

## ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАГРУЗКИ И ПЕРЕГРУЗОК ТОПЛИВА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

**А.В. Соболев, А.С. Газетдинов\*, Д.С. Самохин**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»*

*249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1*

*\* ФБУ «НТЦ ЯРБ»*

*107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5*



Рассматриваются подходы к использованию генетического алгоритма для оптимизации загрузки и последующих перегрузок тепловыделяющих сборок в активной зоне ядерного реактора. Отмечается сложность использования классических методов, основанных на сплошном сканировании фазового пространства или градиентных подходах. Обсуждаются вопросы выбора критерия оптимизации, в качестве которого использована глубина выгорания топлива. Глубина выгорания оценивается после выгрузки тепловыделяющей сборки из активной зоны, т.е. после отработки трех кампаний.

Важным аспектом, определяющим эффективность использования генетического алгоритма в рассмотренной задаче, является выполнение физического расчета активной зоны реактора с детализацией, позволяющей «чувствовать» изменение взаимного расположения топливныхборок. Использование грубого инструмента приводит к бесполезности предложенного подхода к оптимизации загрузки активной зоны реактора. Другая крайность – избыточная детализация – влечет значительный рост затрат машинного времени. Для проведения анализа нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора использован пакет прикладных программ TRIGEX [1, 2], обеспечивающий приемлемую подробность модели и чувствительность результатов к изменениям в загрузке реактора.

Генетический алгоритм включает в себя использование, как минимум, двух основных процедур – селекции и мутации. Наиболее важным для применения генетического алгоритма является определение *мутации, скрещивания, особи*. Приводятся основные рекомендации к организации процедур скрещивания и мутации.

Эффективность использования разработанной модели генетического алгоритма показана на тестовом примере реактора на быстрых нейтронах большой мощности. Результаты теста показали, что использование предложенного подхода позволяет выполнять поиск картограмм оптимальных загрузок реактора для каждой перегрузки. Основной целью работы является демонстрация пригодности и эффективности нового современного подхода к решению задачи загрузки топливом ядерного реактора.

**Ключевые слова:** оптимизация топливной загрузки и перегрузок, глубина выгорания, генетический алгоритм, ядерный реактор.

© А.В. Соболев, А.С. Газетдинов, Д.С. Самохин, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из определяющих факторов в области развития атомной энергетики является разработка новых и совершенствование существующих ядерных топливных технологий, в частности, достижение больших глубин выгорания топлива. Для решения этой задачи требуется разработка как новых конструкционных материалов и типов топлива, так и новых систем для управления реактором. Одним из способов повышения глубины выгорания является оптимизация загрузки и перегрузок топлива. Оптимизация топливных загрузок эффективна как для новых типов реакторов, так и для уже существующих. Например, известна работа по формированию топливных загрузок на реакторах ВВЭР-440 при работе на повышенном уровне мощности для Кольской АЭС [3]. Работа [4] посвящена оптимизации перегрузок топлива в реакторе ВВЭР 440. Работа [5] приводит подходы к оптимизации топливной загрузки реактора с помощью эволюционного моделирования. В данной статье рассмотрен пример оптимизации топливных загрузок и перегрузок реактора с помощью генетического алгоритма.

В качестве примера выбрана топливная загрузка, близкая по конфигурации к реактору на быстрых нейтронах большой мощности (далее по тексту – БН), с двумя перегрузками. В процессе перегрузки происходит извлечение тепловыделяющих сборок (ТВС), отработавших три кампании, перестановка оставшихся ТВС и загрузка свежих. Данный тип реактора выбран для примера, в рамках которого отработан подход к организации оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов. Разработанный подход можно адаптировать под активную зону реактора любого типа.

