

Анализ тестовой задачи AER2 о выбросе стержня в реакторе ВВЭР-440 по программе SKETCH-N

В. Г. Зимин и Д. М. Батурин

*Лаборатория тренажерных систем,
Московский Инженерно-Физический Институт,
Каширское шоссе 31, Москва, 115409
E-mail: slava@ets.mephi.ru, dennis@ets.mephi.ru*

Аннотация

Программа SKETCH-N для решения задач пространственной нейтронной кинетики дополнена модулем расчета гексагональной геометрии, использующем полиномиальный нодальный метод на основе конформного отображения шестигранника на прямоугольник. Для тестирования модуля нейтронной кинетики проведены расчеты тестовой задачи AER2 по выбросу периферийного стержня СУЗ в реакторе ВВЭР-440. Результаты расчетов сравнивались с результатами полученными по другим программам: БИПР-8, DYN3D, HEXTRAN и КИКОЗД. Стационарные расчеты показывают, что программа SKETCH-N дает значение веса стержня СУЗ близкое к значениям полученным по программам БИПР-8 и HEXTRAN. Поле энерговыделения сравнивается с результатами программы DYN3D. Максимальные различия около 5% обнаружены в мощности периферийных ТВС и ТВС с частично погруженными стержнями СУЗ. Причины этих отклонений обсуждаются в работе. Результаты расчета переходного процесса: время и величина пика мощности реактора и максимальное значение температуры топлива также близки к результатам программ БИПР-8 и HEXTRAN. Различия в максимальной температуре топлива между результатами HEXTRAN и SKETCH-N около 100 °С. Эти различия, в основном, определяются различиями в точности нодальных методов, приводящим к разным значениям веса выбрасываемого стержня СУЗ. Приведены результаты численного эксперимента подтверждающие это предположение. Путем изменения начального положения стержней значение веса стержня в программе SKETCH-N настроено на значение полученное по программе DYN3D. В результате, параметры переходного процесса, рассчитанные по двум программам, практически совпадают.

¹ Материалы 12-го семинара "Нейтроника-2001", Обнинск, 29 октября-2 ноября 2001 г.

I Описание программы SKETCH-N

Нодальная программа SKETCH-N разработана для решения стационарных и нестационарных уравнений диффузии в декартовой (Zimin and Ninokata, 1998; Zimin et al., 2001) и гексагональной (Zimin and Baturin, 2001) геометрии.

Основные черты программы:

- диффузионное приближение;
- возможность расчета трехмерных, двумерных и одномерных модели реакторов для декартовой и гексагональной сетки;
- шаг сетки для декартовых координат произволен;
- произвольное число энергетических групп и групп запаздывающих нейтронов;
- для пространственной дискретизации в декартовой геометрии можно использовать полиномиальный, полуаналитический и аналитический нодальные методы с квадратичным представлением поперечной утечки;
- для гексагональной геометрии разработан полиномиальный нодальный метод основанный на конформном отображении шестигранника в прямоугольник;
- нелинейная итерационная процедура используется для решения нодальных уравнений;
- неявная схема временной дискретизации с аналитическим интегрированием предшественников запаздывающих нейтронов;
- автоматический выбор временного шага, основанный на процедуре удвоения размера шага по времени;
- для решения условно-критических задач используется метод обратных итераций со сдвигом по Виланду и чебышевским ускорением;
- обобщенные методы сопряженных градиентов (GMRES, BiCGStab, FOM, TFQMR) и адаптивный чебышевский метод могут быть использованы для решения линейной системы уравнений нестационарных задач;
- блочный симметричный метод верхней релаксации (SSOR) используется как предобуславливатель;
- однофазная модель теплогидравлики для расчета стационарных и переходных режимов работы реакторов PWR, ВВЭР и БРЕСТ;
- подпрограмма интерфейса, основанная на библиотеке PVM, может быть использована для связи программы с внешними теплогидравлическими системными кодами, типа ТРАС.

Большой набор тестовых задач был решен для верификации программы SKETCH-N. Рассчитанные стационарные тестовые задачи для декартовой геометрии включают:

- 2D и 3D задачи МАГАТЭ для реактора PWR;
- 2D задачу для реактора PWR Biblis-1 с шахматной загрузкой активной зоны;
- 2D задачу для реактора PWR Zion-1 с явным моделированием выгордки;
- 2D четырехгрупповая задача для реактора PWR Koeberg с шахматной загрузкой зоны.

Стационарные расчеты моделей реакторов в гексагональной геометрии были проведены для

- 2D задач МАГАТЭ модифицированные для гексагональной геометрии;
- 2D и 3D двухгрупповые задачи для реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000;
- 2D четырехгрупповая задачи для реактора ВВЭР-1000;
- 2D двухгрупповая задачи для тяжеловодного реактора.

Результаты расчетов, представленные в работах (Zimin et al., 1998; Zimin and Baturin, 2001), показали высокую точность программы: ошибки в коэффициенте размножения для всех задач меньше 30 рсм, ошибки в мощности кассет не превышают 2.5%.

Нестационарный модуль верифицирован по расчетам тестов для нейтронной кинетики:

- задачи Лангенбуха для небольшой модели реактора PWR;
- 2D & 3D задачи падения стержня СУЗ в реакторе BWR;

и расчетам динамических задач с моделированием теплогидравлики активной зоны:

- тесты NEACRP по выбросу стержня СУЗ в реакторе PWR;
- тесты NEA/NSC по перемещению группы стержней СУЗ в реакторе PWR;
- тест NEACRP по захолаживанию теплоносителя на входе в активную зону в реакторе BWR.

Тестовые расчеты задачи с захолаживанием теплоносителя в реакторе BWR проводились по комплексу программ SKETCH-N/TRAC-BF1. Для расчета динамических тестов в реакторе PWR в качестве модуля теплогидравлики активной зоны использовались как собственная модель теплогидравлики программы SKETCH-N, так и программа J-TRAC. Результаты выполненных расчетов (Zimin and Ninokata, 1998; Zimin et al., 1999, 2000) показывают, что программа SKETCH-N по точности и быстродействию не уступает лучшим аналогичным программам.

