

## Применение модели деформации оболочек твэлов расчетного кода RELAP5/MOD3.2 для топлива реакторов ВВЭР-1000 при анализе проектных аварий

Используя экспериментальные данные и упрощенную модель канала тепловыделяющей сборки активной зоны, исследуется применимость встроенной модели деформации оболочки твэла расчетного кода RELAP5/MOD3.2 для топлива ВВЭР-1000 с оболочками из сплава Zr+1 %Nb. Применимость модели проверена для степени блокировки горячего канала после распухания и разрыва оболочек твэлов при нагреве в интервалах температур от 600 до 1200 °С и перепадов давления от 1 до 12 МПа. Показано, что данные встроенной модели могут быть использованы в оценке разрушения оболочек твэлов ВВЭР-1000 из сплава Zr+1 %Nb только в определенной ограниченной области параметров. Проведена оценка влияния параметров модели на максимальную температуру оболочки при максимальной проектной аварии. Даны рекомендации по использованию встроенной модели деформации оболочки твэлов расчетного кода RELAP5/MOD3.2 в анализе проектных аварий энергоблоков с реактором ВВЭР-1000.

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

Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин, М. В. Франкова

### Застосування моделі деформації оболонок твелів розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 для палива реакторів ВВЕР-1000 в аналізі проектних аварій

Використовуючи експериментальні дані й спрощену модель каналу тепловідільної збірки активної зони, досліджується застосовність вбудованої моделі деформації оболонки твела розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 для палива ВВЕР-1000 з оболонками зі сплаву Zr+1 %Nb. Застосовність моделі перевірено для ступеня блокування гарячого каналу після розпухання та розриву оболонок твелів за умов нагрівання в інтервалах температур від 600 до 1200 °С та перепадів тиску від 1 до 12 МПа. Показано, що дані вбудованої моделі можуть бути застосовані до оцінки руйнування оболонок твелів ВВЕР-1000 зі сплаву Zr+1 %Nb лише в певній обмеженій області параметрів. Проведено оцінку впливу параметрів моделі на максимальну температуру оболонки за умов максимальної проектно аварії. Надано рекомендації щодо використання вбудованої моделі деформації оболонки твела розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 в аналізі проектних аварій енергоблоків з реактором ВВЕР-1000.

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

© Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин, М. В. Франкова, 2016

Расчетный компьютерный код RELAP5/MOD3.2 широко используется при подготовке материалов анализа безопасности украинских АЭС для оценки выполнения критериев безопасности при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях. Код RELAP5/MOD3.2 содержит внутренние встроенные модели, одна из которых — модель деформации оболочек твэлов. Эта модель позволяет учесть пластическую деформацию оболочки при увеличении температуры в процессах с разгерметизацией первого контура (течи). Поскольку в модели деформации оболочек твэлов используются зависимости, полученные для материала циркалоя, применяемого в твэлах западных реакторов, возникает необходимость оценки её применимости для твэлов российского производства для реакторов ВВЭР-1000. В тепловыделяющих сборках (ТВС) ВВЭР-1000 оболочки твэлов выполнены из сплава Э110 (Zr+1 %Nb), который по своим свойствам отличается от циркалоя.

Цель статьи — провести оценку применимости модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 к условиям ТВС ВВЭР-1000 с точки зрения блокировки сечения ТВС, оценить ее влияние на развитие максимальной проектной аварии, дать рекомендации по использованию встроенной модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 в анализе аварий.

**Модель деформации оболочки в коде RELAP5/MOD3.2.** В расчетном коде RELAP5/MOD3.2 реализована модель деформации оболочек твэлов, которая может использоваться одновременно с моделью динамической проводимости газового зазора [1]. Как было сказано выше, модель деформации оболочки твэла призвана учесть пластическую деформацию оболочки при увеличении температуры в процессах с разгерметизацией первого контура (течи), а также позволяет пользователю определить наличие разрыва оболочки и учесть блокировку сечения гидравлического канала путем увеличения местного сопротивления.

Модель учитывает наличие напряжений в оболочке твэла и скорость нагрева, в результате чего можно определить температуру разрушения. При этом используются экспериментальные данные по оболочкам из циркалоя. Затем по интерполяционной таблице определяется деформация после разрыва и соответствующая степень блокировки канала.