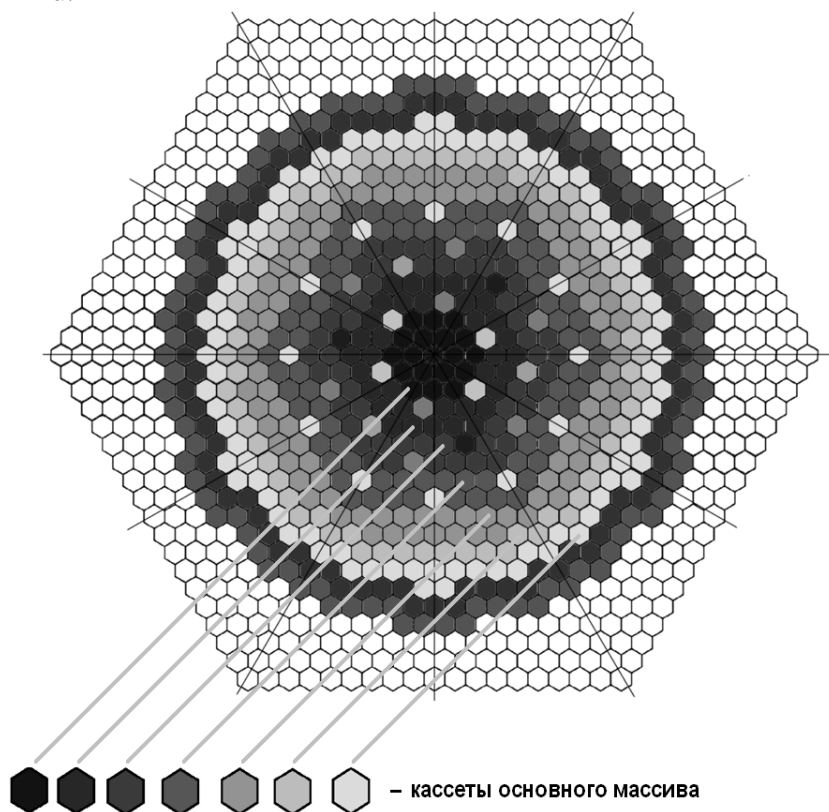


Рис.1. Картограмма активной зоны реактора типа БН

Поскольку предметом исследования данной работы не является конкретный реактор, здесь приводится минимальный набор параметров активной зоны ядерного реактора, необходимый для проведения поисковых исследований. Наиболее важной информацией для реализации топливной оптимизации является картограмма первичной загрузки (рис. 1) и количество ТВС – 606 шт. [6 – 8].

Следует отметить, что для выбранной задачи на примере реактора типа БН полный список перестановок ТВС составляет  $606^{3(606-1)/2}$  вариантов. Это список из практически бесчисленного множества вариантов. Здесь и проявляется главное достоинство генетического алгоритма – поиск «достаточно хорошего» решения за «достаточно малое время». При больших размерностях задач и отсутствия порядка в начальных данных генетический алгоритм обладает несомненным достоинством перед классическими методами (метод градиентного спуска и подобные) [9].

### **КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

В качестве критерия оптимизации выбран максимум глубины выгорания топлива. В данном случае оптимизация однокритериальная и критерий достаточно простой. Переход к многокритериальной оптимизации может быть легко осуществлен с помощью введения функций ценности или других известных методов.

Критерием оптимизации может служить иной параметр, например, эффективный коэффициент размножения нейтронов [10].

При оптимизации топливной загрузки и дальнейших перегрузок топлива глубина выгорания определялась как отношение разницы масс первоначально загруженных тяжелых элементов и выгруженных из реактора к массе загруженных в реактор [11]. Поскольку необходима некоторая интегральная характеристика по всем кассетам, которые проработали три кампании реактора, масса выгруженных тяжелых элементов усреднялась по массиву ТВС после трех кампаний. Иными словами, бралась средняя глубина выгорания (в процентах) только для тех кассет, которые проработали в реакторе три кампании. При этом каждая кассета перегружается дважды, т.е. имеет свою уникальную траекторию перемещений от загрузки до выгрузки.

Организация оптимизации загрузки и траекторий перемещений топливных сборок требует учета выгорания топлива, накопления продуктов распада осколков деления и их участия в ядерных реакциях для каждой сборки. Причем чем более детальный учет этих явлений будет организован, тем более качественные будут результаты. Кроме этого для каждого варианта расположения ТВС необходимо рассчитывать распределение плотности потока нейтронов по активной зоне реактора. Таким образом, для получения более или менее адекватных результатов необходимо привлечение расчетных комплексов, позволяющих выполнять расчет распределения плотности потока нейтронов по активной зоне реактора и расчет выгорания. Важно, что эти комплексы должны учитывать гетерогенность активной зоны до ТВС.

В качестве комплекса для расчета поля плотности потока нейтронов и процессов выгорания использован TRIGEX с константным обеспечением CONSYST [12]. При учете выгорания для каждой отдельной сборки на протяжении трех кампаний реактора используется приближение – выгорание топлива и накопление продуктов распада осколков деления выполнено для каждого типа сборок (всего семь типов), а не каждой отдельной сборки. Это обусловлено нацеленностью исследования не на получение конкретного результата для рассматриваемого типа реактора, а на проверку работоспособности метода, позволяющего существенно сократить общую длительность машинных расчетов.

**ПРИНЦИП ОПТИМИЗАЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ**

Генетические алгоритмы – это адаптивные методы поиска, которые в последнее время используются для решения задач оптимизации. В них используются как аналог механизма генетического наследования, так и аналог естественного отбора. При этом сохраняются биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры.

Генетический алгоритм лишен каких-либо строго предопределенных и отличительных для него математических теорий и строгих соотношений – законов, вся математика для этого метода определяется исследователем из конкретной практической задачи. К примеру были проведены работы по применению генетического алгоритма в задачах оценки показателей надежности и безопасности [13], а также оптимизация топливообеспечения в реакторах с жидкометаллическим теплоносителем [10].

