

Оценка применимости модели деформации оболочек твэлов для топлива реакторов ВВЭР-1000

Исследуется применимость модели деформации оболочек твэлов расчетного кода RELAP5/MOD3.2 к условиям топлива ВВЭР-1000 с оболочками из сплава Zr+1 % Nb. Для этого используются экспериментальные данные и результаты, полученные на расчетной модели канала тепловыделяющей сборки активной зоны. Применимость модели деформации оболочек твэлов проверена в интервале температур от 600 до 1200 °C и интервале перепадов давления от 1 до 12 МПа. Результаты оценки показывают, что данные встроенной модели деформации твэлов кода RELAP5/MOD3.2 могут быть применены к оценке разрушения оболочек твэлов из сплава Zr+1 % Nb только в определенной, ограниченной области параметров. Это приводит к необходимости учета результатов данной оценки при использовании модели деформации оболочек твэлов расчетного кода RELAP5/MOD3.2 в анализе проектных аварий для реакторов ВВЭР.

Ключевые слова: деформация оболочки твэла, разрушение оболочки твэла, RELAP5/MOD3.2, максимальная проектная авария, анализ проектных аварий.

Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин

Оцінка застосовності моделі деформації оболонок твелів розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 для палива реакторів ВВЕР-1000

Досліджується застосовність моделі деформації оболонок твелів розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 до умов палива ВВЕР-1000 з оболонками зі сплаву Zr+1 % Nb. Для цього використовуються експериментальні дані та результати, отримані на розрахунковій моделі каналу тепловидільної збірки активної зони. Застосовність моделі деформації оболонки перевірено в інтервалі температур від 600 до 1200 °C та інтервалі перепадів тиску від 1 до 12 МПа. Результати оцінки свідчать, що дані вбудованої моделі деформації твелів коду RELAP5/MOD3.2 можуть бути застосовані до оцінки руйнування оболонок твелів із сплаву Zr+1 % Nb лише в певній, обмеженій області параметрів. Це свідчить про необхідність урахування результатів цієї оцінки в разі використання моделі деформації оболонок твелів розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 в аналізі проектних аварій для реакторів ВВЕР.

Ключові слова: деформація оболонки твела, руйнування оболонки твела, RELAP5/MOD3.2, максимальна проектна аварія, аналіз проектних аварій.

© Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин, 2015

Расчетный компьютерный код RELAP5/MOD3.2 широко используется в подготовке материалов анализа безопасности украинских АЭС для оценки параметров реакторной установки при авариях. Код RELAP5/MOD3.2 содержит внутренние встроенные модели, одна из которых — модель деформации оболочек твэлов. Так как встроенная модель деформации оболочек твэлов базируется на данных, полученных для оболочек из циркалоя, возникает необходимость оценки ее применимости к условиям топлива ВВЭР-1000: тепловыделяющие сборки (ТВС) ВВЭР-1000 российского производства имеют оболочки твэлов из сплава Э110 (Zr + 1 % Nb), который по своим свойствам отличается от циркалоя.

В данной работе проводится оценка применимости модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 к условиям ТВС ВВЭР-1000, даются рекомендации по ее использованию в анализе аварий для топлива российского производства.

Модель деформации оболочки в коде RELAP5/MOD3.2. В расчетный код RELAP5/MOD3.2 встроена эмпирическая модель деформации оболочек твэлов, которая может использоваться совместно с моделью динамической проводимости газового зазора [1]. Данная модель призвана учесть пластическую деформацию оболочки при увеличении температуры в процессах с разгерметизацией первого контура (течи). Модель может сообщить пользователю о наличии разрыва оболочки и ввести блокировку в гидравлический канал путем увеличения местного сопротивления.

Модель учитывает наличие напряжений в оболочке твэла и скорость нагрева. При вычислении температуры разрушения используются экспериментальные данные по оболочкам из циркалоя. Затем по интерполяционной таблице в зависимости от температуры разрушения и скорости разогрева определяются деформация после разрыва и соответствующая блокировка канала (рис. 1, а, б).

После определения момента разрыва оболочки твэла в модели расчетного кода RELAP5/MOD3.2 давление внутри твэла выравнивается с давлением теплоносителя и устанавливаются дополнительные коэффициенты гидравлического сопротивления на связях ниже и выше места разрыва оболочки. Код RELAP5/MOD3.2 не позволяет моделировать развитие пластической деформации во времени; таким образом, используемая модель является стационарной.

