

А. В. Кучин, Ю. Н. Овдиенко,
В. А. Халимончук

Государственный научно-технический центр по ядерной
и радиационной безопасности

Консервативный анализ реактивностных аварий (RIA) с использованием модели пространственной кинетики

Представлено описание методологии консервативного анализа реактивностных аварий с использованием модели трехмерной кинетики активной зоны. Показано, что только трехмерная методология может рассчитывать на адекватность получаемых результатов, для любой другой более упрощенной методологии трехмерная методология является критерием оценки возможности ее использования. Сделан вывод о необходимости использования в анализах RIA расчетных средств, в которых реализована трехмерная кинетика, что должно быть отражено в нормативных документах.

О. В. Кучин, Ю. М. Овдієнко, В. А. Халімончук

Консервативний аналіз реактивнісних аварій (RIA) із застосуванням моделі просторової кінетики

Наведено опис методології консервативного аналізу реактивнісних аварій із застосуванням моделі тривимірної кінетики активної зони. Показано, що тільки тривимірною методологією може розраховувати на адекватність отримуваних результатів, для будь-якої іншої, більш спрощеної методології тривимірною методологією є критерієм оцінки можливості її використання. Зроблено висновок про необхідність застосування в аналізах RIA розрахункових засобів, у яких реалізовано тривимірну кінетику, що має бути відображено в нормативних документах.

В соответствии с нормативными документами (НД) Украины детерминистический анализ проектных аварий (АПА) должен выполняться на основе консервативного подхода, когда при моделировании рассматриваемого события для различных параметров и характеристик реактора принимаются значения, которые заведомо приводят к более неблагоприятным результатам. Кроме того, действующие НД ориентируют на использование в АПА методологий и инструментария, соответствующих современным достижениям науки и техники, что находится в полном соответствии с рекомендациями МАГАТЭ. При выборе методологии анализа аварий типа RIA необходимо руководствоваться разумной целесообразностью и достаточностью. Понятно, что адекватное моделирование режимов с существенными пространственными деформациями поля энерговыделения, к числу которых относятся и реактивностные аварии, может быть выполнено только при использовании моделей трехмерной кинетики активной зоны. Тем не менее, еще и сегодня в анализе RIA используются методологии (например, фирмы «Вестингауз»), основанные на применении модели точечной или одномерной кинетики активной зоны. Прямое применение этих упрощенных моделей кинетики в RIA невозможно, но считается, что разработанные на их основе методологии обеспечивают максимально консервативную оценку безопасности реактора. Это достигается:

за счет использования пикинг-фактора, значение которого берется из стационарного расчета одного из состояний реактора, которые могут реализоваться в ходе переходного процесса, связанного с рассматриваемым исходным событием;

благодаря учету действия обратных связей на основе задаваемых значений коэффициентов реактивности (в отличие от кодов трехмерной кинетики, где коэффициенты реактивности определяются нейтронно-физическими константами).

Ниже показано, что выбор состояния активной зоны для оценки пикинг-фактора нетривиален. Он может быть однозначно обоснован только на основе результатов моделирования RIA в трехмерной геометрии. Поэтому трехмерные расчеты являются огибающими и охватывают все многообразие состояний активной зоны реактора. Они позволяют анализировать аварийные процессы в консервативном приближении без ущерба для модели, описывающей физику процессов в активной зоне, что невозможно выполнить при использовании точечной или одномерной моделей кинетики. Только трехмерная методология может рассчитывать на адекватность получаемых результатов, для любой другой более упрощенной методологии трехмерная методология является критерием оценки возможности ее использования.

1. Консервативный подход к исследованию RIA с помощью кодов трехмерной кинетики

Основными задачами при использовании трехмерной модели кинетики активной зоны в анализе RIA является формирование в исходном состоянии:

пространственного распределения энерговыделения, обеспечивающего в процессе аварии локальные консервативные значения температур топлива, теплоносителя и оболочки твэла;

интегральных параметров реактора (коэффициенты реактивности, кинетические параметры и др.), которые

определяются нейтронно-физическими и теплофизическими свойствами активной зоны и не могут быть заданы напрямую.

При этом необходимо сохранить особенности поведения активной зоны с точки зрения нейтронно-физических и теплогидравлических свойств конкретной компоновки и загрузки реактора и возможность адекватно отслеживать изменение деформации плотности потока нейтронов.

Рассмотрим использование этого подхода на примере аварийного режима, связанного с выбросом кластера в ВВЭР-1000.

1.1. Выбор консервативных начальных и граничных условий

Консервативные значения исходного уровня мощности, расхода теплоносителя через активную зону, давления, величины уставок срабатывания АЗ и т. д. определяются исходя из эксплуатационных пределов, погрешностей их определения и обеспечения развития аварии по худшему сценарию аналогично подходу, применяемому и при использовании точечной модели.

Консервативные значения коэффициентов реактивности достигаются с помощью корректировки сечения размножения на тепловых нейтронах в пределах точности его знания. Для рассматриваемого здесь режима выброса кластера для состояния, соответствующего началу кампании при реальных значениях коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя (α_{Tm}), плотности теплоносителя (α_ρ) и температуре топлива (α_{Tf}), равных $-31 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$; $+13,3 \text{ \%}/(\text{г}/\text{см}^3)$ и $-2,1 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/(^\circ\text{C})$, соответствующей коррекцией были получены $\alpha_{Tm} = -9,3 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$, $\alpha_\rho = +1,9 \text{ \%}/(\text{г}/\text{см}^3)$ и $\alpha_{Tf} = -1,45 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/(^\circ\text{C})$.

Консервативные значения доли запаздывающих нейтронов и скоростей нейтронов рассчитываются для выгорания топлива, при котором реализуется минимальное значение $\beta_{эф}$ (для существующих топливных циклов консервативное значение $\beta_{эф} = 0,0045$ реализуется при максимальной глубине выгорания, равной $54,0 \text{ МВт} \cdot \text{сут}/\text{кг}$).

Консервативное значение эффективности выбрасываемого кластера обеспечивается путем полного погружения ОР СУЗ до нижних концевых выключателей (НК), а также пространственной деформацией поля нейтронов с помощью корректировки концентрации ядер ксенона в районе выбрасываемого кластера (для рассматриваемого ниже варианта моделирования исходного события «выброс кластера» с помощью описанного подхода эффективность выбрасываемого кластера увеличена до $0,26 \text{ \%}$).

Консервативные значения мощности максимально нагруженных твэлов/твэггов обеспечиваются путем формирования «горячего канала» с предельным профилем энерговыделения (1-й профиль — с максимумом в нижней части активной зоны, 2-й — в центре и 3-й — с максимумом в верхней части активной зоны, рис. 1). При этом относительная мощность максимально нагруженного твэла активной зоны составляет $k_r^{\text{консер}} = 1,74$ и определяется исходя из максимально допустимого коэффициента неравномерности в энерговыделении твэлов по радиусу активной зоны ($k_r^{\text{доп}} = 1,5$) с учетом инженерного коэффициента неравномерности по подогреву теплоносителя, равного $1,16$.

Консервативное значение эффективности АЗ обеспечивается выбором из технологического регламента безопасной эксплуатации (ТРБЭ) минимально допустимого значения, устанавливаемого для этой характеристики в зависимости от исходного уровня мощности реактора, с учетом погрешности определения (5 \%). Такая эффективность в рассматриваемом ниже моделировании выброса кластера

