

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.039.51

### ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

© 2020 г. Е. О. Солдатов<sup>а</sup>, \*, Ю. Н. Волков<sup>а</sup>, А. Е. Кругликов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: eo-soldatov@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В РНЦ “Курчатовский институт” имеется критический стенд АСТРА, на котором проводятся эксперименты по изучению нейтронно-физических особенностей реакторов типа ВТГР. Информация по оцененным экспериментам в настоящее время существует только для стационарных экспериментов и отсутствует для нестационарных, более того, в настоящее время еще не выполнен расчетный анализ большинства нестационарных экспериментов. Последняя задача требует расчета при помощи нейтронно-физического кода, который может решать нестационарные задачи с учетом пространственного распределения поля нейтронов. При рассмотрении сложных нейтронно-физических систем с числом расчетных точек более миллиона, время расчета может составлять час и более, а в случае нестационарного процесса с малым шагом по времени ожидание может составлять месяц. АСТРА является сложной системой с количеством расчетных точек порядка миллиона. Для ускорения нестационарного расчета могут быть использованы параллельные технологии. Целью исследования является внедрение эффективных методов стационарного вычислительного моделирования с использованием технологии распараллеливания в модуль для расчета нестационарных процессов. Разработана схема распараллеливания с разделением расчетных слоев по высоте. Проведен расчет нестационарных экспериментов с использованием параллельных технологий.

**Ключевые слова:** параллельные технологии, реактор, нейтронно-физический расчет, численные методы, нестационарный расчет

**DOI:** 10.1134/S2079562920060548

#### ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературный газовый реактор на основе микро топлива является одним из перспективных типов ЯЭУ, входящих в Поколение IV. В настоящее время в мире ведутся разработки ВТГР модульного типа (ВТГР-М) с шаровыми топливными элементами и модульного гелиевого реактора с газовой турбиной (ГТ-МГР) с призматическими ТВС. Реакторы такого типа обладают принципиальными преимуществами по безопасности, связанными с отсутствием плавления активной зоны при авариях с потерей теплоносителя.

В РНЦ “Курчатовский институт” имеется критический стенд АСТРА [1], на котором проводятся эксперименты по изучению нейтронно-физических особенностей реакторов такого типа. Поскольку АСТРА является критическим стендом, а не действующим реактором, на нем возможно определение исходных данных по основным материалам и элементам критической сборки с большей точностью, чем в работающем на мощности реакторе, так как в условиях критического стенда неопределенность в знании температур материалов

существенно меньше, а неопределенность изотопного состава топлива определяется только технологией его изготовления, поскольку эффекты выгорания, зашлаковывания и отравления в условиях критического стенда отсутствуют. Это позволяет использовать результаты экспериментов для верификации программ нейтронно-физического расчета высокотемпературных газографитовых реакторов.

Экспериментальные исследования на критическом стенде АСТРА охватывают следующий круг вопросов:

- экспериментальное моделирование полей энерговыделения (измерения распределений скоростей реакций деления);
- измерение эффективности органов СУЗ и коэффициентов их интерференции, определения градуировочных характеристик органов регулирования;
- измерение параметров нейтронной кинетики;
- экспериментальное моделирование физического пуска реактора

Расчетный анализ стационарных [2] и нестационарных [3] экспериментов требует расчета

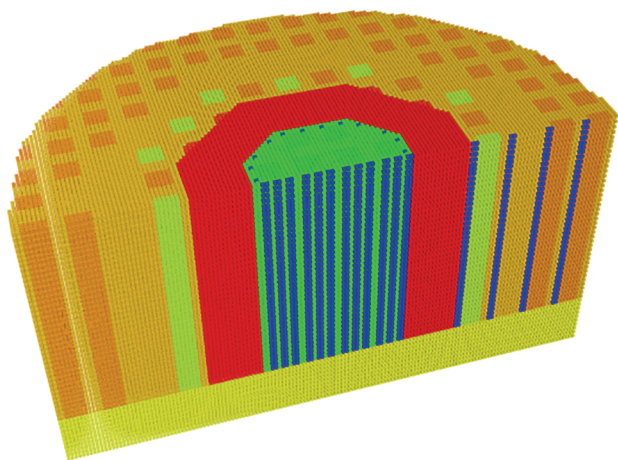


Рис. 1. Расчетная модель АСТРА в ПК ShIPR.