Параметры температур и давления при МПА. В детерминистическом анализе безопасности реакторов ВВЭР в качестве максимальной проектной аварии (МПА), по отношению к которой обосновывается достаточность характеристик систем аварийного охлаждения активной зоны, рассматривается двухсторонний разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ). Такая авария характеризуется быстрым снижением давления первого контура, сопровождающимся стремительным ростом температуры оболочек твэлов, что приводит к возникновению значительных растягивающих напряжений в твэлах. Изменение параметров реакторной установки при разрыве холодной нитки ГЦТ рассчитывалось с использованием кода RELAP5/MOD3.2 для модели, описание которой представлено в [2].

В развитии аварии можно выделить две стадии. На начальной стадии (около 0—10 с) давление первого контура снижается с одновременным разворотом потока в активной зоне, что приводит к скачкообразному повышению температуры оболочек твэлов (рис. 2, а). Скорость повышения температуры достигает 300 °C/с и затем снижается до 50 °C/с к 5-й секунде. При этом перепад давления

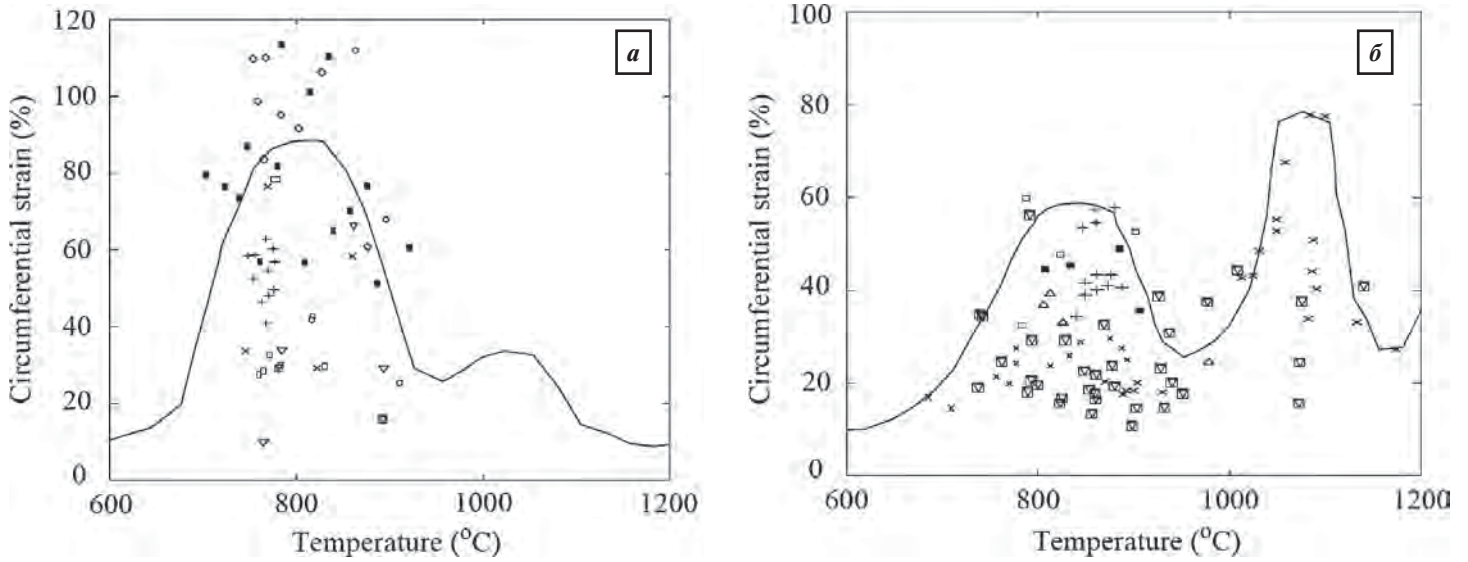


Рис. 1. Максимальная деформация как функция температуры разрыва оболочки твэла из цирколия в паровой среде при скорости нагрева: *а* — менее 10 °C/c [1]; *б* — более 25 °C/c [1]; точками показаны экспериментальные данные, использованные для разработки модели, сплошная кривая соответствует расчетному поведению модели в коде RELAP5/MOD3.2