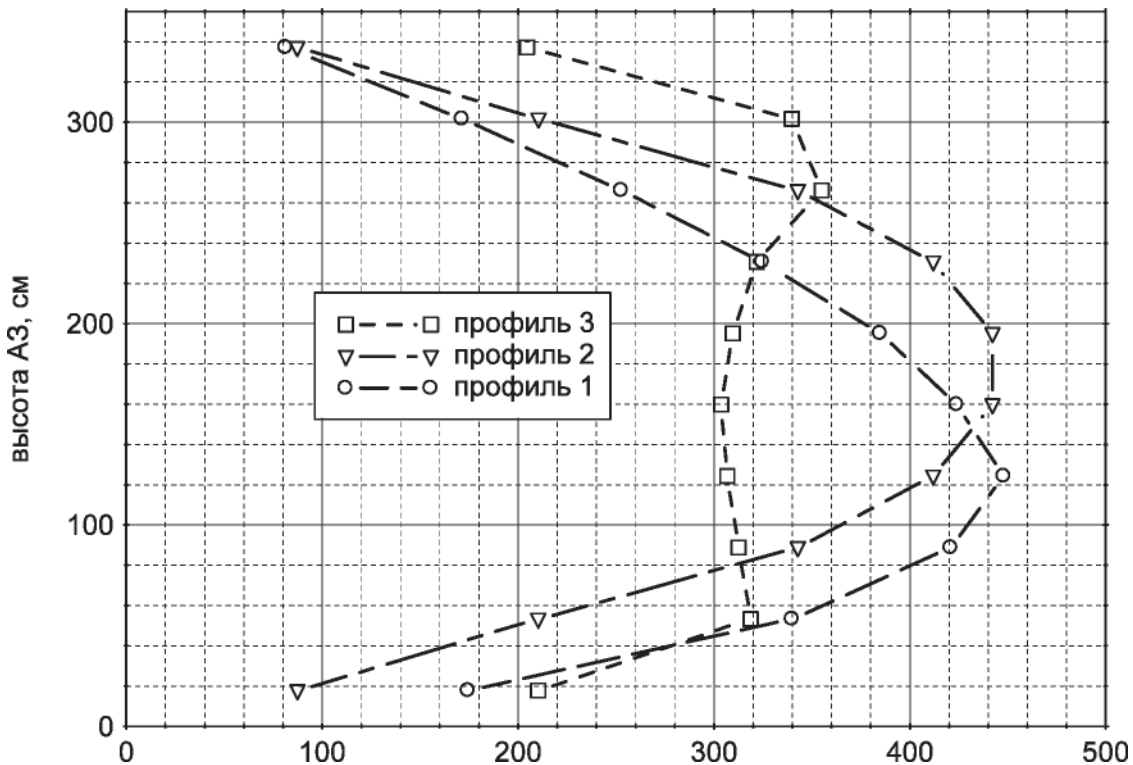


Рис. 1. Аксиальное распределение линейной нагрузки мощности максимально нагруженного твэла/твэгга, принятое в исследованиях

Таблица 1. Интегральные параметры РУ в исходном состоянии перед выбросом кластера

Параметр состояния	Единица измерения	Значение
Мощность реактора	МВт (%)	3120 (104%)
Расход теплоносителя через реактор	кг/с	16030
Температура теплоносителя на входе в реактор	°С	291,5
Температура теплоносителя на выходе из активной зоны	°С	325,2
Температура теплоносителя на выходе из максимально энергонапряженной кассеты	°С	335,5
Подогрев теплоносителя в реакторе	°С	33,7
Максимальная мощность ТВС / № ТВС	МВт	25,5 / 64

Таблица 2. Локальные характеристики наиболее напряженного твэла/твэга в исходном состоянии РУ перед выбросом кластера

Параметр состояния	Единица измерения	Значение
Максимальный тепловой поток с поверхности твэла / № слоя: профиль 1 профиль 2 профиль 3	Вт/см	448 / 4 448 / 6 360 / 8
Максимальная температура наружной поверхности оболочки твэла / № слоя: профиль 1 профиль 2 профиль 3	°С	350,8 / 5 350,8 / 6 350,2 / 8
Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена / № слоя: профиль 1 профиль 2 профиль 3		1,91 / 7 1,68 / 8 1,80 / 10
Максимальная температура топлива / № слоя: профиль 1 профиль 2 профиль 3 (твэл) профиль 3 (твэг)	°С	1925 / 4 1907 / 6 1634 / 8 1757 / 8
Максимальный тепловой поток с поверхности твэла / № слоя: профиль 1 профиль 2 профиль 3	Вт/см	448 / 4 448 / 6 360 / 8

достигается путем невведения части ОР СУЗ (девяти кластеров 6-й группы). Кроме того, принимается, что один из застрявших кластеров (принцип единичного отказа) находится в непосредственной близости от ТВС с наиболее напряженным твэлом и, таким образом, в переходном процессе после срабатывания АЗ в этой области спад мощности менее интенсивен.

Время введения ОР СУЗ принято равным наибольшему проектному значению — 4 с.

Для получения максимальной температуры и энтальпии топлива формируется максимально энергонапряженный канал с минимальной проводимостью газового зазора топливо—оболочка (горячий канал в ТВС № 99 для исследования твэла и твэга с различными профилями энерговыделения).

Для получения максимальной температуры оболочки твэла/твэга и минимального коэффициента запаса до кризиса теплообмена формируется максимально энергонапряженный канал с максимальной проводимостью газового зазора топливо—оболочка (горячий канал в ТВС № 99 для исследования твэла и твэга с различными профилями энерговыделения).

Сформированные консервативные значения интегральных параметров РУ для исходного состояния представлены в табл. 1, а для локальных характеристик наиболее напряженного твэла/твэга — в табл. 2.

1.2. Краткое рассмотрение результатов расчета

Характер изменения реактивности, нейтронной и тепловой мощности (рис. 2) и других интегральных характеристик активной зоны принципиально не отличается от полученного с использованием точечной кинетики.

По результатам трехмерного моделирования следует отметить, что изменение во времени относительного энерговыделения ТВС (k_q) происходит не только из-за выброса кластера, но и вследствие деформации поля энерговыделения из-за погружения стержней аварийной защиты (рис. 3—6; см. изменение относительной мощности исследуемой ТВС № 99, находящейся вблизи выбрасываемого кластера из ТВС № 85). После выброса кластера в $t = 0,1$ с значение k_q для этой ТВС равно 2,06, в начале движения стержней по сигналу АЗ k_q уменьшается до 1,88 ($t = 1,5$ с), потом возвращается приблизительно к исходному значению после выброса ($t = 2,5$ с) и далее в момент времени $t = 3,5$ с увеличивается до значения 2,17.

Гораздо более существенным деформациям на этом же интервале времени подвергаются аксиальные поля энерговыделения (рис. 7, 8, 9). В совокупности радиальные и аксиальные деформации приводят к тому, что максимальные значения температур топлива и оболочек твэла/твэга переходят из слоя в слой (рис. 10, 11, 12), зависят от исходного профиля энерговыделения и будут достигаться в более позднее время, если сравнивать с методологией, основанной на точечной модели кинетики с аналогичным моментом времени срабатывания АЗ и характером погружения ОР СУЗ в активную зону.

Использование трехмерной модели обеспечивает в полной степени консервативный подход при анализе реактивных аварий. При этом сохраняются особенности поведения активной зоны реактора с точки зрения протекания нейтронно-физических и теплогидравлических процессов,