при помощи нейтронно-физического кода, который может решать нестационарные задачи с учетом пространственного распределения поля нейтронов. Одним из таких программных кодов является система ShIPR [4], которая содержит модули пространственного расчета в диффузионном приближении, решающие, в том числе, и нестационарные задачи.

Расчетная модель критического стэнда АСТРА включает в себя более 1 миллиона расчетных точек (рис. 1). В случае нестационарного процесса с малым шагом по времени, расчетное время может составлять месяц. Развитие персональных ЭВМ и суперкомпьютеров позволяет решать более детализированные задачи с высокой расчетной скоростью. Однако требуется специальная реструктуризация алгоритма численного решения с последовательного на параллельный.

Разработана методика параллельного расчета в случае стационарного процесса. [5] Целью исследования является внедрение методов стационарного вычислительного моделирования с использованием технологии распараллеливания в модуль для расчета нестационарных процессов.

В данное время разработано значительное количество диффузионных кодов с использованием параллельных технологий. Однако в аналогах отсутствует подробное описание разработанного параллельного интерфейса, что затрудняет реализацию похожего алгоритма.

Актуальность работы заключается в разработке и подробного описания эффективных методик и алгоритмов для решения стационарных и нестационарных задач переноса нейтронов в активной зоне ядерного реактора в диффузионном приближении с использованием параллельных вычислений.

## ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК

Расчеты пространственного распределения скоростей деления проводились с использованием программного комплекса ShIPR, подготовка макроконстант — кодом WIMS-D/4 [6].

ShIPR [4] (Интеллектуальная программная оболочка для математического моделирования сложных объектов) интегрированная среда разработки прикладных программ на языке Фортран с автоматической генерацией головных программ на основе цепочки вычислительных модулей, реализующих основные этапы нейтронно-физического расчета реакторов. Достоинством данной системы является открытость исходных кодов, соответственно, удобство в модернизации нейтронно-физического расчета под конкретные задачи. В системе SHIPR есть набор модулей, которые обеспечивают согласованное решение трехмерных стационарных и нестационарных задач в многогрупповом диффузионном приближении.

Моделирование нестационарных процессов осуществляется методом квазидиффузии. Метод квазидиффузии позволяет, во-первых, учесть временную зависимость в макроскопических квазидиффузионных уравнениях для плотности потока нейтронов и, во-вторых, существенно сократить число итераций по рассеянию и делению. Применение метода квазидиффузии позволяет решать уравнение переноса в стационарном приближении, оставляя корректный учет нестационарности на долю уравнений квазидиффузии [7].

Расчетная модель конфигураций критического стэнда АСТРА имеет большое количество точек сетки (конфигурация 1 — 1099952; конфигурация 7 — 2037616), расчет которых проводится итерационно [2, 3]. В модуле ShIPR была разработана схема распараллеливания с использованием технологии MPI (Message Passing Interface).

Основным принципом распределения вычислительной работы по узлам является разделение расчетной области на слои по оси  $z$ . Каждый процессор содержит все массивы, необходимые для расчета, ограниченные в пространстве только размером своей области (рис. 2). Во время итераций происходит обмен данными между процессорами. По окончании расчета каждый процессор отправляет “нулевому” процессору вычисленную компоненту плотности потока нейтронов. “Нулевой” процессор получает компоненты плотности потока нейтронов от всех процессоров и суммирует их вклады для каждой ячейки. В «нулевом» процессоре проводится сравнение массива плотности потока нейтронов на текущей и предыдущей итерации. Проверяется критерий точной относительной разности по отношению к заданной точности ( $\epsilon$ ). Если критерий  $\epsilon$  удовлетворяется, “нулевой” процессор отправляет распределе-