II Описание тестовой задачи

Тестовая задача AER-DYN002 (Grundmann, 1999; Grundmann and Rohde, 1993) разработана для проверки модулей нейтронной кинетики трехмерных программ расчета реакторов ВВЭР. Модель активной зоны близка к стандартной конфигурации реактора ВВЭР-440 в начале топливного цикла. Двухгрупповые макроконстанты заданы для четырех типов ТВС и материала стержней СУЗ. Торцевой и радиальный отражатель явно не моделируется, а описывается граничными условиями. Исходная мощность реактора 1.375 кВт. Переходный процесс инициируется выбросом периферийного стержня СУЗ за 0.016 сек. Рост мощности реактора прекращается за счет эффекта Доплера. Эффект моделируется как линейная зависимость сечения деления в тепловой области от квадратного корня из температуры топлива. Для расчета температуры топлива используется адиабатическая модель, то есть отвод тепла из топливного элемента отсутствует. Рассчитываются первые две секунды процесса. Сделан ряд предположений, обеспечивающих консерватизм расчетов:

- суммарный выход запаздывающих нейтронов β уменьшен до 0.005, что повышает вес стержня СУЗ в единицах β ;
- макроконстанты стержня СУЗ изменены таким образом, чтобы вес стержня СУЗ был около 2β .

Отчет по тестовой задаче (Grundmann, 1999) содержит результаты расчетов, полученные по четырем программам: БИПР-8 (Lizorkin et al., 1992), DYN3D (Grundmann and Rohde, 1989), HEXTRAN (Kyrki-Rajämäki, 1995) и КИКОЗД (Keresztúri and Jakab, 1991). В отчете приведены результаты стационарных расчетов:

- коэффициент размножения реактора;
- вес извлекаемого стержня СУЗ;
- поле энерговыделения в исходном состоянии реактора;

данные расчета переходного процесса как функции времени:

- мощность реактора;
- интегральная мощность реактора;
- реактивность;
- объемный коэффициент неравномерности поля энерговыделения;

и поле энерговыделения в несколько моментов времени.

Насколько нам известно, эталонное решение данной задачи даже для исходного стационарного состояния пока еще не получено, хотя работа в данном направлении ведется рядом авторов (Kolev, 2000; Suslov, 2000).

III Результаты стационарных расчетов

Задача рассчитывалась по программе SKETCH-N с моделью реактора без учета симметрии задачи и с шагом сетки по высоте 25 см. Незначительная модификация программы сделана для моделирования движения предшественников запаздывающих нейтронов при перемещении стержней СУЗ реактора ВВЭР-440. Адиабатическая модель топлива моделировалась заданием теплопроводности газового зазора между топливом и оболочкой равным нулю. В Таблице 1 приведены значения коэффициента размножения реактора и веса извлекаемого стержня СУЗ, полученные по программе SKETCH-N и программам: БИПР-8, DYN3D, HEXTRAN и КИКОЗД. Следуя отчету по тесту, приведены отклонения от значений программы DYN3D. Программа SKETCH-N дает максимальное значение веса стержня, близкое к значениям БИПР-8 и HEXTRAN.

Поле энерговыделения и отклонения от значений DYN3D представлено на Рис.1. Для большинства ТВС отклонения не превосходят 2%, за исключением периферийных ТВС, граничащих с отражателем тремя гранями, и ячеек со стержнями СУЗ. Мощности периферийных ТВС отличаются из-за различного представления радиальной утечки нейтронов из ячейки на границе реактора в двух программах. В программе DYN3D ток нейтронов на грани ячейки аппроксимируется константой. В программе SKETCH-N ток нейтронов на гранях граничных ячеек аппроксимируется линейной функцией, но представление тока константой реализовано как опция программы. Для оценки эффекта линейного приближения был проведен расчет, когда ток нейтронов на гранях всех ячеек аппроксимируется константой. Поле энерговыделения и сравнение с результатами по DYN3D представлено на Рис.2. При использовании данного приближения отклонения в мощности периферийных ТВС незначительны.

Чтобы оценить эффект шага пространственной сетки по высоте реактора был выполнен расчет с шагом сетки 12.5 см. Поле энерговыделения и сравнение с результатами по DYN3D представлено на Рис.3. Различия в мощности ТВС с частично погруженными стержнями СУЗ увеличиваются на 2% по сравнению с результатами полученными на сетке с шагом 25 см. Так как мощность всех остальных ТВС и коэффициент размножения реактора практически не изменяются при переходе на сетку 12.5 см, сетка с шагом 25 см была использована во всех последующих расчетах.

Средняя аксиальная форма поля энерговыделения хорошо согласуется с результатами DYN3D. Отличия меньше 1.2%, как для исходного стационарного состояния, так и для остальных ключевых моментов времени (0.16 с, момент пика мощности, 2 с).

IV Результаты расчета переходного процесса

Расчет переходного процесса выполнен с использованием процедуры автоматического выбора временного шага. График изменения шага по времени представлен на Рис.4. Программой было выполнено 673 шага по времени на мелкой сетке, включая 5 шагов отброшенных по точности. Расчет занял около 5,5 минут на РС с процессором Pentium III с тактовой частотой 600 МГц.

График изменения мощности реактора представлен на Рис. 5, где также приведены результаты расчета по программам: БИПР-8, DYN3D, HEXTRAN и КИКОЗД. Максимальный вес извлекаемого стержня в программе SKETCH-N приводит к максимальному значению пика мощности реактора по сравнению с другими программами. Момент времени пика мощности близок в программах SKETCH-N и HEXTRAN. График изменения реактивности реактора представлен на Рис.6. Максимальная введенная реактивность в программе SKETCH-N приводит также к максимальной интегральной мощности реактора, показанной на Рис. 7, и максимальному значению максимальной по реактору температуре топлива, приведенной на Рис. 8. Однако, различия между результатами различных программ не очень велики, например, различия между SKETCH-N и БИПР-8 в максимальной температуре топлива составляют около 100 °С, а различия между БИПР-8 и DYN3D около 160 °С.

Значения объемного коэффициента неравномерности поля энерговыделения в несколько ключевых моментов времени представлены в Таблице 2. График изменения коэффициента неравномерности поля энерговыделения приведен на Рис. 9. Результаты всех программ хорошо согласуются между собой. Сводные данные основных параметров переходного процесса представлены в Таблице 3.