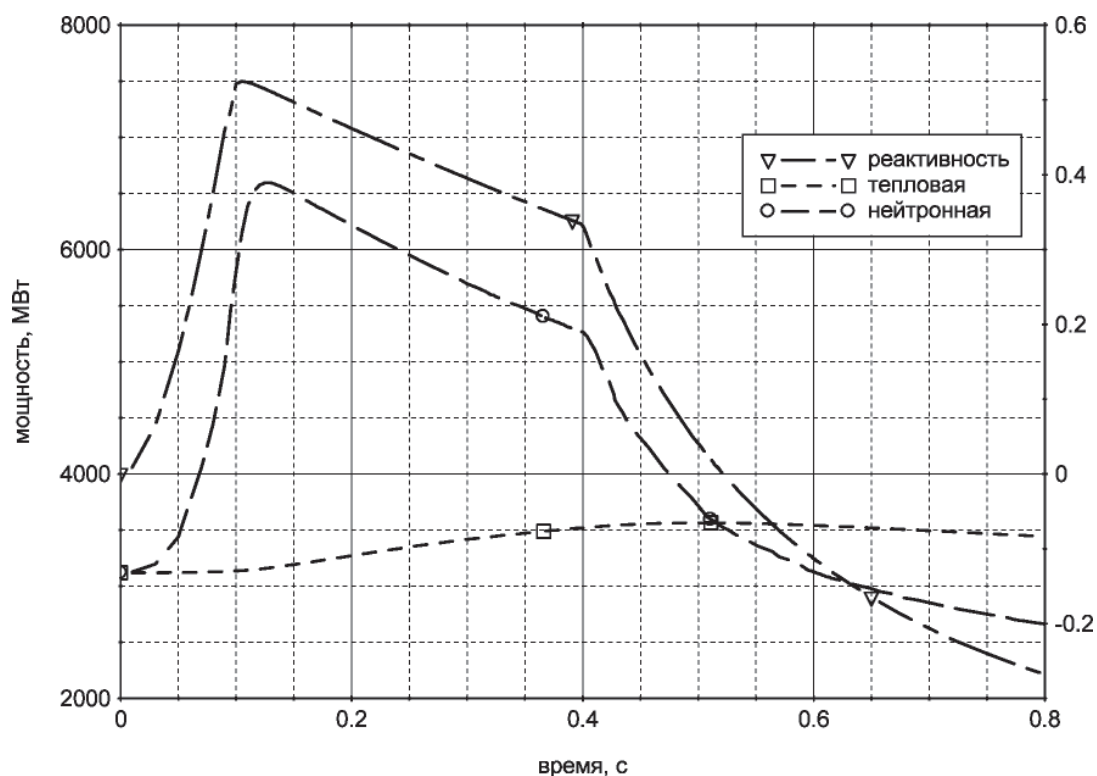


Рис. 2. Изменение реактивности, нейтронной и тепловой мощности

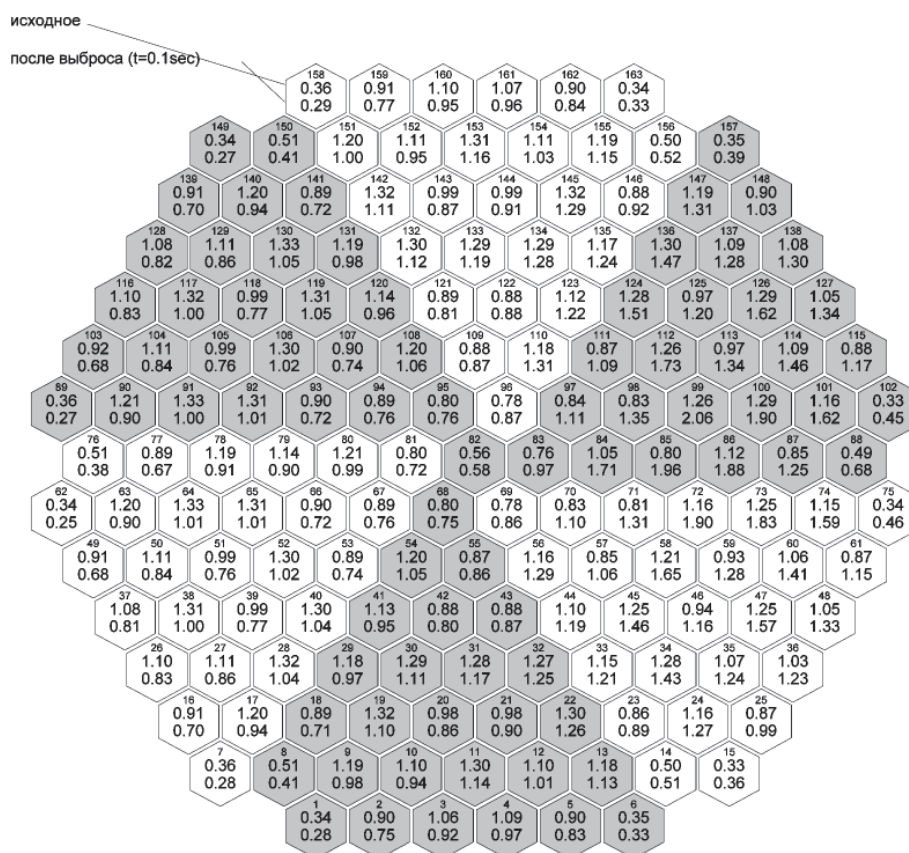


Рис. 3. Деформация радиального поля энерговыделения ($t=0$ и $t=1,5$ с)

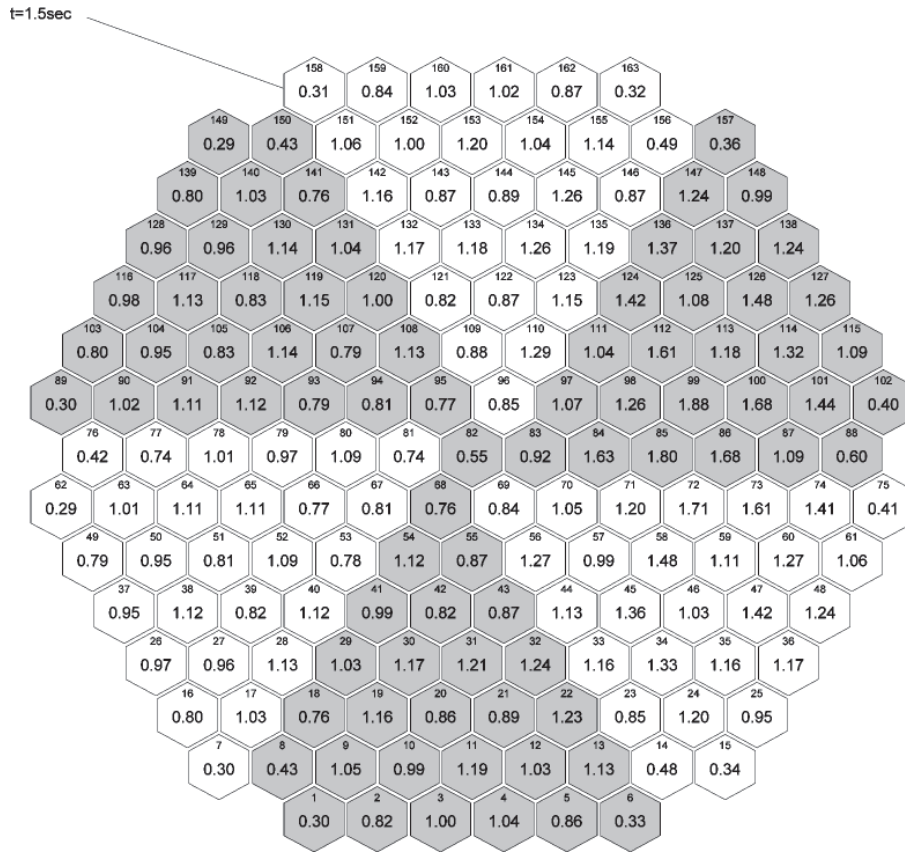


Рис. 4. Деформация радиального поля энерговыведения ($t = 1,5 \text{ c}$)

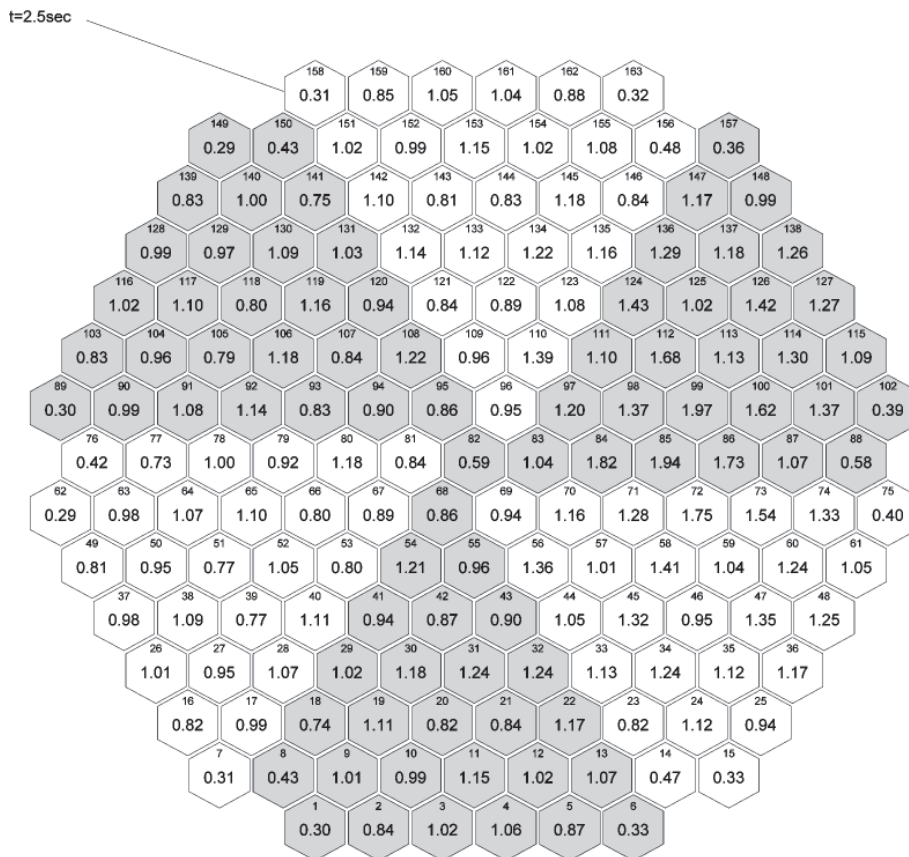


Рис. 5. Деформация радиального поля энерговыведения ($t = 2,5 \text{ c}$)