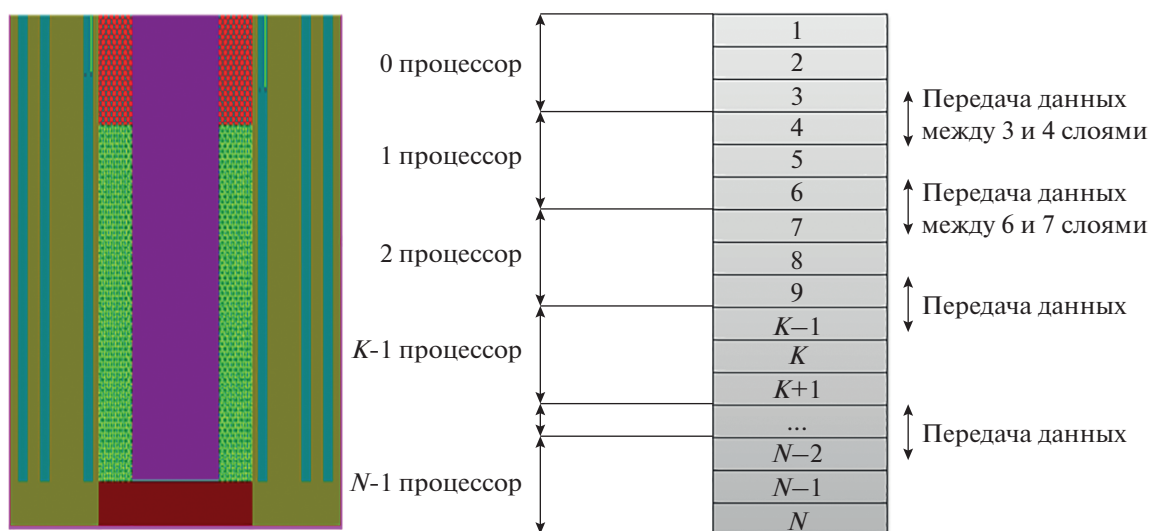


Рис. 2. Высотное разбиение расчетной модели для MPI технологии.

ние плотности потока нейтронов на хост, который успешно завершает выполнение [5].

### ИНТЕГРАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ МЕТОДИКИ В НЕСТАЦИОНАРНЫЙ МОДУЛЬ

При моделировании нестационарного процесса на каждом временном шаге проводится стационарный расчет с параллельной архитектурой MPI. На стенде АСТРА проводились эксперименты с импульсным источником. Для экспериментов с импульсным источником характерно сильное перераспределение плотности потока нейтронов по энергии и пространству в начальный момент времени. Для корректного моделирования нестационарного процесса на начальном этапе расчета следует брать шаг по времени порядка  $10^{-8}$  с.

Так как сильное изменение потока происходит только в малом промежутке времени, то в дальнейшем расчете использование малого шага не требуется. Необходимо реализовать программу, которая автоматически подбирала бы длину шага так, чтобы локальная погрешность не превышала заданный пользователем допуск. Визуализация полученной программы представлена на рис. 3.

Пользователем задается предельная величина погрешности и количество процессоров ( $N$ ) в пределах одного расчетного ноды. Программа выполняет параллельно два расчета. Первая половина процессоров считает задачу с текущим временным шагом ( $h$ ), вторая половина процессоров проводит расчет с удвоенным шагом. По окончании расчета массивы плотности потока нейтронов для вариантов с текущим и удвоенным шагом передаются в “нулевой” процессор. В “нулевом” процес-

соре оценивается максимальное отклонение в плотности потока нейтронов двух вариантов. Далее проводится расчет нового шага по времени [8].

Вычисление нового шага по времени осуществляется по методике адаптивного шага. Новая длина временного шага выбирается следующим образом:

$$h_{\text{new}} = h \min(\text{facmax}, \text{fac} \sqrt{\epsilon/\text{err}}).$$

Для того чтобы погрешность была приемлемой используется гарантийный фактор  $\text{fac}$ . Кроме того, нельзя допускать, чтобы длина временного шага возрастала или убывала слишком быстро. В формуле адаптивного шага задается максимальная величина шага  $\text{facmax}$ . Минимальная величина шага задается в тексте программы и составляет  $10^{-8}$  с. Данный подход учитывает, что максимальное отклонение ( $\text{err}$ ) может как больше, так и меньше заданного предела точности ( $\epsilon$ ). В случае, если максимальное отклонение меньше заданной погрешности, временной шаг будет увеличиваться. При превышении заданной погрешности временной шаг будет уменьшаться. Можно утверждать, что подход адаптивного шага обладает гибкостью.

Проведены расчеты стационарных и нестационарных экспериментов с использованием параллельных технологий. Для расчета использовался суперкомпьютер, включающий в себя 20 вычислительных узлов. Каждый узел состоит:

- 2 × E5-2680 Intel Xeon CPU;
- 8 физических ядер на CPU;
- 2 потока на физическое ядро;
- 128 GB RAM (DDR3 1600 MHz);
- 300 GB HDD.