После разрыва оболочки твэла в модели расчетного кода RELAP5/MOD3.2 давление внутри твэла становится равным давлению окружающей жидкости; на связях ниже и выше места разрыва устанавливаются дополнительные коэффициенты гидравлического сопротивления. В коде RELAP5/MOD3.2 не предусмотрена возможность моделировать развитие пластической деформации во времени, и используемая модель является, таким образом, стационарной.

**Параметры температур и давления при максимальной проектной аварии (МПА).** В детерминистическом анализе безопасности в качестве МПА рассматривается двухсторонний разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), который сопровождается резким снижением давления первого контура и приводит к возникновению наибольших растягивающих напряжений в твэлах. В развитии аварии можно выделить две фазы. На начальной фазе, через 0—10 секунд после возникновения исходного события, происходит резкое снижение давления первого контура с одновременным разворотом потока в активной зоне, что приводит к скачкообразному повышению температуры оболочек твэлов. Скорость повышения температуры достигает 300 °С/с и затем снижается до 50 °С/с

к 5-й секунде. При этом перепад давления на оболочке твэла равномерно увеличивается и достигает нулевого значения к 12-й секунде, что означает переход от сжимающих напряжений к растягивающим в оболочке твэла. С этого момента давление внутри оболочки твэла превышает давление снаружи, и поэтому возможна ее деформация наружу с последующим разрывом.

На второй, медленной фазе повторного залива активной зоны 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/с. При этом давление под оболочкой твэла остается практически постоянным за счет того, что температура газосборника постоянная. Для начального давления в твэле 4,2 МПа значение давления под оболочкой твэла после повторного залива составляет около 2,5 МПа.

**Оценка влияния модели деформации оболочек твэлов на блокировку сечения гидравлического канала.** Оценка использования встроенной модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 для индивидуальных твэлов выполнена в [2]. Далее рассматривается использование указанной модели для пучков твэлов.

Основная блокировка проходного сечения ТВС при МПА возможна на второй фазе аварии, которая характеризуется медленным возрастанием температуры, что при наличии положительного перепада давления на оболочках твэлов приводит к их деформации и блокировке проходного сечения канала.

Для сравнения встроенной модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 с экспериментальными данными моделируется канал ТВС с горячим твэлом внутри. Снаружи канал охлаждается потоком газа. Требуемая скорость изменения температуры оболочки твэла достигается изменением температуры топливного сердечника. Давление внутри твэла поддерживается за счет условий в объеме газосборника. Для различных значений давления внутри твэла моделируется повышение температуры оболочки твэла с заданной скоростью до достижения разрыва. После разрыва фиксируются температура

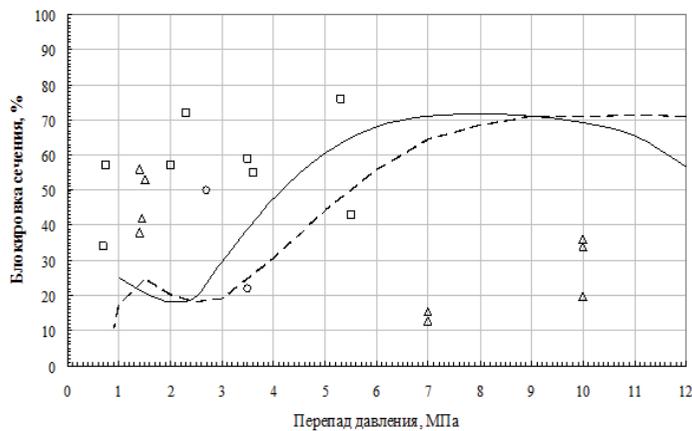


Рис. 1. Зависимость блокировки сечения горячего канала от перепада давления для процессов с быстрым изменением температуры:

— Расчет RELAP, 10 °C/с — — Расчет RELAP, 1 °C/с Δ Эксперимент, серия 1  
 □ Эксперимент, серия 2 ○ Эксперимент, серия 3

оболочки твэла, деформация оболочки (относительная) и степень блокировки сечения канала.