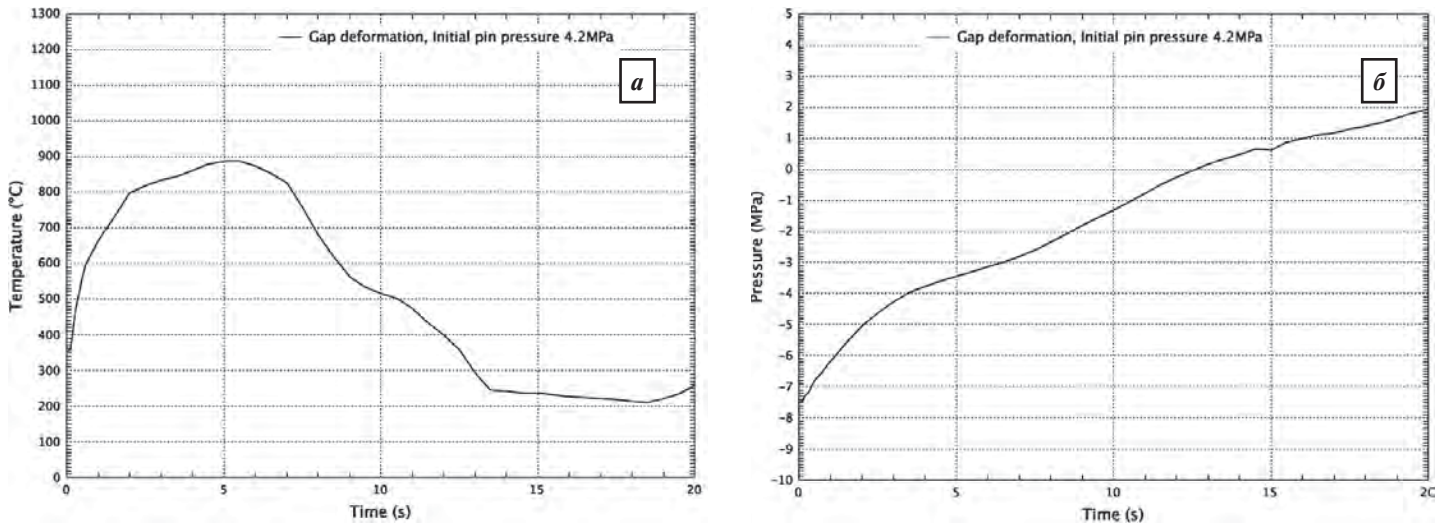


Рис. 2. Начальная стадия МПА: *а* — максимальная температура оболочки твэла; *б* — перепад давления на оболочке твэла