Проведен расчет ускорения для параллельной части кода в стационарном варианте. Параллель-

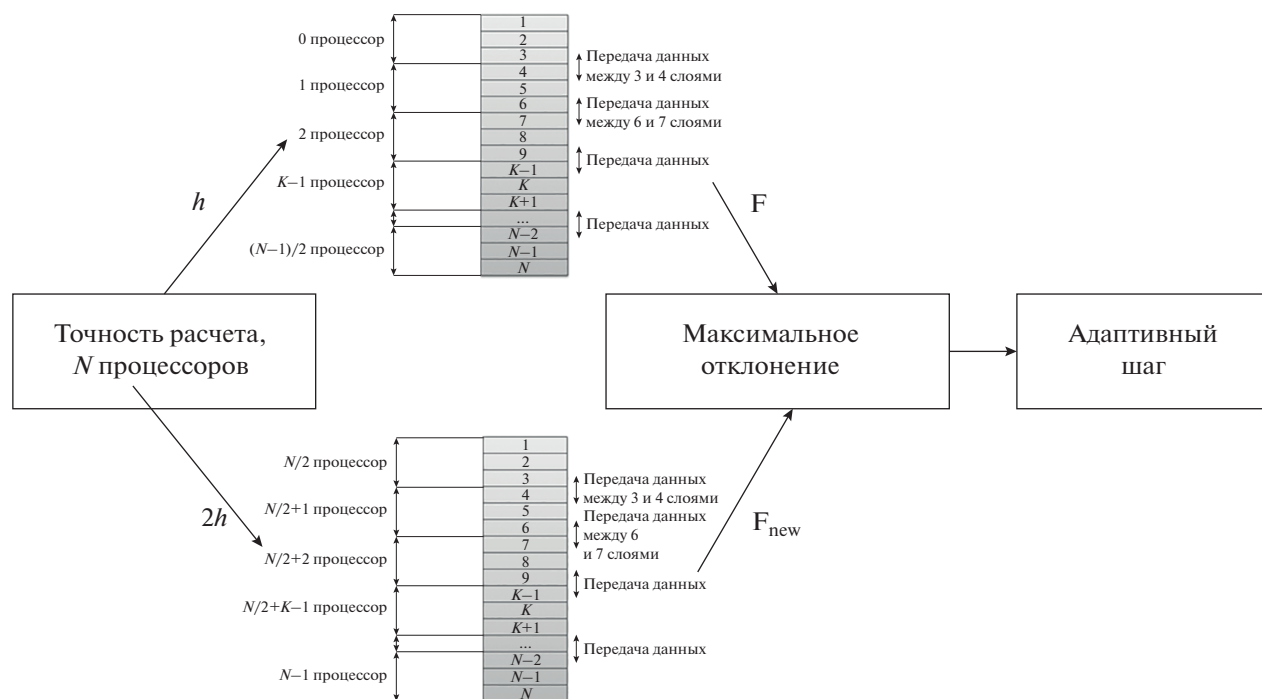


Рис. 3. Визуализация программы моделирования нестационарного процесса.

ная часть не содержит последовательных строк, которые рассчитываются только в “нулевом” процессоре. Ускорение определяется как отношение времени расчета для всей задачи без использования параллельного интерфейса и времени расчета для всей задачи с использованием параллельного интерфейса. Моделирование проводилось на одном вычислительном узле для минимизации передач данными между узлами. На рис. 4 представлено ускорение параллельной части кода и сравнение с линейной зависимостью.

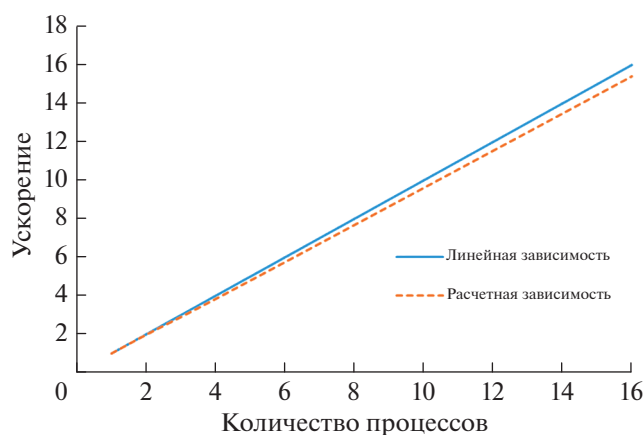


Рис. 4. Ускорение параллельной части кода и сравнение с линейной зависимостью.