При экспериментальном определении влияния деформации оболочки твэла важно оценить блокировку сечения горячего канала в пучке твэлов. В этом случае учитывается взаимное влияние твэлов и совместное блокирование проходного сечения. Сравнение результатов расчета RELAP5/MOD3.2 с характерными для второй фазы МПА экспериментальными значениями для оболочек твэлов из сплава Э110 представлено на рис. 1.

Экспериментальные данные взяты из [3] (серия 1), [4] (серия 2) и [5] (серия 3). Как отмечалось ранее при оценке деформаций индивидуальных твэлов, при давлении внутри твэлов 2–3,5 МПа модель RELAP5/MOD3.2 приводит к заниженному значению степени блокировки сечения ТВС; при давлении более 3,5 МПа характерно завышенное значение степени блокировки.

**Оценка влияния опций модели деформации оболочек твэлов на максимальную температуру оболочки при МПА.** Для оценки влияния опций встроенной модели деформации оболочек твэлов кода RELAP5/MOD3.2 проведен расчет МПА для различных вариантов давления внутри твэлов с консервативными предположениями, характерными для анализа проектных аварий с использованием теплогидравлической модели реакторной установки ВВЭР-1000 [6]. За начальные значения давления газа под оболочкой твэла выбраны 4,2 МПа (соответствует давлению в свежих твэлах), 6 МПа и 8 МПа (давление в твэлах с выгоранием, что приводит к дополнительному количеству газа под оболочкой).

Результаты расчета максимальной температуры оболочки твэла на начальной фазе МПА представлены на рис. 2.

На начальной фазе расчета использование модели деформации оболочки твэла дает более низкие значения температуры оболочки по причине учета термического расширения топлива и сокращения газового зазора между топливом и оболочкой. В этом случае сохранение увеличенного газового зазора, соответствующего «холодным» размерам твэлов на начальной фазе МПА, является более консервативным.

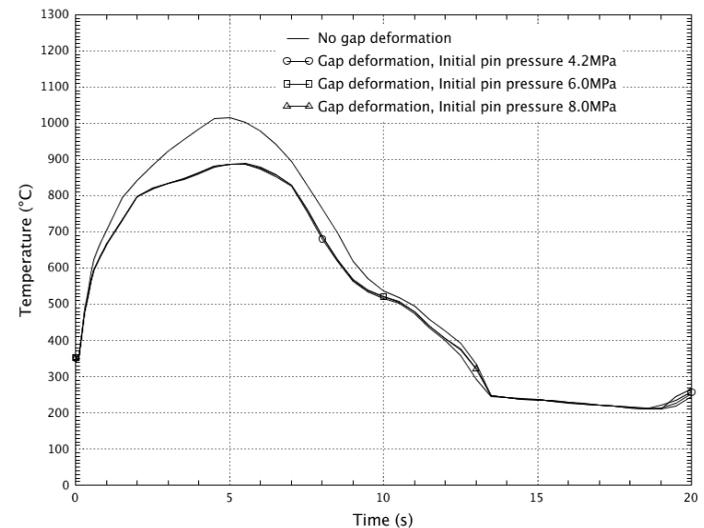


Рис. 2. Максимальная температура оболочки твэла на начальной фазе МПА

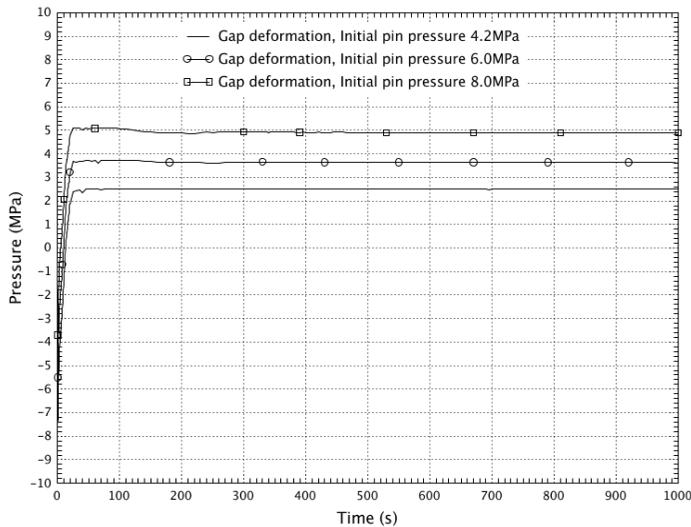


Рис. 3. Перепад давления на оболочке твэла при МПА

Перепад давления на оболочке твэла представлен на рис. 3. Давление определяется свойствами гидравлического объема, с которым контактирует газосборник твэлов (верхняя часть твэлов).