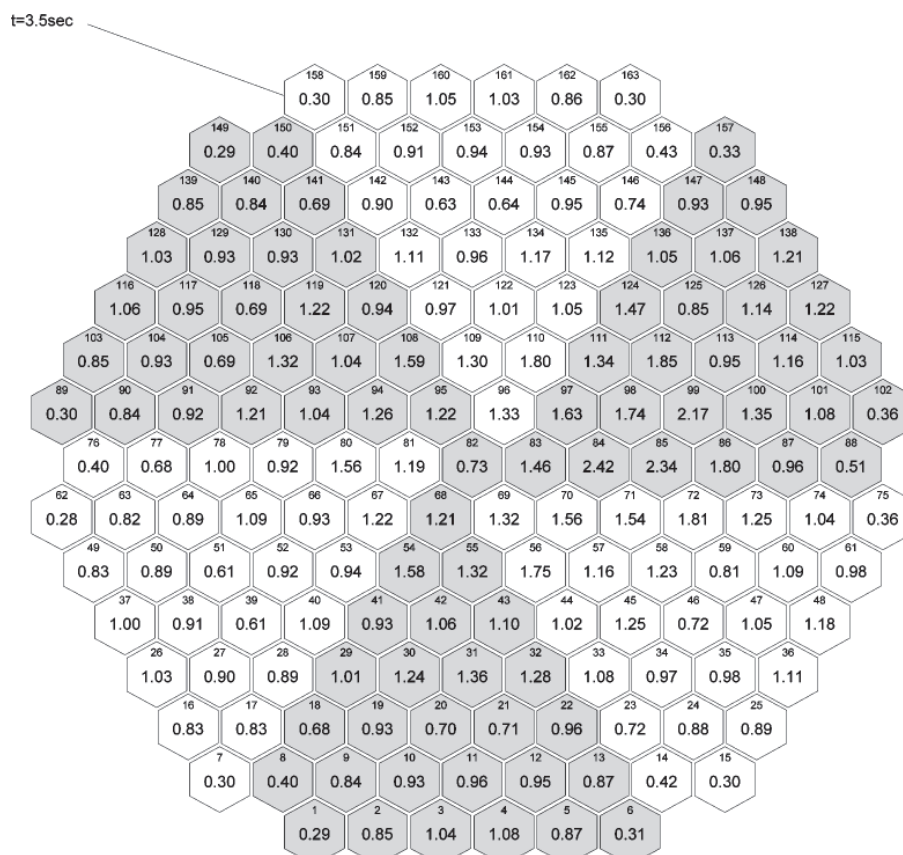


Рис. 6. Деформация радиального поля энерговыделения ($t = 3,5$ с)

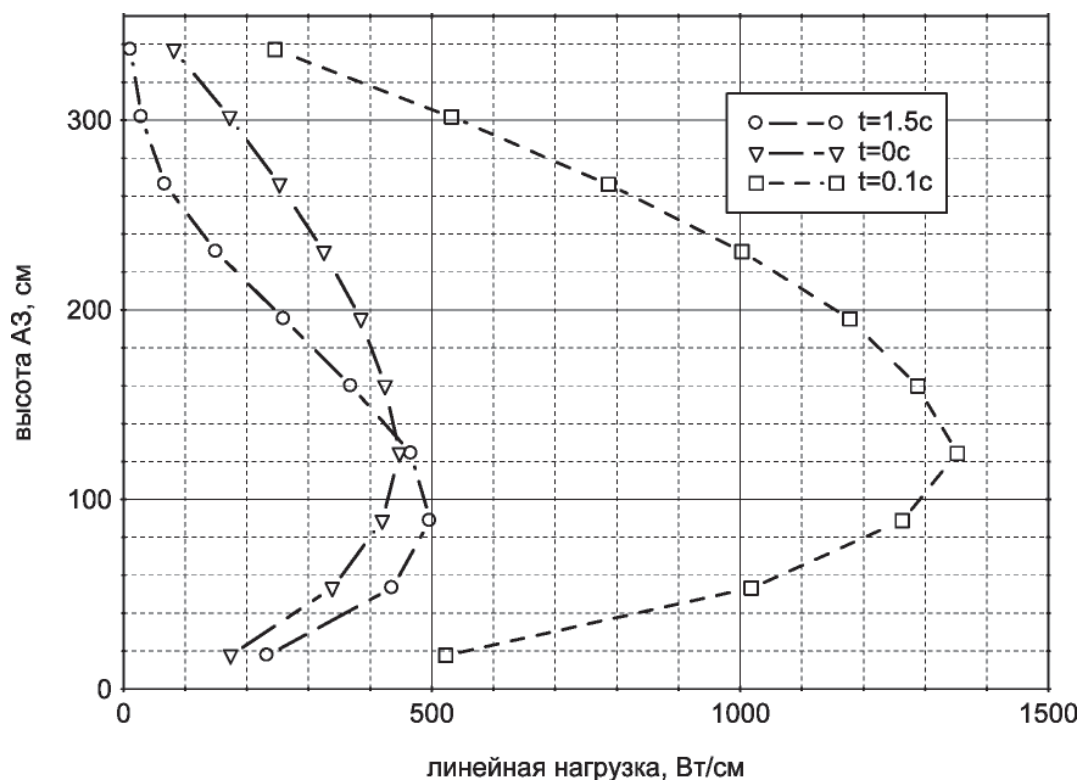


Рис. 7. Деформация аксиального поля энерговыделения (исходный 1-й предельный профиль)

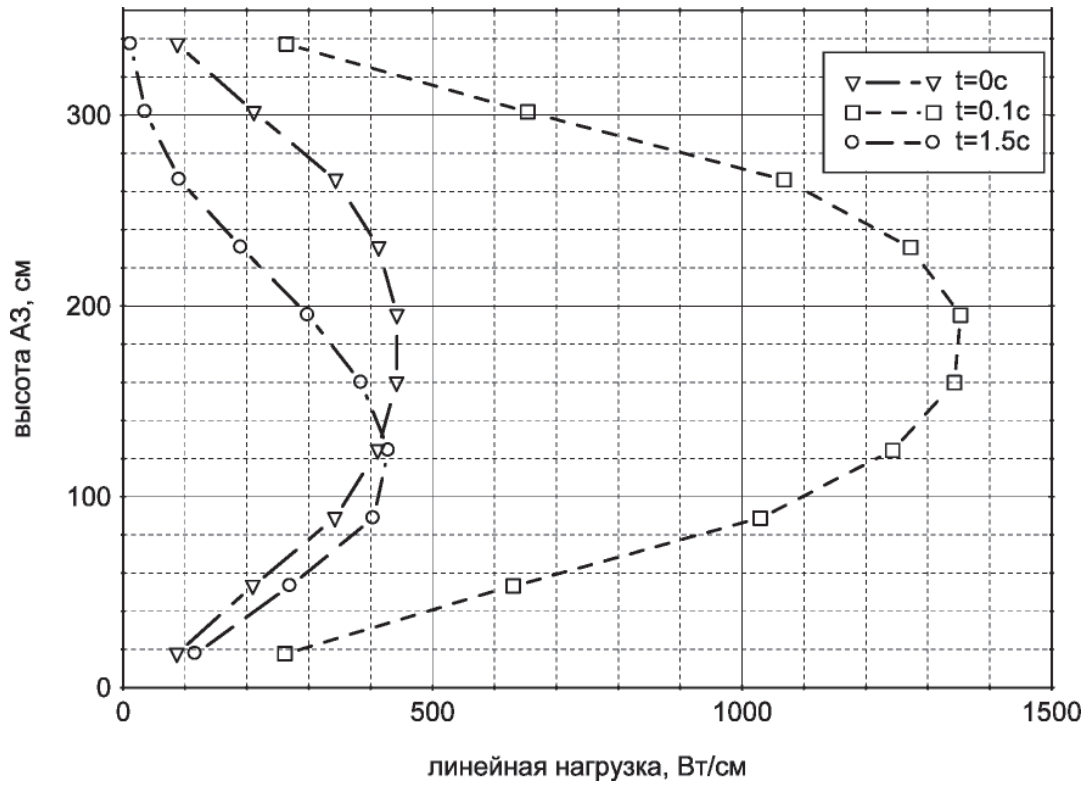


Рис. 8. Деформация аксиального поля энерговыведения (исходный 2-й предельный профиль)