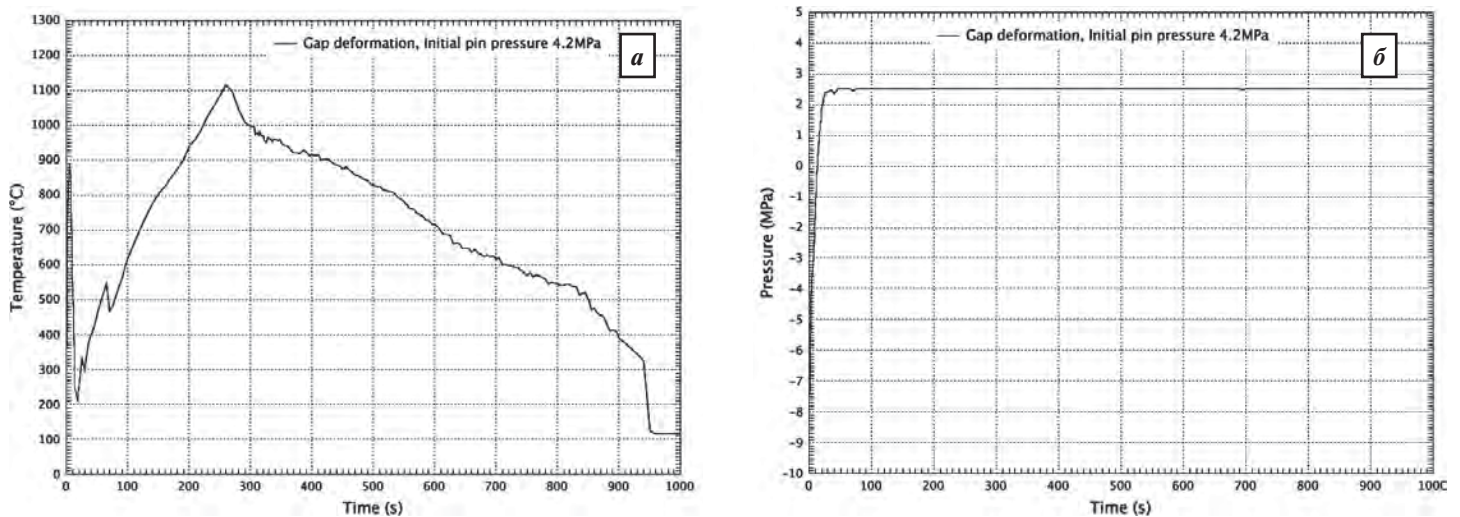


Рис. 3. МПА: *а* — максимальная температура оболочки твэла; *б* — перепад давления на оболочке твэла

на оболочке твэла равномерно увеличивается и достигает нулевого значения к 12-й секунде, что означает переход от сжимающих напряжений к растягивающим в оболочке твэла (рис. 2, б). С этого момента давление внутри оболочки твэла превышает давление снаружи, что может привести к ее вздутию под действием заполняющего твэла газа с последующим разрывом.

На второй, медленной стадии повторного залива конкурирующие процессы парообразования в активной зоне и поступления воды сверху и снизу активной зоны приводят к более плавному увеличению температуры до высоких значений со скоростью 3–7 °C/c (рис. 3, а). Давление под оболочкой твэла остается практически постоянным за счет постоянной температуры газа в объеме газосборника. Для начального давления в твэле при номинальных параметрах 4,2 МПа давление в твэле на второй стадии составляет около 2,5 МПа (рис. 3, б).

На второй стадии аварии возможны деформации оболочек твэлов за счет внутреннего давления и потери упругих свойств оболочек из-за их перегрева.

Оценка модели деформации оболочек твэлов при больших скоростях нагрева. Для сравнительного анализа встроенной модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 с экспериментальными данными для оболочек твэлов из сплава Э110 смоделирован отдельный канал ТВС, состоящий из горячих твэлов. Снаружи канал охлаждается потоком газа. Требуемая скорость изменения температуры оболочки твэла достигается изменением температуры топливного сердечника. Давление газа внутри твэла поддерживается заданием условий по температуре в отдельном объеме, который объявляется связанным с моделью газосборника твэла. Для различных значений давления внутри твэла моделируется повышение температуры оболочки твэла с заданной скоростью до достижения разрыва. После разрыва фиксируются температура оболочки твэла, деформация оболочки (относительная) и блокировка сечения канала.

Сравнение с экспериментальными значениями при большой скорости изменения температуры оболочек твэлов из сплава Э110, характерной для первой стадии МПА, представлено на рис. 4, а. Экспериментальная зависимость температуры разрыва оболочки от перепада давления получена в диапазоне максимальных пиков температуры 760–1450 °C и перепадов давления на оболочке 1–12 МПа при средних скоростях разогрева 23–96 °C/c и максимальных скоростях до 227 °C/c [3]. При этом стандартная ошибка экспериментальных данных составила 19 °C (на рис. 4, а граница погрешности представлена величиной в две стандартные ошибки).

Видно, что для оболочек из сплава Э110 при перепадах давления от 1,5 до 5 МПа модель деформации оболочек в коде RELAP5/MOD3.2 завышает температуру разрушения приблизительно на 70 °C, т. е. приводит к более позднему разрушению. В остальной части диапазона перепада давления (5–12 МПа) наблюдается достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Результаты сравнения расчетных данных деформации с экспериментальными данными (рис. 4, б) свидетельствует о том, что встроенная модель деформации в RELAP5/MOD3.2 позволяет предсказать с приемлемой точностью увеличение деформаций при перепаде давления 1,5–2 МПа, однако при перепаде выше 3,5–4,5 МПа совпадение данных нельзя считать удовлетворительным. Отметим также явное завышение расчетной деформации