Ускорение параллельной части кода, рассчитанное с использованием технологии MPI, практически совпадает с линейной зависимостью. Совпадение расчетного ускорения показывает, что архитектура MPI была разработана правильно. Отклонение рассчитанной зависимости от линейной зависимости объясняется задержками компьютера.

В компьютерной архитектуре закон Амдала дает теоретическое ускорение при использовании различного количества процессоров. Теоретическое ускорение зависит от количества процессоров и доли последовательной части кода.

Получено ускорение для всей задачи с использованием параллельного интерфейса. Сравнение расчетной и теоретической кривых показывает, что разработанная схема распараллеливания имеет меньшее ускорение из-за потерь.

На рис. 5 представлены кривые расчетной зависимости, теоретической зависимости по закону Амдала и расчетной зависимости без учета потерь.

Разработанная схема распараллеливания позволяет получить ускорение в 8 раз при использовании 16 процессоров. Расчетная зависимость без потерь показывает согласие с законом Амдала. Описание потерь представлено в [5].

Проведен расчет нестационарного эксперимента для 8 конфигурации критического стенда АСТРА. Данная конфигурация была выбрана из-за ее сложной расчетной модели. Время расчета

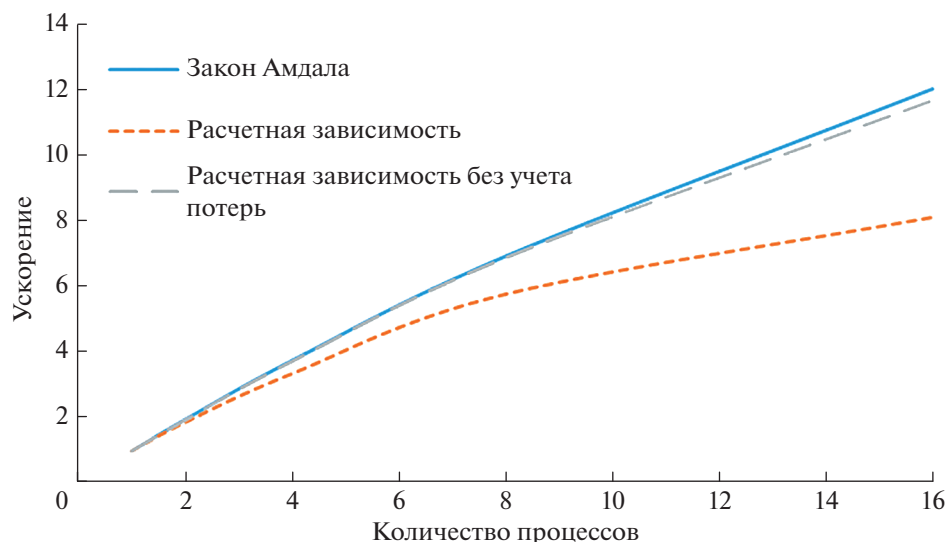


Рис. 5. Сравнение расчетной зависимости, закона Амдала и расчетной зависимости без потерь

эксперимента с MPI архитектурой и методикой адаптивного шага не превышает 10 дней. На рис. 6 представлен график зависимости плотности потока нейтронов от времени для конфигурации 8 в трех положениях датчиков.

Оценивается, что при расчете нестационарного процесса с высокой точностью с использованием параллельных технологий возможно получить ускорение в 10 раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана схема распараллеливания с использованием технологии MPI в модуле ShIPR. Основным принципом распределения вычислитель-

ной работы по узлам является разделение расчетной области на слои по оси  $z$ .

Проведена интеграция параллельной методики в нестационарный модуль ПК ShIPR. В новой версии программы ShIPR, описанной в данной статье, внедрена параллельная технология с методикой адаптивного шага. Реализованная программа в ходе расчета автоматически подбирает длину временного шага так, чтобы локальная погрешность не превышала заданный пользователем допуск. Внедрение методики адаптивного шага позволяет дополнительно уменьшить время расчетного моделирования в зависимости от заданной точности.