В отчете по тесту (Grundmann, 1999), различия в результатах расчета переходного процесса объясняются различиями в точности расчета веса извлекаемого стержня СУЗ. Для проверки этого предположения был проведен следующий численный эксперимент. Начальное положение стержней СУЗ было изменено таким образом, чтобы вес извлекаемого стержня рассчитанный по программе SKETCH-N совпадал со значением программы DYN3D. Выбранное начальное положение стержней СУЗ было 58.5 см от низа активной зоны, при этом вес стержня равнялся 0.9744%, что близко к значению 0.9755% программы DYN3D. Объемный коэффициент неравномерности поля энерговыделения в начальный момент времени равен 2.28 по программе SKETCH-N, 2.31 по программе DYN3D. График мощности реактора, полученный по программам DYN3D, КИКОЗД и SKETCH-N показано на Рис.10. В данном эксперименте, пик мощности

и время пика, рассчитанные по трем программам, практически совпадают. График максимальной по реактору температуры топлива приведен на Рис.11. Отличия между результатами программ SKETCH-N и DYN3D в момент времени 2 сек составляют 40 °С. Приведенные результаты подтверждают предположение, что различия в результатах расчета переходного процесса определяются различиями в точности нодальных методов пространственной дискретизации, приводящим к различным значениям веса извлекаемого стержня СУЗ.

V Выводы и текущие планы

Анализ теста AER-DYN002 выполнен по программе SKETCH-N. Результаты расчета сравнивались с результатами других программ, использующихся в расчетах реактора ВВЭР-440: БИПР-8, DYN3D, HEXTRAN и КИКОЗД. Для исходного состояния реактора приведено сравнение коэффициента размножения, веса извлеченного стержня СУЗ и распределения поля энерговыделения. Различия в мощности ТВС, рассчитанной по программам SKETCH-N и DYN3D, ниже 2% для всех ТВС за исключением периферийных ТВС, граничащих с отражателем тремя гранями, и ТВС со стержнями СУЗ. В этих ТВС отличия составляют около 5%. Программа SKETCH-N дает максимальное значение веса извлекаемого стержня СУЗ среди других программ. В результате, при расчете переходного процесса, значения пика мощности, интегральной мощности реактора и температуры топлива также максимальны. Однако, отклонения не велики и не превышают отклонения между результатами других программ. Например, различия в максимальной температуре топлива в момент времени 2 с между программами SKETCH-N и БИПР-8 составляют около 100 °С, а различия между БИПР-8 и DYN3D около 160 °С. Проведенный численный эксперимент подтвердил предположение, что различия в результатах расчета переходного процесса определяются различиями в весе извлекаемого стержня СУЗ, обусловленными разной точностью нодальных методов использующихся в программах.

Отсутствие эталонного решения даже для исходного стационарного состояния реактора не позволяет сделать выводы о точности программ. Хотя работы по получению эталонного решения с помощью конечно-разностной программы MAG (Suslov, 2000) и конечно-элементной программы CRONOS (Kolev, 2000) уже ведутся, они не завершены, так как требуют проведения большого числа расчетов с использованием очень мелкой пространственной сетки. Наши планы на будущее включают разработку нодального метода для треугольной геометрии и реализацию его в программе SKETCH-N. Это позволит пользователю программы получать эталонное решение для интересующей его задачи с минимальными затратами.

Благодарности

Авторы благодарны доктору Ulrich Grundmann из Forschungszentrum Rossendorf, Germany за предоставление описания тестовой задачи, доктору Николаю Колеву из Института Ядерных Исследований и Ядерной Энергии, София, Болгария за обсуждение полученных результатов и доктору Олегу Юрьевичу Кавуну из Атомэнергопроект, Москва за высказанные замечания по докладу.

Список литературы

- Grundmann, U. (1999). *AER Benchmark Specification Sheet. Test AER-DYN-002.* AER. Available at AER website http://www.kfki.hu/~aekihp/AER_home/bench_book/bb.html.
- Grundmann, U. and Rohde, U. (1989). DYN3D/M2 – a code for calculation of reactivity transients in cores with hexagonal geometry. In *IAEA Technical Committee Meeting on Reactivity Initiated Accidents, Wien*.
- Grundmann, U. and Rohde, U. (1993). Definition of the second kinetic benchmark of AER. In *Proc. of the Third Symposium of AER*, page 325. KFKI Atomic Energy Research Institute, Budapest.
- Keresztúri, A. and Jakab, L. (1991). A nodal method for solving the time-dependent diffusion equation in IQS approximation. In *Proc. of the First Symposium of AER*. KFKI Atomic Energy Research Institute, Budapest.
- Kolev, N. (2000). AER-DYN-002 results by the CRONOS code. private communication.
- Kyrki-Rajämäki, R. (1995). Three-dimensional reactor dynamics code for VVER type nuclear reactors. Technical report, VTT Publication 246, Technical Research Center of Finland.
- Lizorkin, M. P., Semenov, V. N., Ionov, V. S., and Lebedev, V. I. (1992). Time dependent spatial neutron kinetic algorithm for BIPR8 and its verification. In *Proc. of the Second Symposium of AER*. KFKI Atomic Energy Research Institute, Budapest.
- Suslov, I. (2000). A preliminary result of calculation of extrapolated-to-zero-mesh-size solution (EZMSS) of the second AER kinetic benchmark by finite-difference code MAG. In *Proc. of the Tenth Symposium of AER, Moscow*, page 449.
- Zimin, V. G., Asaka, H., and Anoda, Y. (2001). SKETCH-N: A nodal neutron diffusion code for solving steady-state and kinetics problems. model description and user's guide. Technical report, JAERI. [in print].
- Zimin, V. G., Asaka, H., Anoda, Y., and Enomoto, M. (1999). Verification of the J-TRAC code with 3D neutron kinetics model SKETCH-N for PWR rod ejection analysis. In *Proc. of the 9 International Topical Meeting*

- on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9), San Francisco, California, October 3-8, 1998. American Nuclear Society. CD-ROM.
- Zimin, V. G., Asaka, H., Anoda, Y., Kaloinen, E., and Kyrki-Rajämäki, R. (2000). Analysis of NEACRP 3D BWR core transient benchmark. In *Proc. of the 4th Intl. Conf. on Supercomputing in Nuclear Application SNA-2000, Tokyo, Japan, September 4-7, 2000*. Japan Atomic Energy Research Institute. CD-ROM.
- Zimin, V. G. and Baturin, D. M. (2001). Polynomial nodal method for solving neutron diffusion equations in hexagonal-z geometry. *Ann. Nucl. Energy*. [in print].
- Zimin, V. G. and Ninokata, H. (1998). Nodal neutron kinetics model based on nonlinear iteration procedure for LWR analysis. *Ann. Nucl. Energy*, 25:507–528.
- Zimin, V. G., Ninokata, H., and Pogosbekyan, L. R. (1998). Polynomial and semi-analytic nodal methods for nonlinear iteration procedure. In *Proc. of the Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology (PHYSOR98), Long Island, New York, October 5-8, 1998*, volume 2, pages 994–1002. American Nuclear Society.