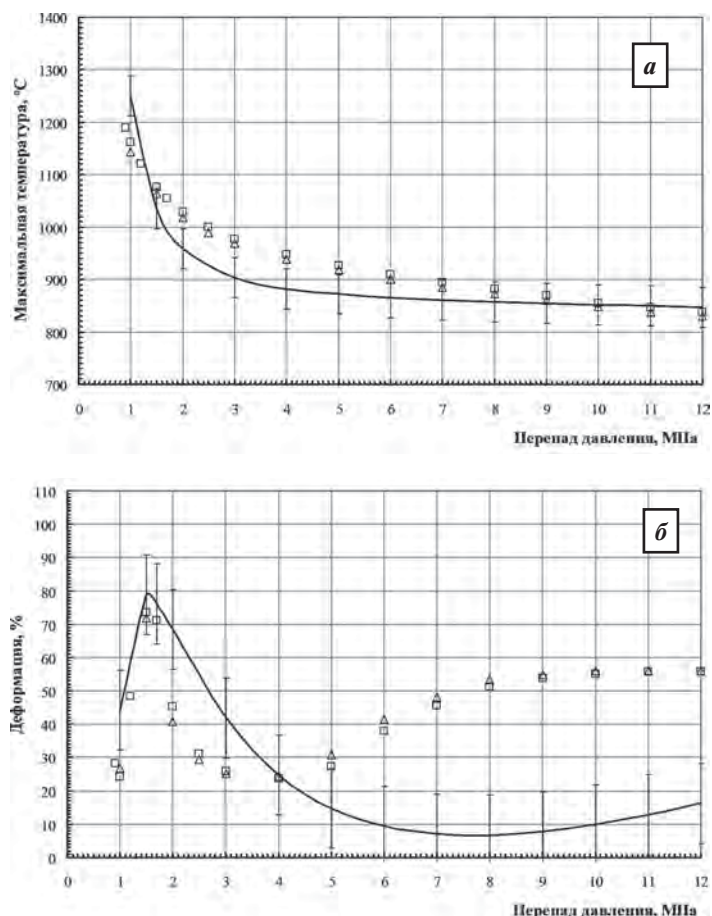


Рис. 4. Зависимость температуры разрыва (а) и деформации (б) оболочки твэла из сплава Э110 от перепада давления для процессов с быстрым изменением температуры: — экспериментальная зависимость; □ расчет RELAP, 200 °C/c; Δ расчет RELAP, 25 °C/c

по сравнению с экспериментом при давлении более 5 МПа. Экспериментальная зависимость получена со стандартной ошибкой 6 % (на рис. 4, б граница погрешности представлена величиной в две стандартные ошибки).

Оценка модели деформации оболочек твэлов при малых скоростях нагрева. Для второй стадии аварии с разрывом ГЦТ характерны малые скорости разогрева оболочек. Фактически деформирование оболочек на данной стадии можно считать изотермическим. На данной стадии начинает играть роль процесс развития деформации во времени, который явно не учитывается моделью деформации оболочки в коде RELAP5/MOD3.2. По этой же причине наблюдается значительный разброс экспериментальных данных. В данной работе используются для сравнения экспериментальные данные, полученные из общедоступных источников. На рис. 5, а представлены данные изотермического нагружения (экспериментальная серия 1) и с медленным разогревом (экспериментальная серия 2) [4]. Видно, что полученные с использованием RELAP5/MOD3.2 результаты фактически ограничивают сверху область экспериментальных данных, завышая температуру повреждения, хотя часть данных серии 2 (с медленным разогревом) хорошо согласуется с расчетными результатами.

Полученные в экспериментах данные по деформации оболочки твэла из сплава Э110 имеют большой разброс (рис. 5, б), что характерно для опытов с разрывами

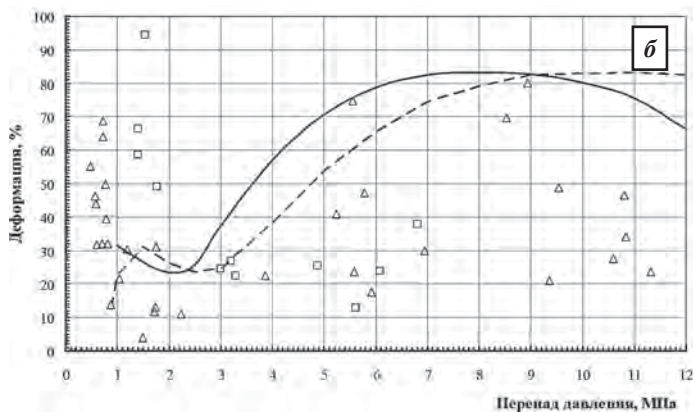
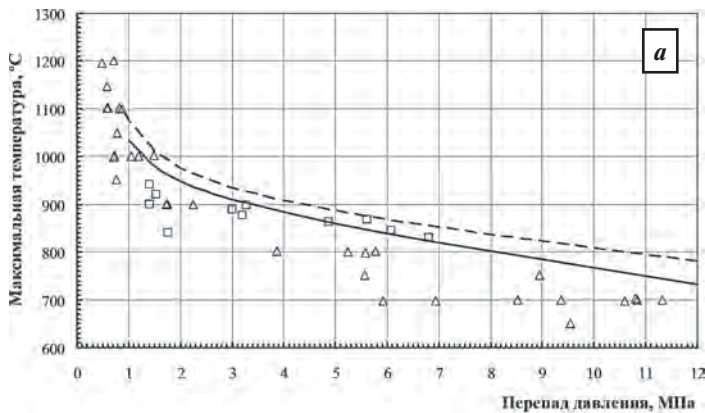


