированный метод «Единая кривая». Таким образом, модернизированный метод, несомненно, является значимым продвижением в разработке инженерных методов прогнозирования $K_{JC}(T)$.

Данный результат получен на базе верификации упомянутых 3-х методов применительно к обширной базе данных по трещиностойкости, которая включает представительные данные по отечественным и по заграничным реакторным сталям.

По построению модернизированного метода «Единая кривая» имеются следующие вопросы и замечания.

3. Как может измениться метод «Единая кривая», если соотношение вклада между упрочняющим и неупрочняющим механизмом охрупчивания будет отличаться от принятого в диссертации?

4. Можно ли использовать параметр σ для сопоставления качества различных методов при условии, что трещиностойкость всегда имеет разброс, описываемый распределением Вейбулла?

Крупной задачей, решенной в диссертации, является разработка методологии системы запасов и их определение для построения индивидуальных нормативных кривых $K_{JC}(T)$ для КР. Данная задача разбивается на подзадачи:

а) введение запаса на ограниченное количество испытанных ОС. Эта задача является классической задачей статистической обработки данных, и она выполнена строго на базе известных уравнений математической статистики;

б) учет «малоразмерности» ОС, который приводит к снижению жесткости напряженного состояния у вершины трещины, и как следствие, к завышению трещиностойкости материала.

Решение данной задачи приводится по двум направлениям.

В первом направлении на базе сопоставления данных по трещиностойкости представительных и малоразмерных образцов вводится эмпирическая поправка на малоразмерность образца.

По данному вопросу имеется замечание - вопрос.

5. Почему значение $T_{100}^{CT} - T_{100}^{SEB-10}$ уменьшается с увеличением степени охрупчивания материала?

Во втором направлении исследований предлагается физически модернизировать ОС.

Перспективной является модернизация ОС посредством нанесения на них глубоких боковых канавок. Данная модернизация ведёт к увеличению стесненности деформации в образце и обеспечивает представительные результаты.

Следует отметить предложенный метод реконструкции ОС, а по сути создания компактных представительных образцов типа СТ на базе обломков из испытанных ОС. В работе используется широкий арсенал численных методов (МКЭ), методов механики разрушения и теории сварочных напряжений и деформаций. Данные методы применены для обеспечения минимизации влияния технологии реконструкции на величину K_{JC} . По данному комплексу работ получен патент.

По обоснованию технологии реконструкции ОС возникает вопрос.

6. Почему предел текучести обоймы может быть ниже предела текучести вставки. По-видимому, в этом случае может происходить предпочтительное деформирование обоймы, что может привести к завышению трещиностойкости.

в) учет пространственной неоднородности по свойствам материалов КР.

Хотя в диссертации эта проблема рассматривается как подзадача по введению необходимых коэффициентов запаса, по сути, данная проблема является самостоятельной задачей, которая решена в диссертации.

В рамках решения задачи предложена методика определения запаса на пространственную неоднородность. Методика базируется на объединении условий прочности КР в детерминистической и вероятностной постановках.

Поскольку запас вводится в расчет прочности КР в детерминистической постановке, величина запаса должна быть такой, чтобы при достижении детерминистического критерия хрупкого разрушения (с точки зрения детерминистического расчета условие прочности КР уже не выполнено), вероятность разрушения КР была меньше допустимой.

Для разработки метода оказалось необходимым решить задачу расчета вероятности разрушения КР с учетом вероятности аварийных режимов, данных неразрушающего контроля и данных о свойствах материала, представленных в вероятностной постановке. Потребовалось выполнить огромный объем работ по определению реальных распределений свойств материала, отражающих трещиностойкость основного металла и металла шва.

По данной задаче имеется замечание.

7. При расчете вероятности разрушения КР вероятность пропуска дефекта рассматривается в зависимости от его площади, но независимо от его ориентации. Однако эта вероятность зависит от ориентации дефекта.

В последней главе диссертации рассматривается задача, несколько отстоящая от построения $K_{JC}(T)$, но необходимая для расчета прочности КР. Эта задача касается разработки методики расчета J-интеграла в задаче об аварийном расхолаживании КР, когда материал у вершины трещины может подвергаться не только нагружению, но и разгрузке.

Предложено оригинальное решение формально нерешаемой задачи. Предлагается в качестве параметра, контролирующего НДС у вершины трещины, рассматривать два параметра: J-интеграл и размер контура интегрирования J-интеграла, задаваемый определенным образом.

В результате прочность КР будет определяться с минимальной консервативностью и высокой точностью.

По данной задаче имеется замечание.

8. При определении зависимости критического размера контура от K_{JC} не учтено влияние формы контура, которая может влиять на условие разгрузки внутри зоны ограниченной контуром КР на СХР.

По оформлению диссертационной работы хочу отметить следующее замечание. Введение написано к каждой главе, но введение ко всей диссертации не выделено, что затрудняет анализ работы и написание отзыва.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки выполненной работы.

На основании проведенного анализа можно дать следующие характеристики диссертационной работе.

Научная новизна.

Несомненно, научной новизной обладают следующие полученные результаты.

Получила развитие вероятностная модель хрупкого разрушения, известная как «Прометей модель»: в частности получено соотношение (2.31) для расчета вероятности разрушения элементарной ячейки и уточнена формулировка условия зарождения микротрещин скола (2.10). 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» (не путать с аналогичной терминологией теории пластичности) позволяющий прогнозировать температурную зависимость трещиностойкости (K_{IC}), для материалов с различной степенью охрупчивания как при низких, так и при высоких (до 350°C) температурах (рис.3.11).

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

образцов. Получено уравнение (5.73) 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.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведенной обширной верификацией разработанных моделей и методов с использованием большого объема экспериментальных данных полученных в различных российских, европейских и американских лабораториях. В частности при верификации метода «Модернизированной Единой кривой» использованы результаты испытаний около 1500 образцов, а при определении величины запаса на пространственную неоднородность более 1000 образцов. И использованные экспериментальные данные получены на сертифицированном оборудовании, а при обработке этих данных использованы ГОСТы РФ, руководящие документы «Концерн «Росэнергоатом» и стандарты ASTM.

Достоверность полученных результатов подтверждается, в частности, успешной эксплуатацией объектов энергетики (автореферат, стр.6), обоснование сроков эксплуатации которых проведено с использованием в том числе разработанных методик.

Практическая значимость работы.

Результаты работы вошли в следующие нормативные документы «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»);
- а также в одобренный МАГАТЭ документ «Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation «VERLIFE» 2014.

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.

Заключение.

Диссертация В.Н.Фоменко выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, в которой получены новые и значимые результаты. Работа прошла достаточную апробацию на семинарах и конференциях.

Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих изданиях: 19 статей в лицензируемых журналах, из них 11 – в журналах из перечня ВАК; имеется один патент РФ.

Автореферат соответствует основным положениям диссертации.

Диссертационная работа В.Н.Фоменко «Прогнозирование вязкости разрушения для расчета прочности корпусов реакторов типа ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей и локального критерия хрупкого разрушения», соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор Фоменко Валентин Николаевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
кафедра «Гидравлика и прочность», профессор



Мельников Борис Евгеньевич



Почтовый адрес: 195251, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, д.29. Телефон: 8(800) 707-18-99,
e-mail: office@spbstu.ru

Удостоверено
04.09.17
Б