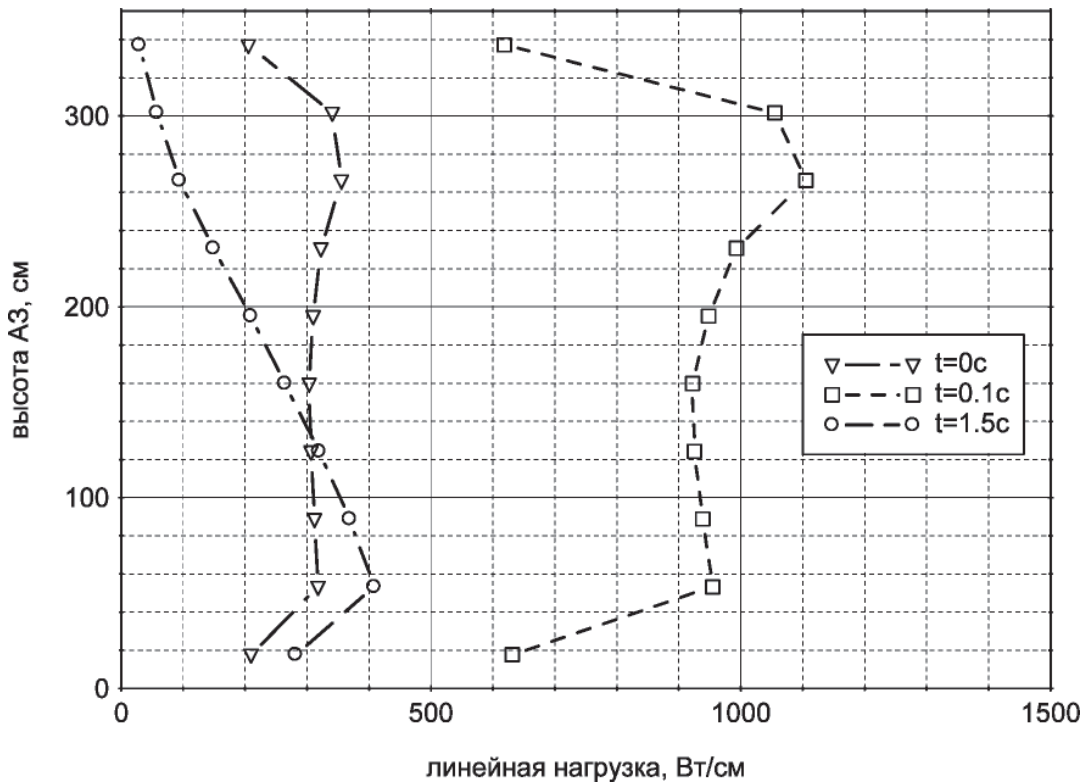


Рис. 9. Деформация аксиального поля энерговыведения (исходный 3-й предельный профиль)

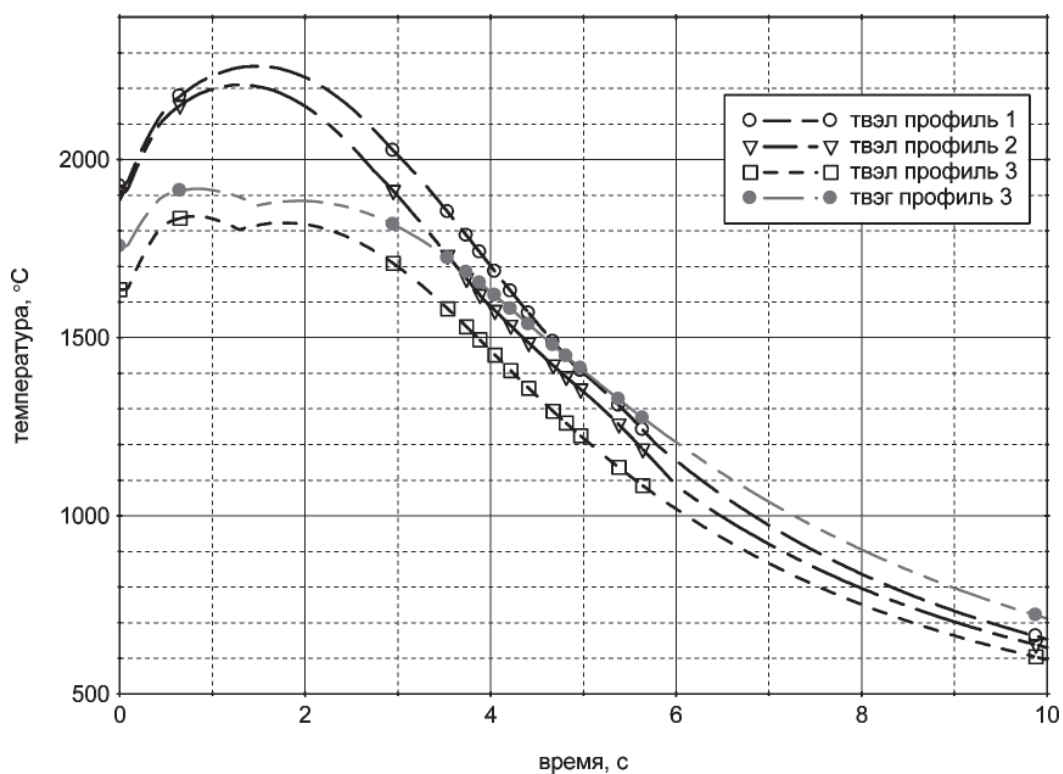


Рис. 10. Максимальная температура топлива наиболее нагруженного твэла/твэга

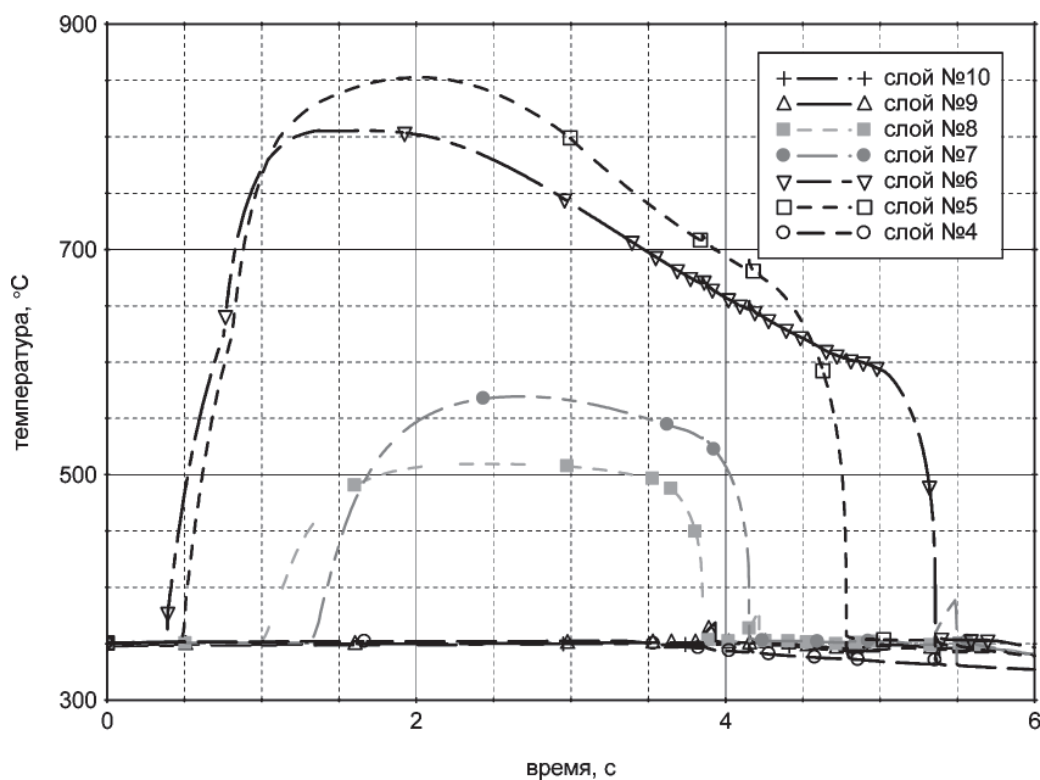


Рис. 11. Температура оболочки твэла в аксиальных слоях максимально нагруженного твэла в переходном процессе (профиль 1)

