

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Фоменко Валентина Николаевича на тему
«Прогнозирование вязкости разрушения для расчета прочности корпусов реакторов
типа ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей и локального критерия
хрупкого разрушения»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Корпус реактора (КР) является важнейшим элементом ВВЭР с точки зрения обеспечения безопасности и определения ресурса энергоблока атомной электростанции. В процессе эксплуатации материал КР подвергается комплексному воздействию интенсивного нейтронного облучения и высокой температуры, что приводит к деградации механических свойств стали, из которой изготовлен корпус. Контроль текущего состояния и прогнозирование свойств материала КР выполняется на базе испытаний образцов-свидетелей (ОС). В связи с этим **актуальность работы** - прогнозирование вязкости разрушения для расчета прочности корпусов реакторов ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей не вызывает сомнения. С непосредственным участием автора настоящей диссертации в последние несколько лет были разработаны нормативные документы по расчету прочности и ресурса КР ВВЭР-1000, что свидетельствует о **новизне и практической значимости** диссертации.

Необходимо специально отметить масштабность **цели** диссертационной работы – разработка методологии построения температурной зависимости трещиностойкости $K_{IC}(T)$ для материалов КР на основе испытаний образцов-свидетелей, а также разработка методики для определения размера контура интегрирования J-интеграла для расчета КР на сопротивление хрупкому разрушению при его аварийном расхолаживании.

В результате проведенных исследований был решен ряд задач, самые главные из которых, по моему мнению, следующие:

НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»		
доу	Вх. № <u>3086</u>	в ДЕЛО
	<u>25.08.2014</u> г.	№ _____
	Осн. <u>5</u> л.	подп. _____
	Прил. _____ л.	

- Модернизация и верификация вероятностной модели хрупкого разрушения «Прометей» и ее инженерного приложения – метода прогнозирования $K_{Jc}(T)$ «Единая кривая» (Unified Curve);
- Разработка методологии определения запасов при расчете сопротивления хрупкому разрушению материалов КР, а также установление запасов на:
 - пространственную неоднородность свойств материалов КР;
 - стохастическую природу хрупкого разрушения,
 - ограниченное количество испытываемых ОС,
 - тип ОС, используемых для построения расчетной кривой $K_{Jc}(T)$;
- Обоснование модернизации ОС и установление требований к технологии ее выполнения с целью получения представительных данных по трещиностойкости материалов КР;
- Разработка методики определения размера контура интегрирования J-интеграла для расчета КР на сопротивление хрупкому разрушению при аварийном расхолаживании.

В процессе выполнения диссертационной работы проведено сравнение расчетного метода «Модернизированной Единой кривой» с используемым для корпусов реакторов PWR методом «Мастер кривой» (стандарт ASTM E 1921). Показано, что при малой степени радиационного охрупчивания материала оба метода дают примерно одинаковый прогноз, а при средней и высокой степени охрупчивания ($T_0 > 0^\circ\text{C}$), результаты расчета по методу «Модернизированной Единой кривой» более адекватно отражают экспериментальные данные.

Автором предложен метод изготовления компактных образцов типа СТ из обломков ОС, уже испытанных на вязкость разрушения или ударную вязкость. На базе комплекса расчетов определена последовательность выполнения сварных швов, при которой обеспечивается минимальный уровень остаточных сварочных напряжений в зоне материала у вершины трещины. Определены допустимые значения предела текучести базового материала в зависимости от предела текучести вставки, при которых напряженно-деформированное состояние реконструированных образцов соответствует стандартному состоянию.

диссертационной работы заключается в том, что разработанные методики по оценке вязкости разрушения для расчета прочности корпусов ВВЭР на основе испытаний ОС вошли в Руководящие документы ОАО «Концерн Росэнергоатом» и в настоящее время используются для продления и обоснования срока эксплуатации действующих реакторных установок ВВЭР-1000, а также для обоснования срока эксплуатации КР проектируемых ВВЭР.

Большим достоинством диссертации следует признать включение разработанной методологии построения расчетной зависимости $K_{IC}(T)$ для КР ВВЭР на основе образцов-свидетелей в международный код МАГАТЭ “Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs (VERLIFE)”.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Для оценки запаса на неоднородность свойств основного металла и сварных швов КР автором выполнен детальный анализ вариации критической температуры хрупкости стали. Однако кроме этой характеристики материала КР следовало бы рассмотреть и другие расчетные параметры, в частности, склонность стали к радиационному охрупчиванию, оцениваемую в диссертации по величине Ω .

2. Автор утверждает, что величина ΔT_K , обусловленная облучением, слабо зависит от значения T_K в исходном состоянии (T_{KO}). Однако известно, что при повышении содержания никеля в стали T_{KO} снижается, а ΔT_K под облучением растет. Таким образом, снижение T_{KO} может приводить к увеличению ΔT_K , обусловленного облучением.

3. Величину запаса на тип образца при отсутствии боковых надрезов (15°C) автор обосновывает тем, что на основании результатов испытаний ОС выполняется прогноз $K_{IC}(T)$ на конец срока эксплуатации, т.е. рассматривает металл с высокой степенью охрупчивания. Однако большинство испытаний ОС проводятся после облучения флюенсом нейтронов ниже проектного. В этих случаях, в соответствии с приведенными в диссертации экспериментальными

данными, различие между результатами испытаний образцов СТ и малоразмерных образцов может достигать 20 °С.

4. В случае испытаний образцов с боковыми надрезами суммарной глубины 50% от толщины образца, исходя из данных, приведенных в диссертации, для обеспечения консервативности расчета $K_{IC}(T)$ следует принять температурный запас 5 °С.

5. В разделе 5.3. диссертации приведена формула для расчета погрешности определения параметра Ω , вызванной ограниченным числом образцов. Кроме этого следовало бы привести рекомендацию по количеству образцов, необходимому для достоверного установления данного расчетного параметра.

6. При обосновании представительности результатов испытаний реконструированных образцов (в части доказательства отсутствия перегрева в зоне у вершины трещины при сварке облученного металла) автор рассматривает область, ограниченную радиусом 2 мм от центра вставки, что требует дополнительного пояснения. Кроме того, нельзя исключить, что зафиксированный кратковременный нагрев облученной стали до 320 °С приведет к частичному восстановлению пластичности облученной при 290 °С стали.

7. Из текста диссертации не ясно, выполняются ли боковые надрезы на вставке реконструируемых образцов.

Приведенные выше замечания не снижают актуальность, научную новизну и практическую ценность диссертации.

Диссертационная работа В.Н. Фоменко представляет собой завершенное научное исследование, имеющее большое практическое значение. Все выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы, достоверны и подтверждены результатами комплексных экспериментальных исследований материалов корпуса ВВЭР-1000. В рамках диссертационной работы выполнен анализ большого массива экспериментальных данных с точки зрения механики разрушения. Научная общественность ознакомлена с основными результатами работы, опубликованными в России и за рубежом, а также доложенными на российских и международных научно-технических конференциях.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации, а ее автор Фоменко Валентин Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 - Материаловедение (машиностроение).

доктор технических наук,
главный научный сотрудник



Александр Михайлович Крюков

Федерального бюджетного учреждения
«Научно-технический центр по ядерной и
радиационной безопасности»

(ФБУ «НТЦ ЯРБ»),

г. Москва, ул. Малая Красносельская, д.2/8, корп. 5,

Тел.: (499) 264-03-31,

E-mail: kryukov@secnrs.ru

Подпись Крюкова А.М. заверяю,
ученый секретарь ФБУ «НТЦ ЯРБ», к.т.н.



В.И. Плеханов

Ознакомлен
28.08.17