Таблица 1 Коэффициент размножения реактора в исходном состоянии ($k_{eff,0}$), в состоянии с извлеченным стержнем СУЗ ($k_{eff,1}$) и вес стержня СУЗ ($\Delta\rho = 1 - k_{eff,0}/k_{eff,1}$)

Программа	$k_{eff,0}$	$k_{eff,1}$	вес стержня $\Delta\rho$, (%)	$\frac{\Delta\rho_{code}}{\Delta\rho_{DYN3D}} - 1$, (%)
БИПР-8	0.99844	1.00867	1.0143	4.
DYN3D	0.99994	1.00979	0.9755	-
HEXTRAN	0.99902	1.00918	1.0069	3.2
КИКОЗД	0.99999	1.00993	0.9834	0.8
SKETCH-N	0.99841	1.00872	1.0223	4.8

Таблица 2 Объемный коэффициент неравномерности поля энерговыделения в несколько моментов времени

Время (с)	0.0	0.16	время пика	0.4	2.0
БИПР-8	2.30	7.76	6.13	5.65	5.29
DYN3D	2.33	7.69	6.53	5.67	5.30
HEXTRAN	2.33	7.77	6.52	5.66	5.32
KIKO3D	2.34	7.78	6.41	5.68	5.30
SKETCH-N	2.31	7.78	6.54	5.61	5.27

Таблица 3 Некоторые результаты расчета переходного процесса

Параметр	БИПР-8	DYN3D	HEXTRAN	KIKO3D	SKETCH
Относительный пик мощности	70.9	63.9	72.4	62.6	78.1
Время пика, (с)	0.24	0.26	0.25	0.26	0.26
Максимальная реактивность, (β)	-	1.84	-	1.96	2.03
Относит. мощность в 2 с	0.50	0.48	0.49	0.48	0.49
Интегр. мощность в 2 с, (MWs)	5944	5554	5912	5563	6185
Макс. температура топлива в 2 с, ($^{\circ}\text{C}$)	2696	2538	2695	2540	2787

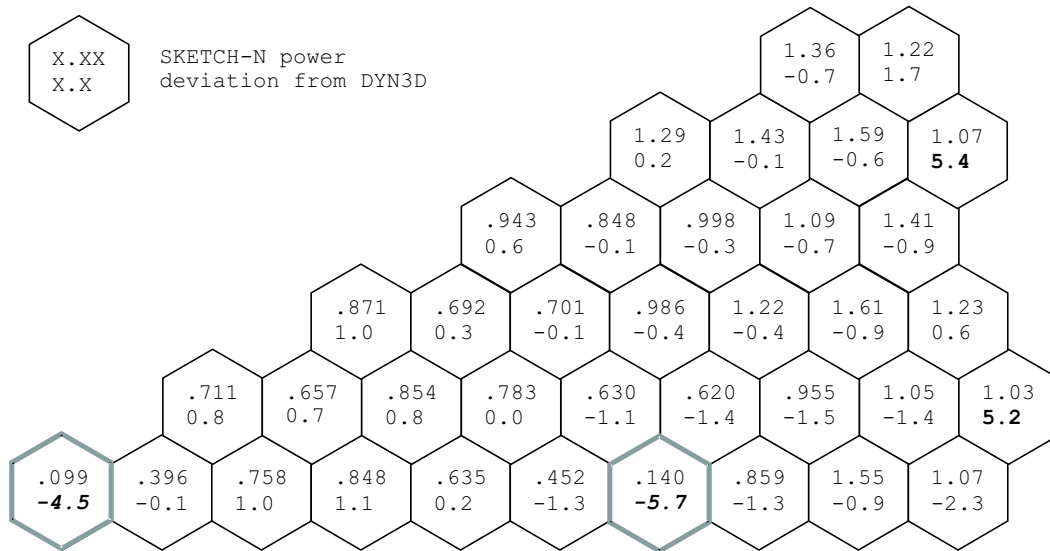


Рис. 1. Поле энерговыделения, рассчитанное по программе SKETCH-N, и отклонения от результатов расчета по DYN3D

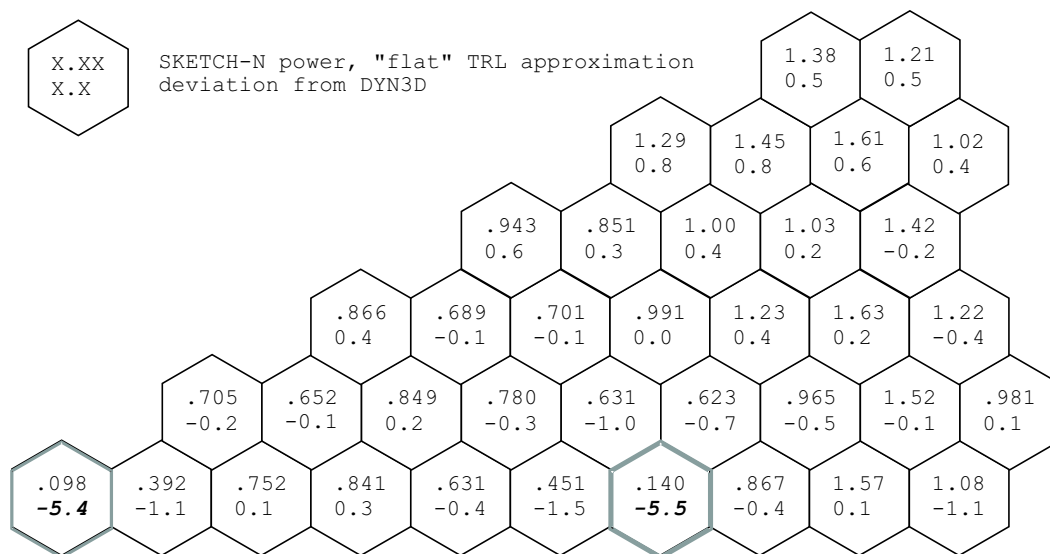


Рис. 2. Поле энерговыделения, рассчитанное по программе SKETCH-N в приближении постоянства токов на гранях ячеек, и отклонения от результатов расчета по DYN3D