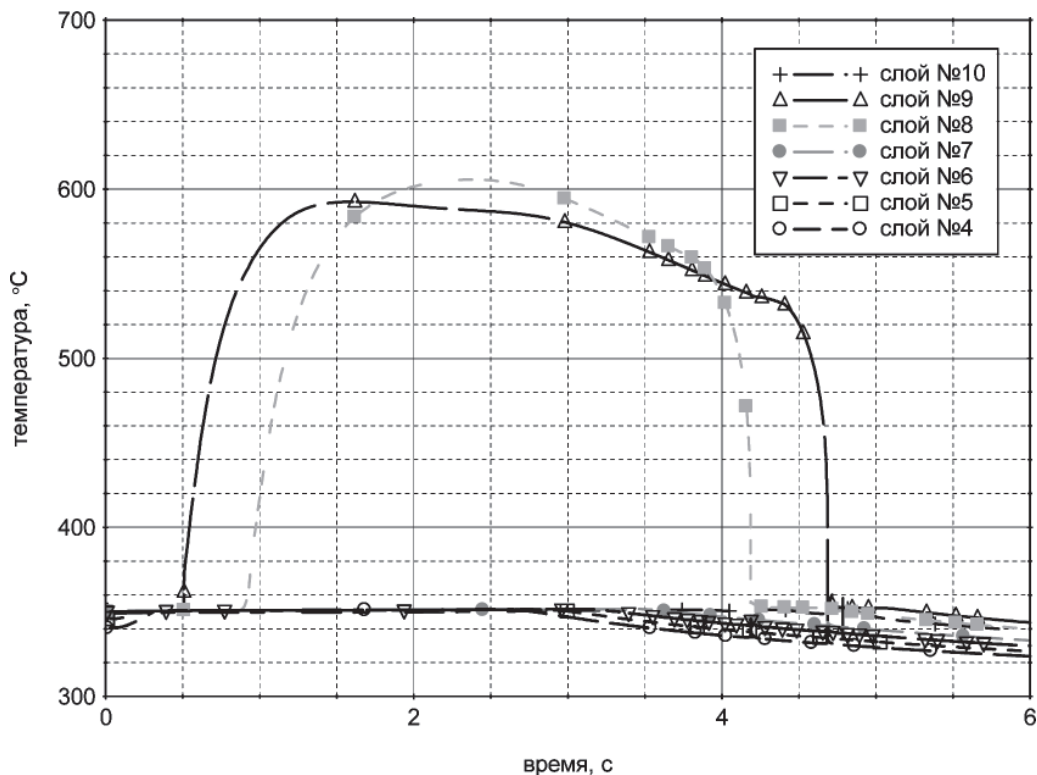


Рис. 12. Температура оболочки твэга в аксиальных слоях максимально нагруженного твэга в переходном процессе (профиль 3)

что дает возможность адекватно моделировать всплески полей энерговыделения в объеме активной зоны.

На примере аварийного режима, связанного с выбросом кластера, показано, что переходной процесс сопровождается сложным характером деформации поля энерговыделения. При этом происходит перемещение позиции максимально нагруженного участка активной зоны как в аксиальном, так и радиальном направлениях. Это указывает на необходимость использования трехмерной кинетической модели для анализа аварийных режимов, связанных с несимметричным поведением активной зоны.

2. Сравнение результатов моделирования аварийного режима, связанного с выбросом кластера, по одномерной методологии «Вестингауз» и с использованием трехмерной кинетики (DYN3D)

В методологии «Вестингауз» для моделирования выброса кластера используются программы TWINKLE и FACTRAN. Относительно этих программ известно, что TWINKLE моделирует кинетику реактора в двухгрупповом диффузионном приближении для одномерной аксиальной геометрии, а FACTRAN применяется для моделирования горячего участка твэла (расчет температуры топлива и оболочки твэла).

Описание взаимодействия программ TWINKLE и FACTRAN отсутствует.

Рассмотрим результаты сравнительного анализа методологий одномерного и трехмерного подходов на примере моделирования аварии с выбросом кластера. Для выполнения трехмерных расчетов использовалась программа DYN3D, библиотека нейтронно-физических констант

(НФК), подготовленная по CASMO, и консервативный подход для формирования исходного состояния активной зоны реактора перед выбросом кластера, который изложен в разделе 1.

Как видно из табл.3, все исходные данные для расчета по DYN3D были приняты такими же, как и для TWINKLE-FACTRAN, за исключением эффективности аварийной защиты, которая в DYN3D определяется в процессе расчета на основе НФК, а в TWINKLE-FACTRAN задается.

На рис. 13 и 14 приведены изменения нейтронной и тепловой мощности в переходном процессе. Знаком «х» отмечены результаты расчета по TWINKLE-FACTRAN. Сравнение показывает, что обе методологии на основе DYN3D и TWINKLE хорошо согласуются при определении всплеска нейтронной мощности после выброса кластера. Это не является неожиданным, поскольку в обоих расчетах эффективность выбрасываемого кластера одинакова, а проявление обратных связей за 0,1 с весьма незначительно. При этом в трехмерном расчете (вариант 1) в момент времени $t \approx 0,45$ с происходит срабатывание аварийной защиты, вследствие чего нейтронная мощность начинает быстро уменьшаться (в этом варианте в DYN3D предполагалось также погружение стержней СУЗ равномерно за время 4 с). С момента времени $t \approx 0,5$ с поведение нейтронной и тепловой мощности начинает существенно отличаться: как для тепловой, так и для нейтронной мощности значения, рассчитанные программой DYN3D, меньше, чем по TWINKLE.

Основные результаты расчета параметров безопасности приведены в табл. 4.

В расчете по варианту DYN3D (№ 1) приблизительно при одинаковых значениях максимальной температуры топлива (см. рис. 15: DYN3D дает значение приблизительно на 19 °C ниже, чем FACTRAN) и практически одинаковом начале

Таблица 3. Начальные условия, принятые для анализа выброса ОР СУЗ на мощности

Параметр	TWINKLE-FACTRAN	DYN3D
Тепловая мощность, МВт	3000/3120	3120
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	292,3	292,3
Давление в компенсаторе давления, МПа	15,34	15,34
Расход теплоносителя на входе в реактор, м ³ /ч	80 000	80 000
Время выброса ОР СУЗ, с	0,1	0,1
Задержка на срабатывание АЗ, с	0,4	0,4
Эффективность выбрасываемого кластера, %	0,15	0,15
Эффективность аварийной защиты, %	4,0	≈ 8
Изотермический температурный коэффициент*, 10 ⁻³ %/°С	0,0	$\alpha_t = 0$ **
Доплеровский мощностный эффект, рсм (10 ⁻³ %)***	800,0	$\alpha_{if} = -1,3 \cdot 10^{-5} \cdot 1/^\circ\text{C}$
Максимальная линейная нагрузка на твэл, Вт/см	448	448
$\beta_{эф}$, %	0,55	0,55
Расчетный сценарий	–	T_{fuel}^{max}
Максимум энерговыделения	–	Смещен к низу активной зоны
Мощность горячего канала, кВт	–	102,5

* В терминологии «Вестингауз».

** Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя.

*** В терминологии «Вестингауз». Очевидно, имеется в виду доплеровская составляющая мощностного эффекта реактивности.

Таблица 4. Основные результаты расчетного анализа аварии с выбросом ОР СУЗ на мощности

Параметр	TWINKLE-FACTRAN	DYN3D
		Вариант № 1 / Вариант № 2
Максимальная нейтронная мощность, МВт	4080	4193
Максимальная тепловая мощность, МВт	3556	3274 / 3352
Максимальная температура в центре таблетки, °С	1981	1962 / 2146 –19 / +165*
Максимальная температура оболочки, °С	848	743 / 878 –105 / +30*
Максимальная энтальпия, Дж/г	451,3	439,7/477,3
Коэффициент неравномерности локального энерговыделения F_Q до выброса ОР СУЗ	2,6	2,6
Коэффициент неравномерности локального энерговыделения F_Q после выброса ОР СУЗ	3,0	По нейтронной мощности 5,1 ($t=0,1$ с), по тепловой мощности 3,4 ($t=0,9$ с) / 4,0 ($t=2,0$ с)

* Отклонение численного значения по каждому варианту расчета от значения, полученного по TWINKLE-FACTRAN.