Результаты расчета максимальной температуры оболочек твэлов при второй фазе МПА даны в табл. 1. Для второй фазы МПА вывод о возможности использования модели деформации оболочек твэлов не является однозначным (рис. 4). Наибольшая температура получена для начального давления в твэлах 6 МПа при степени блокировки сечения 37,4 %. При этом в проектном расчете [7] предполагалось наличие блокировки приблизительно в 56%.

Таблица 1. Результаты расчета максимальной температуры оболочек твэлов при МПА

Вариант расчета МПА	Температура воды САОЗ, °С	Второй пик температуры оболочек, °С	Максимальная блокировка сечения, %
Без использования модели деформации оболочки твэла	70	1148	0
Начальное давление под оболочкой 4,2 МПа	70	1116	21,8
Начальное давление под оболочкой 6,0 МПа	70	1194	37,4
Начальное давление под оболочкой 8,0 МПа	70	1044	60,4

При повторном заливе увеличение блокировки горячего канала затрудняет движение пара вверх. Меньшая скорость движения пара вверх с использованием корреляции противотока жидкости и пара (см. CCFL [1])

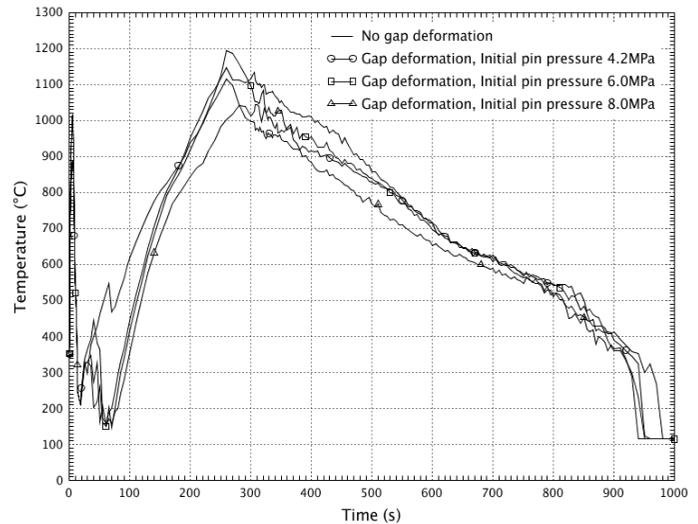


Рис. 4. Максимальная температура оболочки твэла при МПА

благоприятствует поступлению воды сверху в горячий канал от источников залива активной зоны, что может привести к более раннему снижению температуры.

### Выводы

В статье проведено сравнение экспериментальных данных по блокировке сечения ТВС для топлива ВВЭР-1000 с расчетными данными встроенной модели деформации оболочки твэла расчетного кода RELAP5/MOD3.2. Вывод об оценке влияния степени блокировки горячего канала при расчете МПА с применением кода RELAP5/MOD3.2 для второй фазы МПА не является однозначным, так как наибольшая температура оболочек твэлов получена для начального давления в твэлах 6 МПа при степени блокировки сечения 37,4 %, в то время как при блокировке 60,4 % значение температуры меньше. Вариант без учета встроенной модели деформации оболочки в расчетном анализе также приводит к значительному увеличению максимальной температуры оболочек. Тем не менее, все полученные данные не приводят к превышению максимального проектного предела повреждения твэлов (максимальная температура оболочек не превышает 1200 °С).

Полученные результаты по моделированию блокировки сечения потока в активной зоне при расчете МПА в анализе проектных аварий необходимо использовать с соблюдением консервативного подхода, принятого при выполнении такого анализа. Степень блокировки канала можно регулировать, задавая определенное начальное значение давления в горячем твэле. Сравнение с вариантом расчета без учета блокировки канала и с учетом блокировки позволит определить наиболее консервативное значение целевого параметра анализа (максимальной температуры оболочек твэлов).