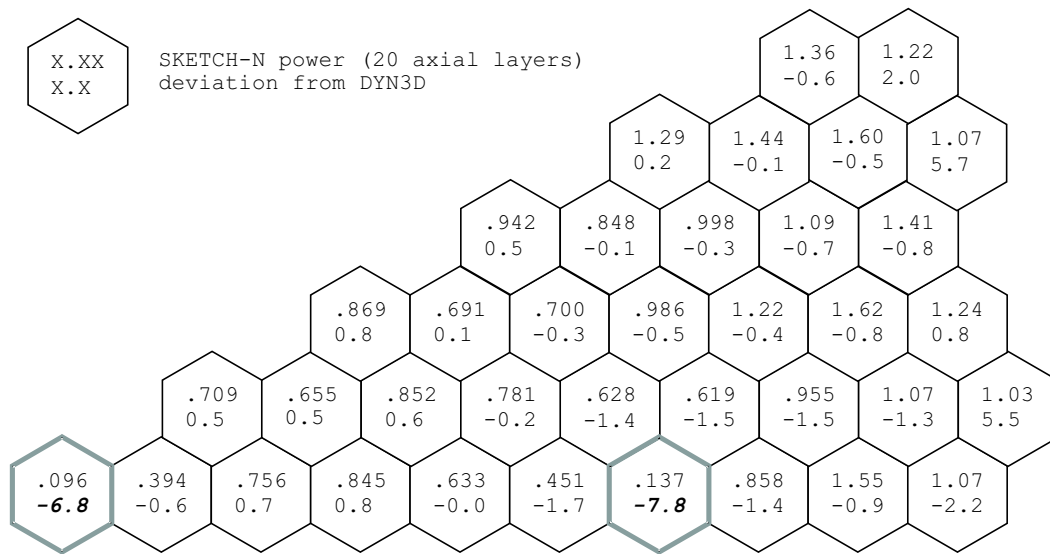


Рис. 3. Поле энерговыделения, рассчитанное по программе SKETCH-N с шагом сетки по высоте 12.5 см, и отклонения от результатов расчета по DYN3D