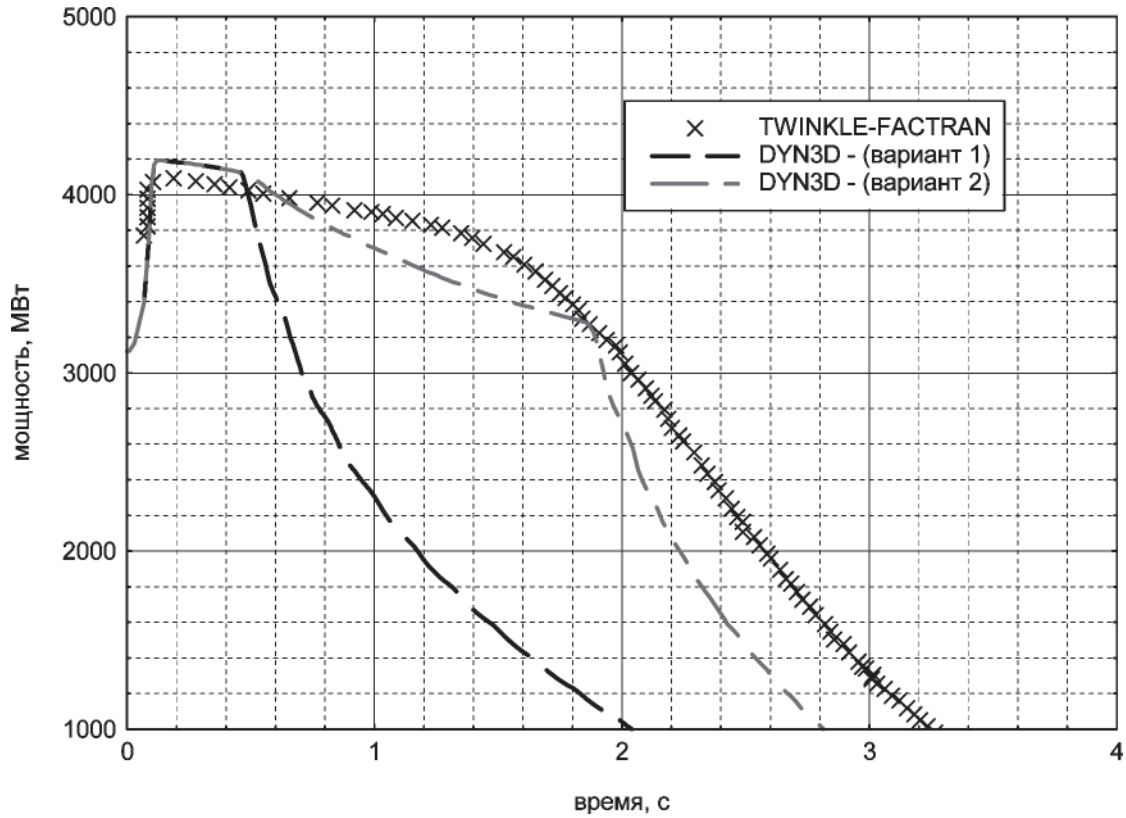


Рис. 13. Нейтронная мощность

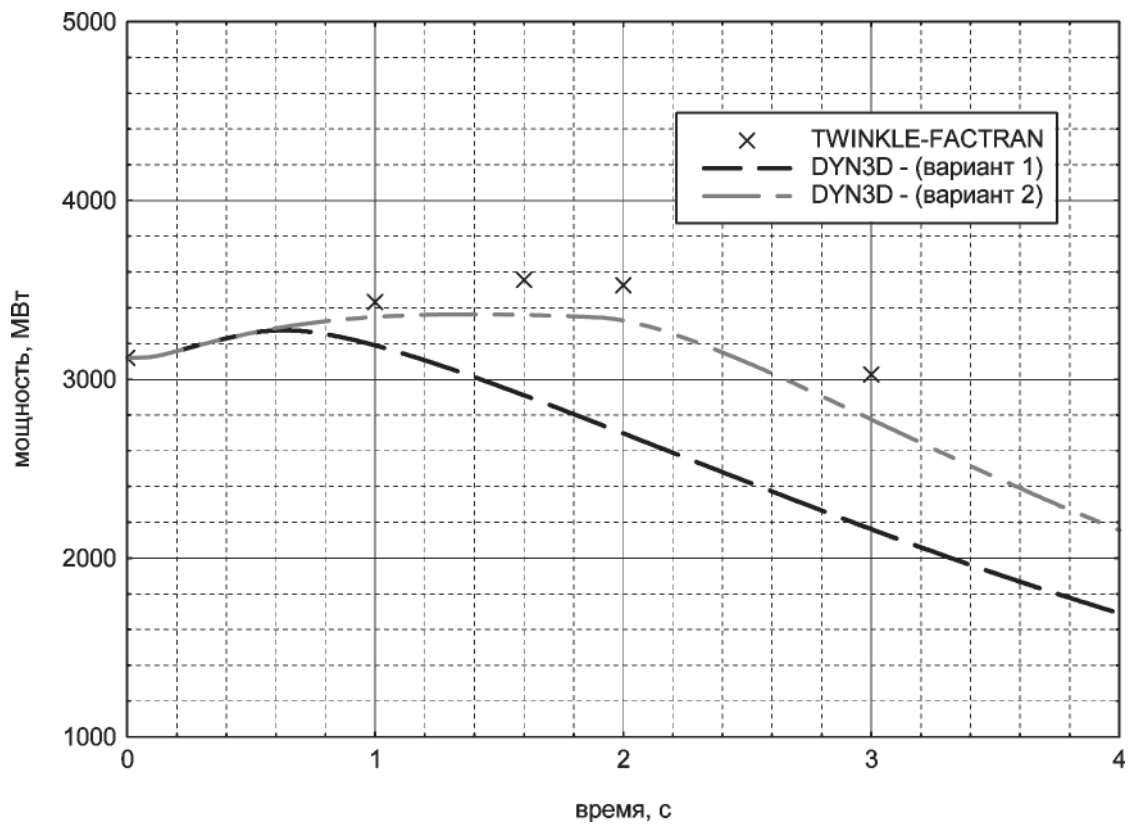


Рис. 14. Тепловая мощность

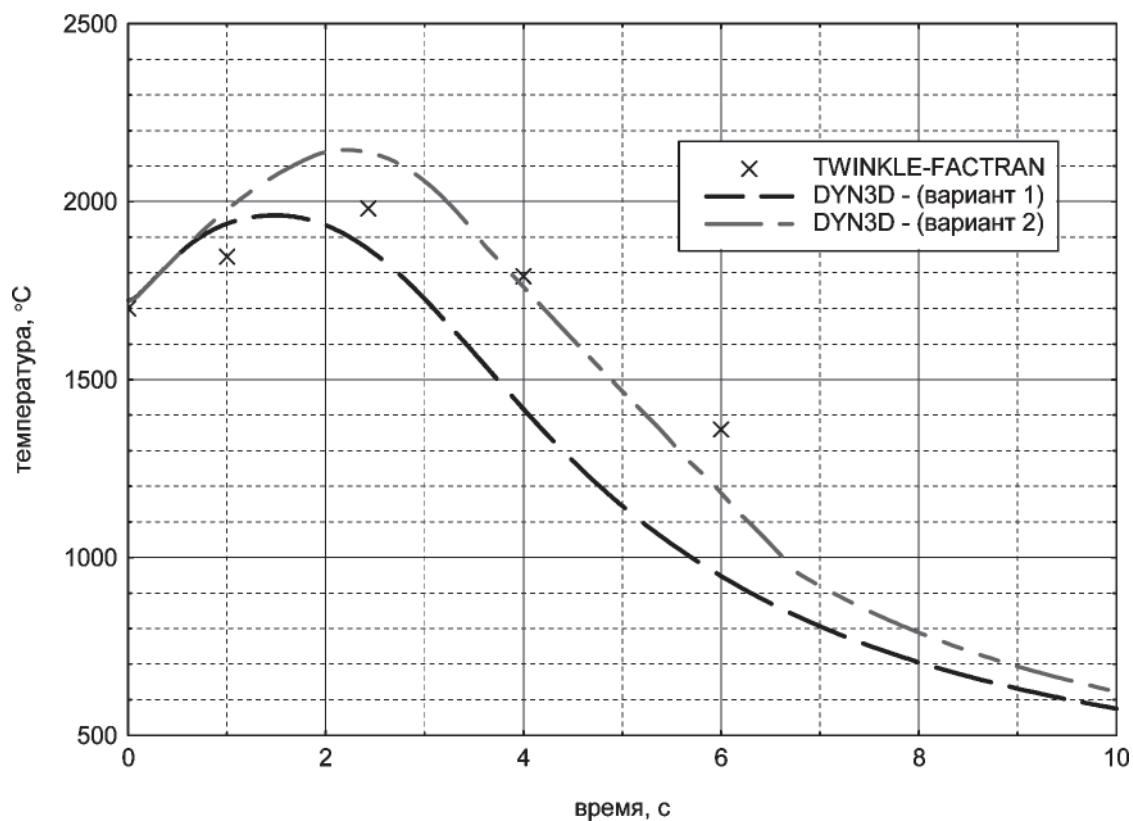


Рис. 15. Максимальная температура топлива

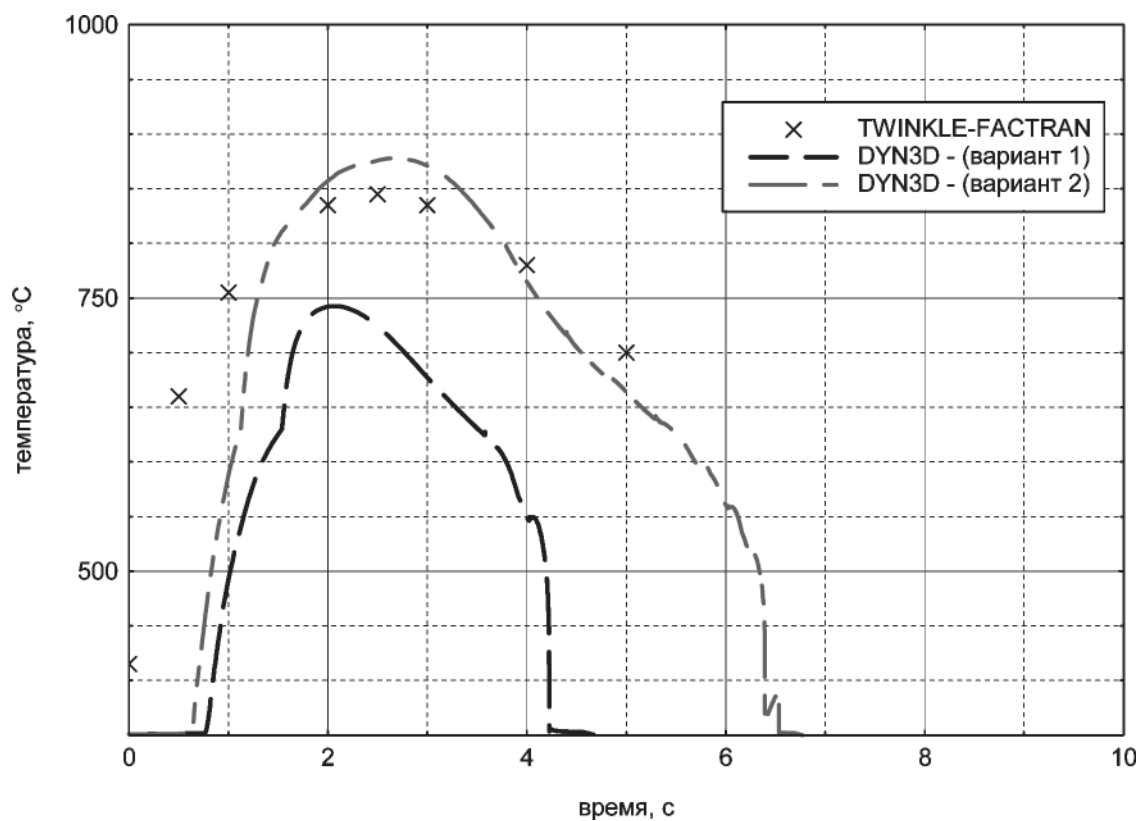


Рис. 16. Максимальная температура оболочки твэла

срабатывания АЗ (для DYN3D — 0,45 с, для TWINKLE — 0,46 с) максимальная температура оболочки твэла, рассчитанная DYN3D, на 105 °С ниже (рис. 16). Это связано с более интенсивным падением нейтронной мощности в варианте по DYN3D, так как эффективность аварийной защиты в этом случае значительно больше. Таким образом, расчет по варианту № 1 DYN3D дает менее консервативную оценку по сравнению с TWINKLE при всех практически одинаковых исходных данных за исключением эффективности аварийной защиты, которая в два раза меньше, и из описания расчета по TWINKLE непонятно, по какому закону она вводится и как выбор этого принятого закона был обоснован. В методологии такая информация отсутствует.

Анализ изменения нейтронной мощности (рис. 13), рассчитанной по программе TWINKLE, показывает, что после выброса кластера она плавно спадает в течение 1,2÷1,3 с. По характеру ее изменения (в сравнении с аналогичным поведением нейтронной мощности по DYN3D на интервале 0,05÷0,45 с), можно предположить, что спад нейтронной мощности на интервале времени 0,05÷1,3 с полностью определяется обратной связью по температуре топлива, а эффективность ОР СУЗ принята в модели TWINKLE практически равной нулю. Более резкий спад нейтронной мощности, наблюдаемый в расчетах по модели TWINKLE после момента времени $t \approx 1,2 \div 1,3$ с, очевидно, связан уже с большей эффективностью ОР СУЗ. Обоснование и описание принятого закона перемещения ОР СУЗ по сигналу АЗ, как уже упоминалось, отсутствует. Поэтому с помощью программы DYN3D выполнен дополнительный анализ переходного процесса исходя из условия, что обе программы дают максимально возможное совпадение поведения нейтронной мощности во времени. Для этого в программе DYN3D использовался алгоритм неравномерного погружения стержней СУЗ (вариант 2). Полного совпадения поведения нейтронной и тепловой мощности достичь не удалось. Рассчитанные программой DYN3D нейтронная и тепловая мощности в течение переходного процесса остались ниже, чем по программе TWINKLE (рис. 13 и 14). В случае достижения большего согласия с нейтронной и тепловой мощностью по DYN3D и TWINKLE, ожидаемые температуры топлива и оболочки твэла в расчете по DYN3D были бы еще больше.

Результаты расчетов варианта 2 (рис. 15 и 16) показывают, что при максимальном совпадении всех исходных данных предсказание программой DYN3D максимальной температуры топлива и оболочки твэла выше, чем по программе FACSTRAN, на 165 и 30 °С соответственно, т. е. для варианта 2 результаты трехмерного моделирования консервативнее.

Таким образом, выбор и обоснование консервативных условий задача не простая. Из табл. 4 видно, что коэффициент неравномерности локального энерговыделения в твэле в переходном процессе после выброса ОР СУЗ в трехмерном расчете получается выше, чем постулируется в одномерной модели. Это может быть связано с неучетом в модели TWINKLE исходного аксиального профиля энерговыделения (возможность учета аксиального профиля энерговыделения, как и многое другое, не описано в данной методологии).