Проведены расчеты стационарных и нестационарных экспериментов с использованием параллельных технологий. Моделирование проводилось на одном вычислительном узле для минимизации передач данными между узлами. На этапе апробации реализованной параллельной технологии проведена оценка ускорения параллельной части кода. Ускорение параллельной части кода, рассчитанное с использованием технологии MPI, практически совпадает с линейной зависимостью. Совпадение расчетного ускорения показывает, что архитектура MPI была разработана правильно. Расчет стационарного состояния показал, что разработанная схема распараллеливания позволяет получить ускорение в 8 раз при использовании 16 процессоров.

Проведен расчет нестационарного эксперимента для 8 конфигурации критического стенда АСТРА. Время расчета эксперимента с MPI архитектурой и методикой адаптивного шага не превышает 10 дней. Оценивается, что при расчете нестационарного процесса с высокой точностью с использованием разработанной методики возможно получить ускорение в 10 раз. В дальнейшем будут

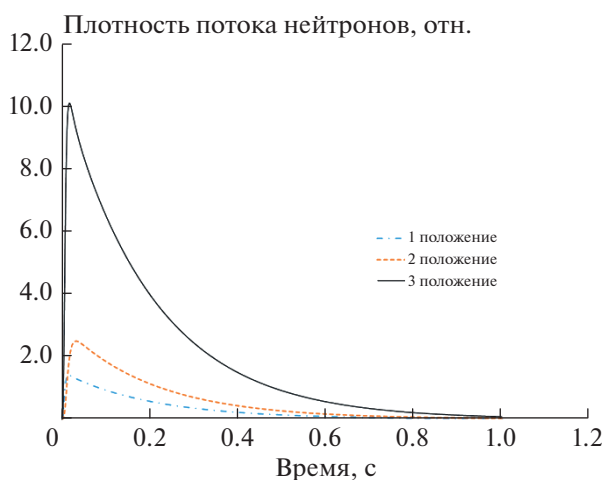


Рис. 6. Расчет нестационарного эксперимента для 8 конфигурации.



проведены исследования дополнительного увеличения ускорения за счет минимизации потерь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ponomarev-Stepnoi N.N. et al.* // Nucl. Eng. Des. 2003. V. 222. P. 215–229.
2. *Zizin M.N. et al.* // KERNTECHNIK. 2020. V. 85. No. 1. P. 4–8.
3. *Volkov Y.N. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1133. P. 012033.
4. *Зизин М.Н.* Интеллектуальная программная система ShIPRW для математического моделирования ядерных реакторов. [Intellectual Software System ShIPRW for Mathematical Simulation of Nuclear Reactors] // Препринт ИАЭ-6354/5. 2005.
5. *Soldatov E.O. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1689. P. 012074.
6. *Askew J.R. et al.* // J. Br. Nucl. Energy Soc. 1966. V. 5. P. 564–585.
7. *Nakamura S.* Applied Numerical Methods with Software. 1991. Upper Saddle River: Prentice-Hall.
8. *Crouzet N. et al.* // Nucl. Sci. Eng. 1996. V. 123. No. 2. P. 206–214.

## Parallel Calculation of Non-Stationary Processes in the Nuclear Reactor

**E. O. Soldatov<sup>1</sup>, \*, Yu. N. Volkov<sup>1</sup>, and A. E. Kruglikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia*

*\*e-mail: eo-soldatov@mail.ru*

Received March 3, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

Kurchatov Institute has a critical ASTRA stand, where experiments are carried out to study the neutron-physical characteristics of VTGR-type reactors. Information on the evaluated experiments currently exists only for stationary experiments and is absent for non-stationary ones; moreover the calculation analysis for most part of non-stationary experiments has not been carried out yet. The last task demands the calculation by neutron code to be able to solve time-dependent problems in accordance to space distribution of neutron field. When considering the complex neutron-physical systems with the number of calculation points than 1 million, the calculation time can be an hour or more, and in case of non-stationary process with the small step of time, the waiting can be a month. ASTRA is a complex system with about 1 million calculated points. Parallel technologies can be used to speed up the non-stationary calculation. The aim of the study is to imply efficient methods of stationary computational modeling using parallelization technology into a module for calculating non-stationary processes. A parallelization scheme with height decomposition has been developed. The calculation of non-stationary experiments using parallel technologies is carried out.

**Keywords:** parallel techniques, reactor, neutron-physical calculation, numerical methods, non-stationary calculation