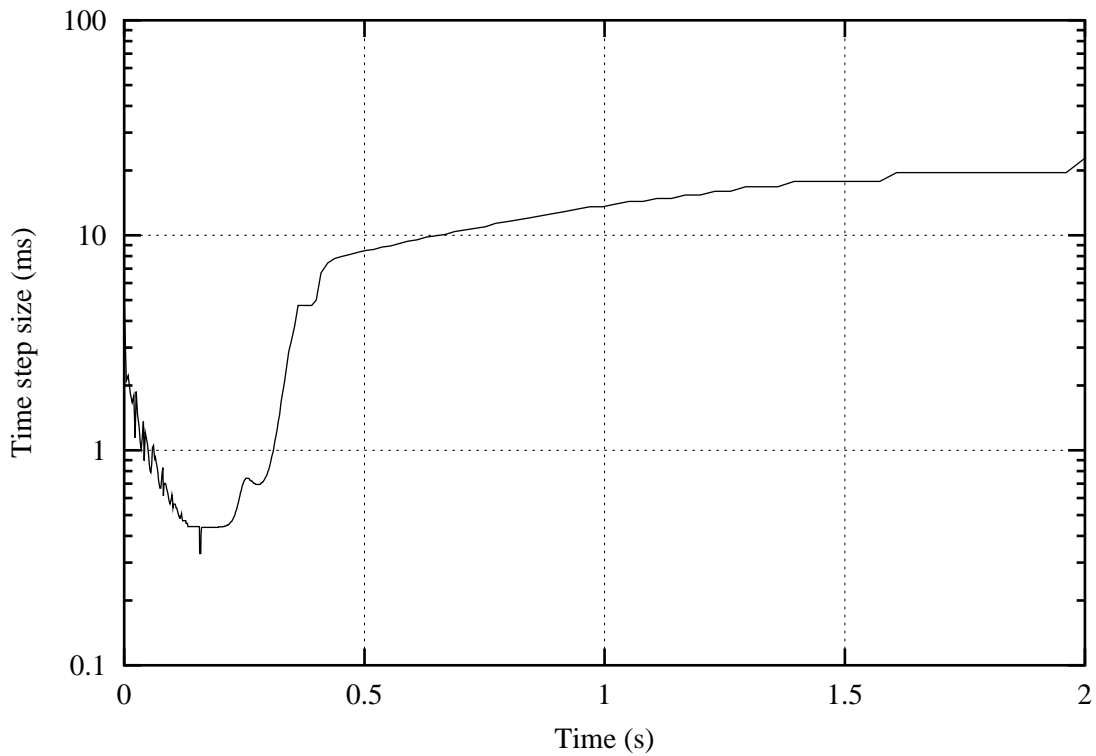


Рис. 4. Шаг по времени программы SKETCH-N

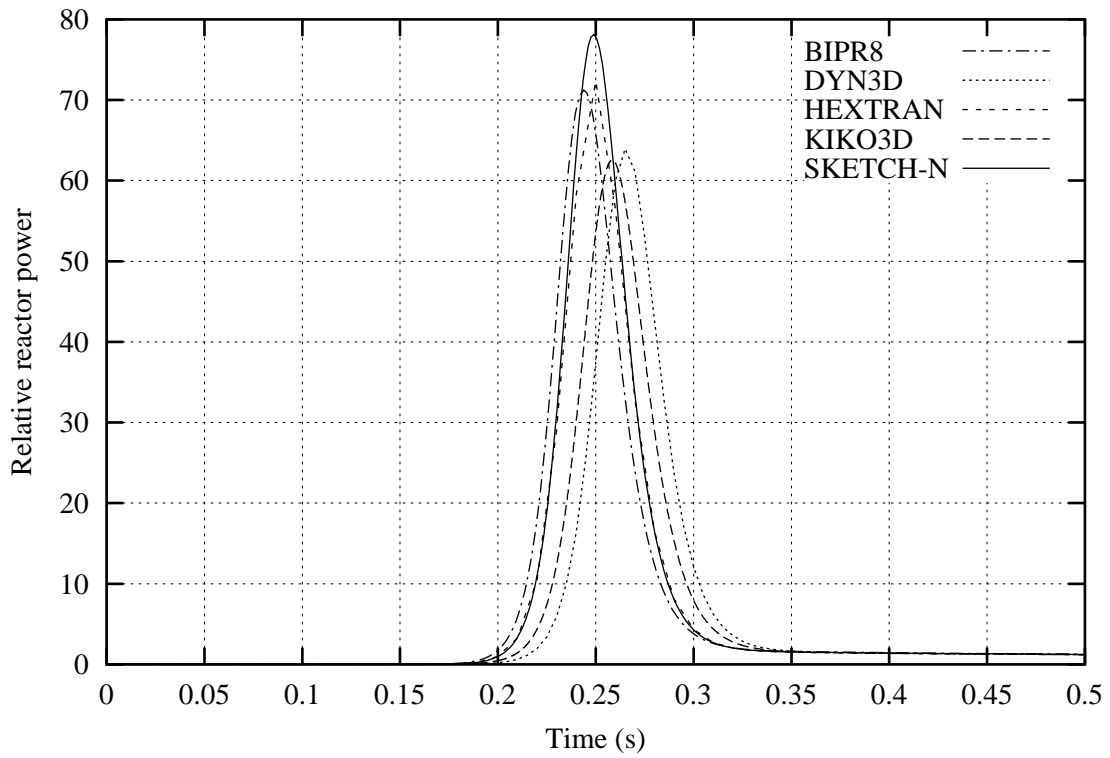


Рис. 5. Относительная мощность реактора

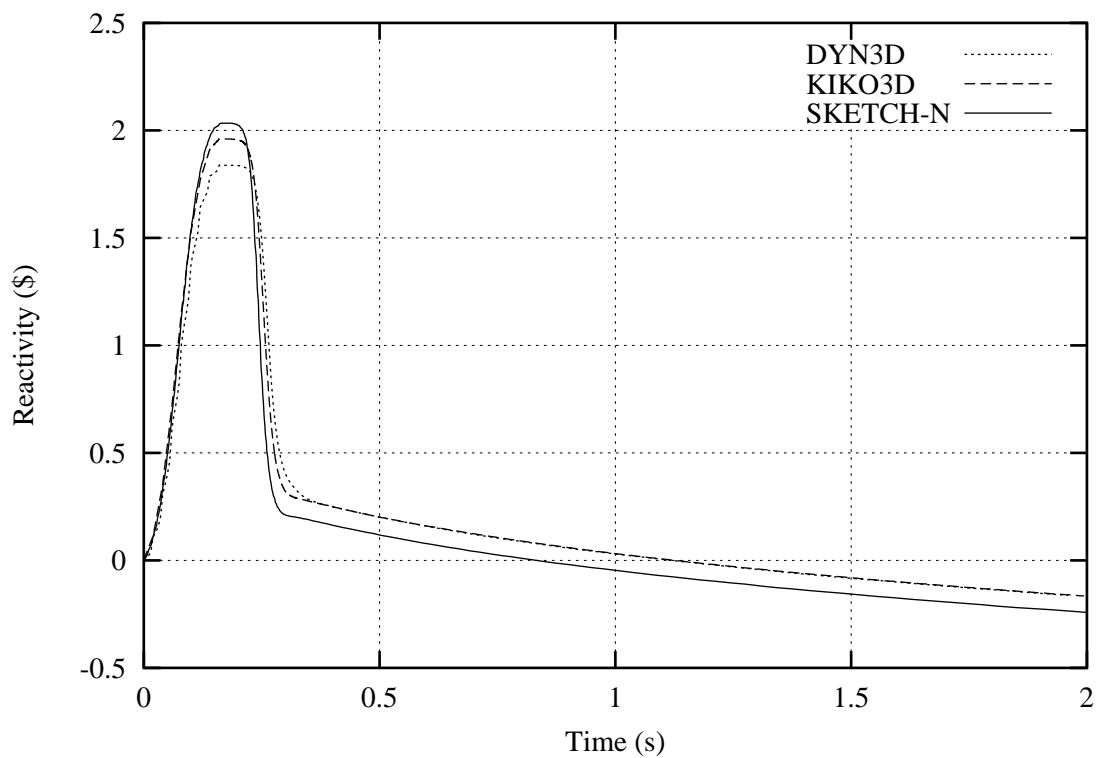


Рис. 6. Реактивность

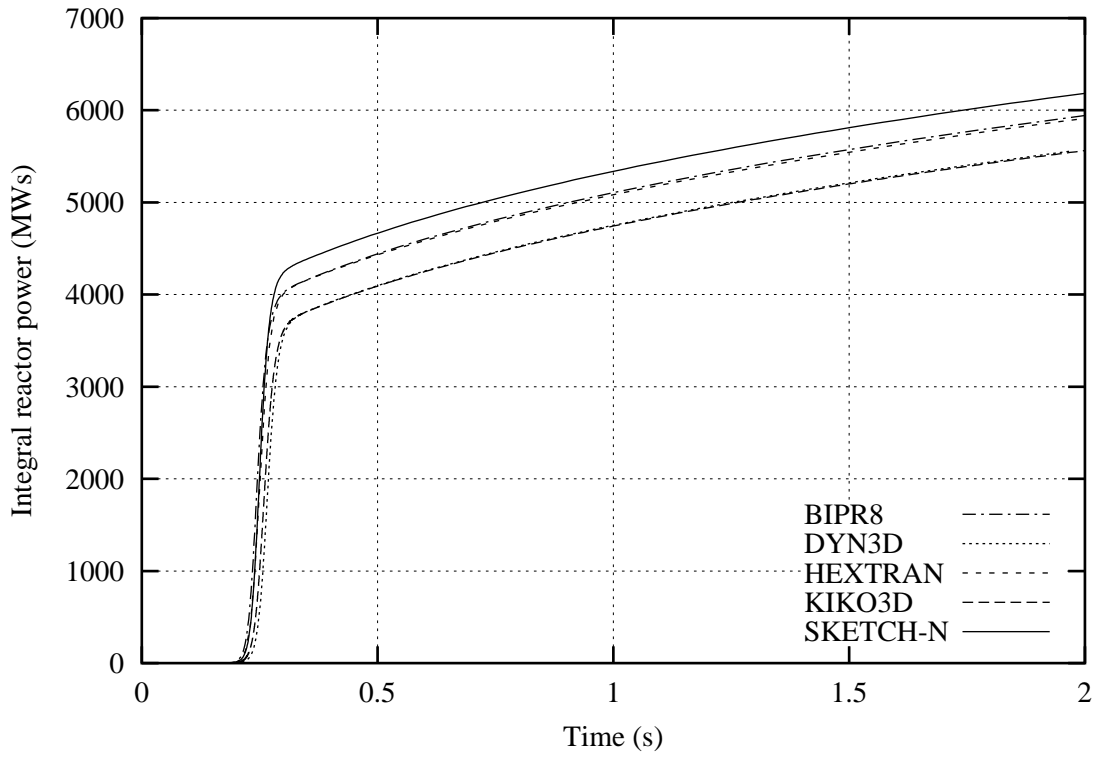