Выводы

При использовании в анализе RIA методологии на основе точечно-одномерной кинетики не учитывается влияние изменения аксиального профиля нейтронного потока в течение рассматриваемого переходного процесса вследствие погружения стержней СУЗ. Кроме того, важным в анализе RIA является определение консервативного аксиального профиля энерговыделения в исходном состоянии и оценка его влияния в рассматриваемом исходном событии на максимальную величину коэффициента неравномерности локального энерговыделения F_Q .

Так, в аварии «выброс кластера» стержни СУЗ в процессе погружения после срабатывания АЗ приводят к тому, что уменьшают число делений, прежде всего в верхней части активной зоны, слабо влияя на нижнюю часть. Поэтому после начала погружения стержней СУЗ внизу активной зоны происходит еще довольно большое число делений в течение 1÷2 с. Если учесть, что время погружения СУЗ составляет 4 с, а время достижения максимальных значений температур топлива и оболочки 2÷3 с, то такая задержка в снижении плотности делений внизу активной зоны оказывает существенное влияние на достижение максимальных температур топлива и оболочки в переходном процессе.

Кроме того, расчетные исследования показывают, что в аварии «выброс кластера» максимальная температура оболочки твэла достигается в расчетном сценарии на максимальную температуру топлива (см. 1.1). Это связано с тем, что в исходном состоянии при малой проводимости газового зазора (сценарий на максимальную температуру топлива) температура топлива на несколько сотен градусов выше, чем в расчетном сценарии на максимальную температуру оболочки. Поэтому в переходном процессе при «схлопывании» газового зазора его проводимость существенно увеличивается. В результате этого запасенная энергия топлива переходит в теплоноситель, приводя к существенному повышению температуры оболочки.

Таким образом, выполненные расчетные исследования показывают, что как выбор состояния активной зоны для определения пикинг-фактора, используемого в точечно-одномерной методологии для оценки консервативного значения локального энерговыделения, так и выбор других консервативных условий, например, сценария для определения максимальной температуры оболочки твэла/твэга в аварии «выброс кластера», нетривиальны. Этот выбор должен быть обоснован и такое обоснование может быть проведено только на основе моделирования рассматриваемых исходных событий с использованием методологии трехмерной кинетики.

Исходя из вышесказанного и учитывая, что сравнительный анализ аварии «выброс кластера», выполненный в разделе 2, показал, что максимальные температуры топлива и оболочки твэла достигаются при использовании трехмерной методологии, а не одномерной, целесообразно отразить в нормативных документах необходимость использования при выполнении анализов реактивных аварий расчетных средств, в которых реализована трехмерная кинетика.

Надійшла до редакції 18.08.2009.