Рис. 5. Зависимость температуры разрыва (а) и деформации (б) оболочки твэла из сплава Э110 от перепада давления для процессов с медленным изменением температуры: — расчет RELAP, 1 °С/с; --- расчет RELAP, 10 °С/с; Δ экспериментальная серия 1 (изотермическое нагружение); □ экспериментальная серия 2 (медленный разогрев, 6,4...13,5 °С/с)

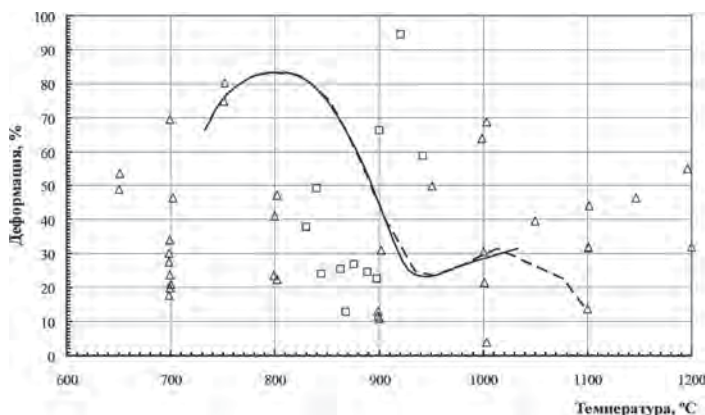


Рис. 6. Зависимость деформации оболочки твэла из сплава Э110 от температуры для процессов с медленным изменением температуры: — расчет RELAP, 1 °С/с; --- расчет RELAP, 10 °С/с; Δ экспериментальная серия 1 (изотермическое нагружение); □ экспериментальная серия 2 (медленный разогрев, 6,4...13,5 °С/с)

оболочек (см., например, [5]). Тем не менее, видно, что при перепадах давления более 3 МПа оценки с использованием встроенной модели RELAP5/MOD3.2 превышают значения деформации, полученные экспериментально. Область перепадов давлений менее 2 МПа является неопределенной. Эксперименты свидетельствуют

о возможности значительной деформации при данных перепадах давления, что также не отражается моделью RELAP5/MOD3.2.

Сравнение деформации в зависимости от температуры тоже свидетельствует о большом разбросе данных и необходимости учета временных характеристик развития процесса при детальном моделировании (рис. 6). При учете модели деформации RELAP5/MOD3.2 в расчетах возможно обоснованное использование консервативных предположений.

Выводы

Проведено сравнение экспериментальных данных по деформации оболочек твэлов для топлива ВВЭР-1000 с расчетными данными встроенной модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2. При большой скорости нагрева оболочки твэла (более 25 °С/с) расчетные данные по температуре разрушения оболочки удовлетворительно согласуются с экспериментальными. При перепадах давления от 1,5 до 5 МПа расчетные данные завышают температуру приблизительно на 70 °С, т. е. приводят к более позднему разрушению. Деформация оболочки при этом совпадает удовлетворительно только в интервале перепадов давления 3,5—4,5 МПа.

При малой скорости нагрева (около 1—7 °С/с) данные RELAP5/MOD3.2 по температуре разрушения фактически ограничивают сверху область экспериментальных данных для оболочек из сплава Э110, завышая температуру повреждения. Аналогичный вывод можно сделать и о степени деформации оболочек при разрушении.