### Список использованной литературы

1. NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. (Formerly EGG-2596). Vol. I: RELAP5/MOD3 Code manual. — Vol. I: Code structure, system models and solution methods. — Idaho, 1995. — 414 p.

2. Воробьев Ю. Ю. Оценка применимости модели деформации оболочек твэл расчетного кода RELAP5/MOD3.2 для топлива реакторов ВВЭР-1000 / Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин // Ядерная радиационная безопасность. — 2015. — № 4 (64). — С. 17–21.

3. Логвинов С. А. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР-1000 / С. А. Логвинов, Ю. А. Безруков, Ю. Г. Драгунов. — М., 2004. — 254 с.

4. AEKI-FRL-2007-123-01/01. Experimental database of E110 claddings under accident conditions. — Budapest, 2007. — 103p.

5. IAEA-TECDOC-1320. Fuel behaviour under transient and LOCA conditions. Proceedings of a Technical Committee meeting held in Halden, Norway, 10–14 September 2001. — Vienna, 2002. — 294 p.

6. Розробка багатотільової теплогідравлічної моделі ЯПВУ із ВВЕР-1000/320. Деталізація основних компонентів моделі : Звіт про науково-дослідну роботу / ДНТЦ ЯРБ. — К., 2010. — 788 с. — № держреєстрації 0109U008229.

7. Реакторная установка В-320. Техническое описание и информация по безопасности. — Гл. 31: Обоснование безопасной эксплуатации реакторной установки В-320 с активной зоной с тепловыделяющими сборками альтернативными на энергоблоках АЭС Украины и Болгарии (с извещением об изменении № 320.3590) / ОКБ «Гидропресс». — М., 2003. — 260 с. — Инв. № 320.00.00.00.000.D61.

## 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. Vorobyov, Yu.Yu., Zhabin, O.I. (2015), “Applicability Verification of Cladding Deformation Model in RELAP5/MOD3.2 Code for VVER-1000 Fuel” [Otsenka primenimosti modeli deformatsii obolochek tvel raschetnogo koda RELAP5/MOD3.2 dlia topliva reaktorov VVER-1000], Nuclear and Radiation Safety, No. 2 (50), pp. 13–19. (Rus)

3. Logvinov, S.A., Bezrukov, Yu.A., Dragunov, Yu.G. (2004), “Experimental Justification of Thermalhydraulic Reliability of VVER-1000 Reactors” [Eksperimental’noe obosnovaniye teplogidravlicheskoj nadiozhnosti reaktorov VVER-1000], Moscow, 2004, 254 p. (Rus)

4. Experimental Database of E110 Claddings under Accident Conditions, Budapest, 2007, 103p., AEKI-FRL-2007–123-01/01.

5. Fuel Behaviour under Transient and LOCA Conditions. Proceedings of a Technical Committee Meeting Held in Halden, Norway, 10–14 September 2001, Vienna, 2002, 294 p., IAEA-TECDOC-1320.

6. 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 teplohivdravlichnoi modeli YaPVU iz VVER-1000/320. Detalizatsiia osnovnykh komponentiv modeli], SSTC NRS, Kyiv, 2010, No. 0109U008229. (Ukr)

7. Reactor V-320. Technical Description and Information on Safety. Chapter 31: Justification of Safe Operation of V-320 Reactor with Core with Alternative Fuel Assemblies for NPPs of Ukraine and Bulgaria (with Notice of Change No. 320.3590) [Reaktornaia ustanovka V-320. Tekhnicheskoe opisanie i informatsiia po bezopasnosti. Glava 31: Obosnovaniye bezopasnoi ekspluatatsii reaktornoj ustanovki V-320 s aktivnoi zonoj s teplovydeliaushchimi sborkami alternativnymi na energoblokakh AES Ukrainy i Bolgarii (s izveshcheniem ob izmenenii No. 320.3590), ОКБ “Гидропресс”, Moscow, 2003, 260 p., Inv. No. 320.00.00.00.000.D61. (Rus)

Отримано 18.07.2016.