Рис. 7. Интегральная мощность реактора

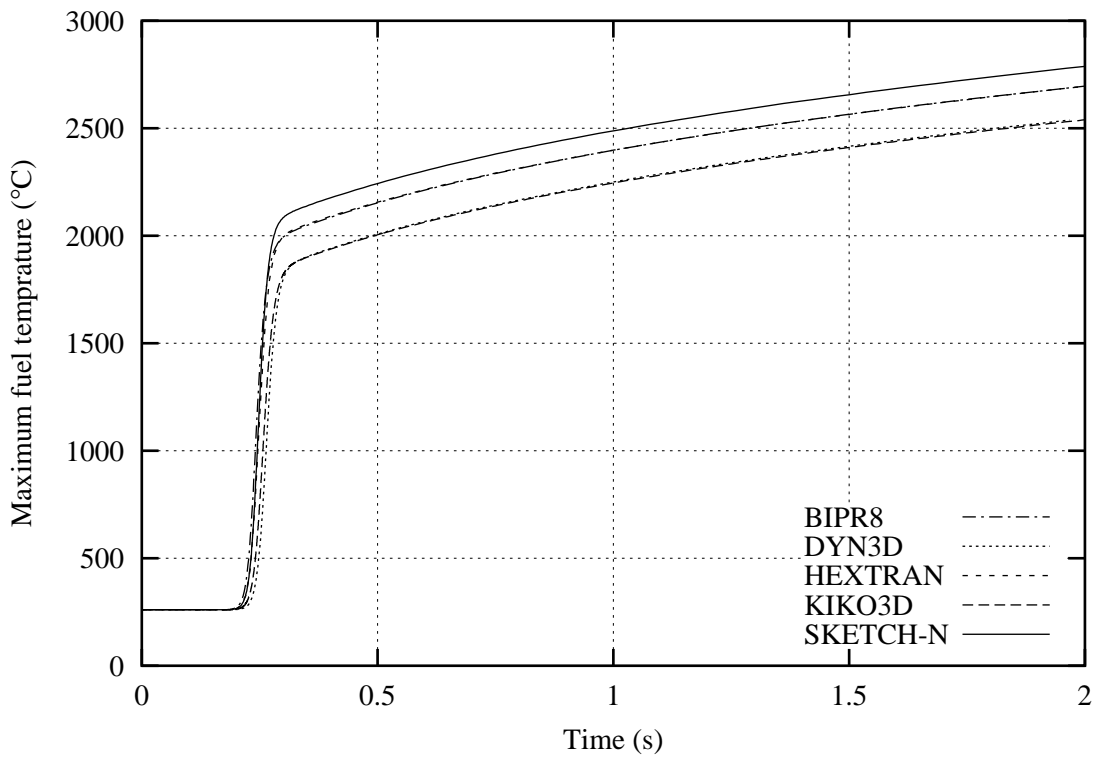


Рис. 8. Максимальная температура топлива

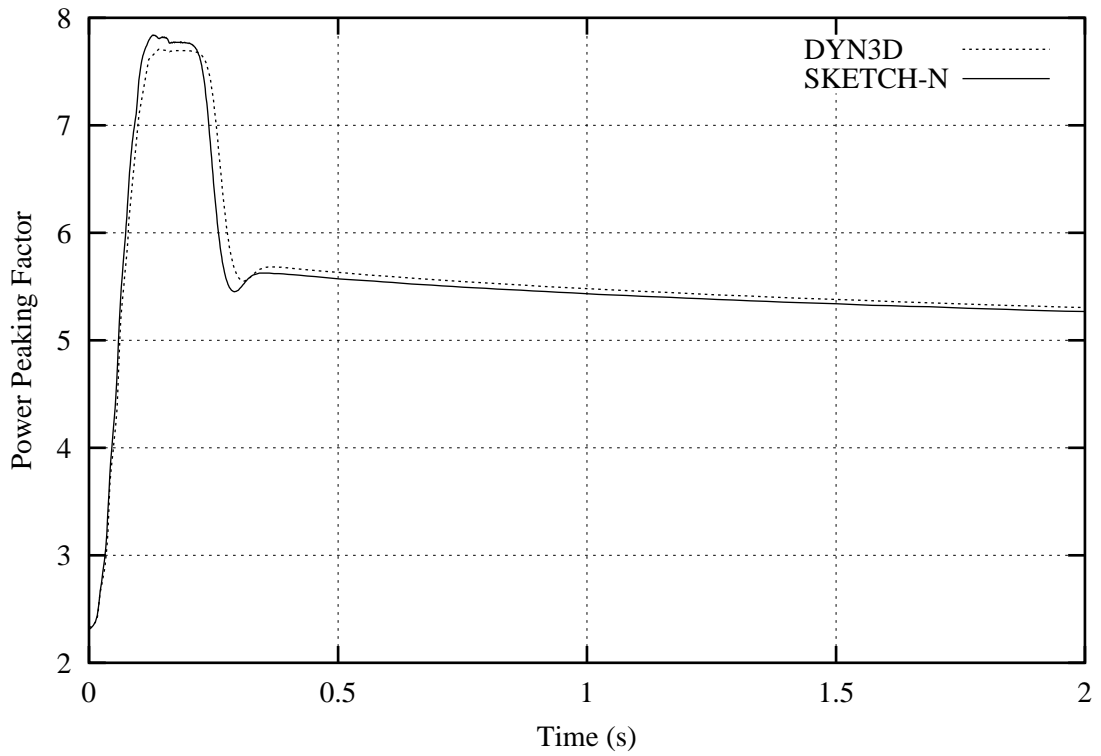


Рис. 9. Объемный коэффициент неравномерности поля энерговыделения

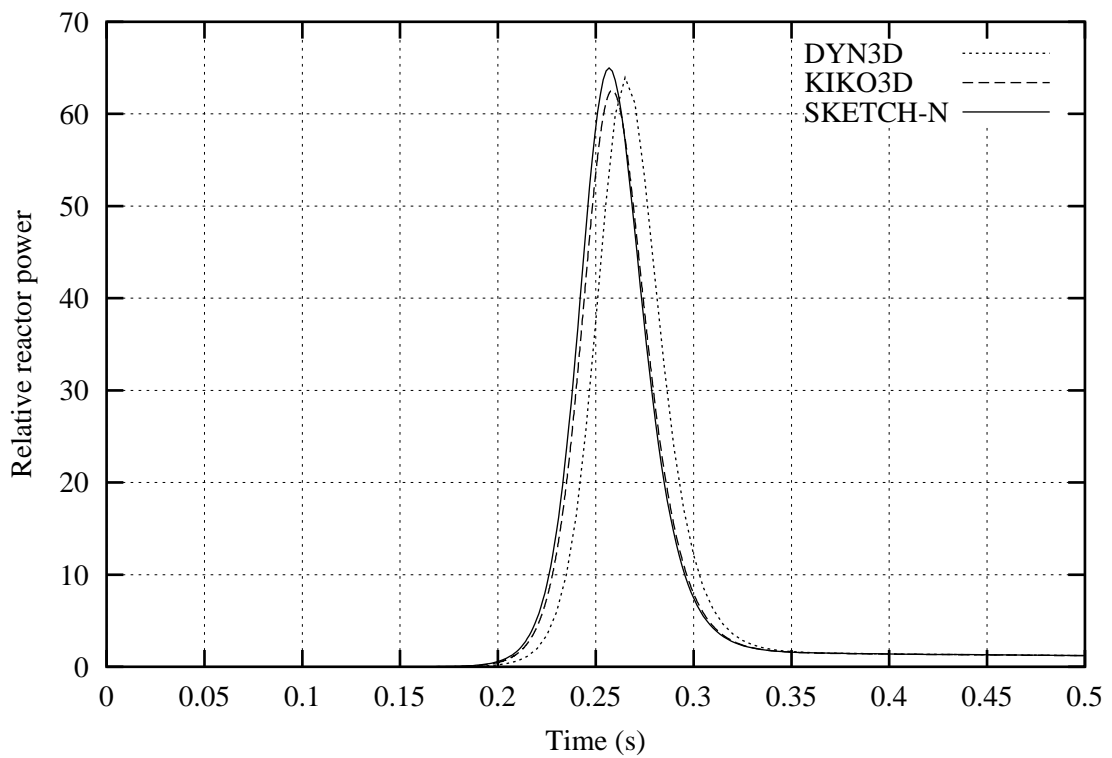