В целом, встроенная модель деформации твэлов для кода RELAP5/MOD3.2, которая базируется на данных, полученных по оболочкам твэлов из циркалоя, может быть применена к оценке разрушения оболочек твэлов из сплава Э110 только в ограниченной области параметров. Использование встроенной модели во всей области значений температуры оболочек твэлов и перепадов давления не позволяет получить приемлемую сходимость с доступными экспериментальными данными для оболочек из сплава Э110 и без введения специальных консервативных предположений не оправданно для анализа проектных аварий энергоблоков АЭС с ВВЭР. В дальнейшем необходимо оценить влияние использования данной модели на степень блокировки сечения горячего канала и расчетное значение максимальной температуры оболочек твэлов при МПА.

Список использованной литературы

1. RELAP5/MOD3. Code manual. —Vol. I : Code structure, system models, and solution methods. — Idaho, 1995. — 414 p. — (NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. Formerly EGG-2596).
2. Розробка багатоцільової теплогідрравлічної моделі ЯПВУ із ВВЕР-1000/320. Деталізація основних компонентів моделі : Звіт про науково-дослідну роботу / ДНТЦ ЯРБ. — К., 2010. — 788 с. — № держреєстрації 0109U008229.
3. Исследование живучести оболочек твэл из сплавов Э110 и Э635 на первой стадии максимальной проектной аварии / Г. В. Каретников, А. С. Богданов, Ю. А. Безруков, А. М. Трушин, В. П. Оншин, А. В. Смирнов // Тр. четвертой науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 23—26 мая 2005 г. [Электронный ресурс] — Режим доступа : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005>

4. Experimental database of E110 claddings under accident conditions / E. Perez-Fery, Cs. Györi, L. Matus, L. Vasáros, Z. Hyzer, P. Windberg, L. Maryti, M. Horváth, I. Nagy, A. Pintür-Csordás, T. Novotny. — Budapest, 2007. — 103 p. — (AEKI-FRL-2007-123-01/01.)

5. Оценка разгерметизации твэлов ВВЭР в проектных авариях / А. А. Гончаров, А. В. Кумачов, А. В. Медведев, О. А. Нечаева, В. В. Новиков, А. В. Онуфриев, А. В. Салатов, П. В. Федотов // Тр. четвертой науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 23–26 мая 2005 г. — [Электронный ресурс] — Режим доступа : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005>

References

1. RELAP5/MOD3 Code Manual: Vol. I: Code Structure, System Models and Solution Methods, Idaho, 1995, 414p., NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. (Formerly EGG-2596).

2. Development of Multipurpose Thermohydraulic Four-Looped Model of NPP with VVER-1000/320. Detailing the Model Main Components (Final Stage): R&D Report [Zvit pro naukovo-doslidnu robotu. Rozrobka bahatotsilivovoi teplohidravlichnoi modeli YaPVU iz VVER-1000/320. Detalizatsiia osnovnykh komponentiv modeli], SSTC NRS, Kyiv, 2010, No. 0109U008229 (Ukr).

3. Karetnikov, G.V., Bogdanov, A.S., Bezrukov, Yu. A., Trushin, A. M., Onshin, V.P., Smirnov, A.V. (2005), “Study of Survivability of Cladding Made of E110 and E635 Alloys on First Phase of Maximal Design Accident” [Issledovaniie zhivuchesti obolochek tvel iz splavov E110 i E635 na pervoi stadii maksimal’noi proektnoi avarii], Proceedings of the fourth Scientific and Technical Conference “Safety Assurance of NPPs with VVER”, Podolsk, May 23–26, 2005, available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005> (Rus)

4. Perez-Fery, E., Györi, Cs., Matus, L., Vasáros, L., Hyzer, Z., Windberg, P., Maryti, L., Horváth, M., Nagy, I., Pintür-Csordás, A., Novotny, T. (2007), “Experimental Database of E110 Claddings under Accident Conditions”, Budapest, 103p., AEKI-FRL-2007-123-01/01.

5. Goncharov, A.A., Kumachov, A.V., Medvedev, A.V., Nechaeva, O.A., Novikov, V.V., Onufriev, A.V., Salatov, A.V., Fedotov, P.V. (2005), “Estimation of VVER Rods Rupture in Design-Basis Accidents” [Otsenka razgermetizatsii tvelov VVER v proektnykh avariakh], Proceedings of the fourth Scientific and Technical Conference “Safety Assurance of NPPs with VVER”, Podolsk, May 23–26, 2005. (Rus)

Получено 10.03.2015.