Рис. 10. Относительная мощность реактора $\Delta\rho_{\text{SKETCH-N}} \approx \Delta\rho_{\text{DYN3D}}$

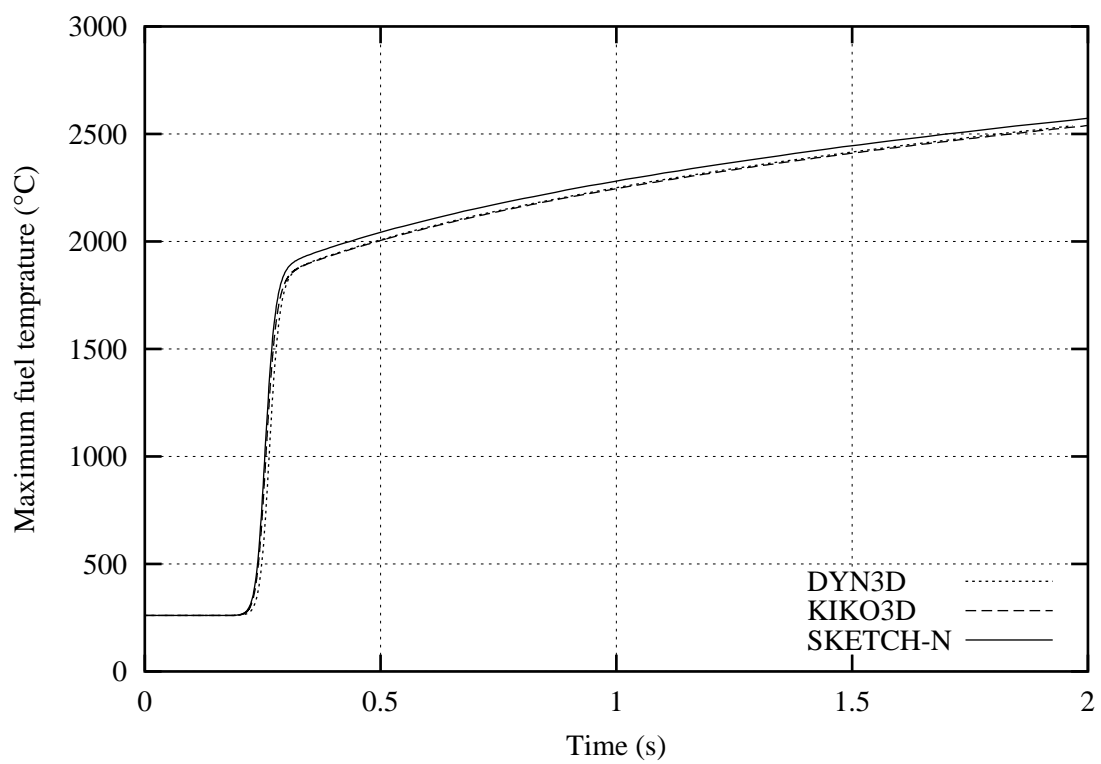


Рис. 11. Максимальная температура топлива $\Delta\rho_{\text{SKETCH-N}} \approx \Delta\rho_{\text{DYN3D}}$