Кроме функции приспособленности (критерий оптимизации), определяющей качество полученного результата, необходимы также и механизмы (методы) «движения» – эволюции. Так, в окружающем нас живом мире существует, как минимум, два таких механизма – это механизмы селекции и мутации [9].

В качестве исходной точки (точки отправления) при решении конкретных практических задач генетическими алгоритмами является начальная популяция [14 – 22], состоящая из конечного числа особей с уже составленными хромосомами и конкретными значениями генов-параметров. Эта исходная популяция подвергается воздействию механизма мутации, в результате чего изменяются, в конечном счете, значения функции «приспособленности» у особей, подвергшихся мутации. Далее происходит формирование нового поколения особей, где вступает в действие механизм селекции. Причем в новое поколение отбираются особи, получаемые в результате селекции, и особи из предыдущего поколения. Необходимо отметить, что особи, более приспособленные (т.е. имеющие лучшее значение функции «приспособленности»), с большей вероятностью произведут потомство (т.е. будут отобраны механизмом селекции для образования новой особи) и попадут сами в следующее поколение. Таким образом, в каждое новое поколение отбираются наборы критериев, называемые здесь *особями* или хромосомами, наилучшим образом удовлетворяющие заданному соотношению функции «приспособленности».

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ И ПЕРЕГРУЗОК**

Критерием оптимизации является средняя глубина выгорания свежего топлива за три кампании реактора. Следует определить принцип работы механизма мутации и селекции и понятие особи.

**Особь** – набор из трех картограмм (загрузка и две перегрузки топлива реактора) со своим уникальным расположением типов топливных кассет, как минимум, на одной из трех картограмм. Так, особь представляется строкой с тремя параметрами

$$[K1, K2, K3], \quad (1)$$

где **K1** – картограмма активной зоны реактора для первой кампании; **K2** – второй кампании; **K3** – третьей кампании.

**Мутация** в данном случае определена как случайная замена местами двух случайно выбранных ТВС. Причем не допускается выбор сборок, имеющих одинаковый тип (обогащение, длительность работы и т.п.). Не менее важно, что мутация (замена) может произойти как на картограмме первичной загрузки свежего топлива, так и на картограммах перегрузки ядерного топлива. Этот выбор реализуется случайно каждый раз, когда действует мутация.

**Отбор** особи для воздействия механизма мутации выполняется случайно по экспоненциальному закону распределения с параметром распределения меньшим или равным обратной величине численности популяции. Это объясняется тем, что мутация – все же редкое явление и должна подчиняться закону распределения редких событий, т.е. экспоненциальному распределению.

**Селекция** реализована как случайная замена одной из картограмм в одной из двух родительских особей. Так, после выбора двух родительских особей выполняется формирование новой особи путем замены случайно выбранной картограммы у первой или второй родительской особи на картограмму от другой родительской особи. Причем не допускается выбор в качестве родительских особей одной и той же. Иллюстрация механизма селекции представлена на рис. 2.

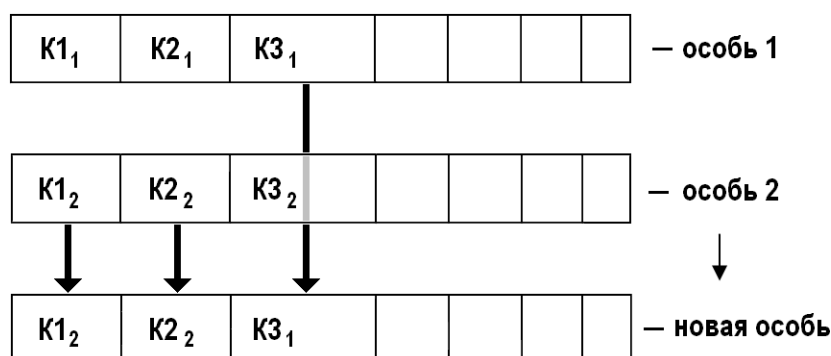


Рис. 2. Иллюстрация механизма селекции

Отбор родительской особи для селекции каждый раз выполняется случайно по нормальному закону распределения с центром в 1 и дисперсией, не превосходящей обратной величины численности популяции. Это объясняется тем, что селекция – это основной механизм развития и наследования. Соответственно вероятность отбора «родителей» должна подчиняться закону частых событий, т.е. нормальному.

Выше описаны механизмы отбора особей для селекции и для мутации. К этому следует добавить, что перед запуском механизмов селекции и мутации должны быть рассчитаны значения критерия оптимизации («приспособленности») для всех особей в популяции. Одновременно с этим следует выполнять сортировку популяции по величине критерия оптимизации от максимума к минимуму.

Первая популяция формируется из одной базовой особи воздействием механизма мутации до набора требуемой численности популяции.

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕГРУЗКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БН**

В рамках выполненного исследования популяция состояла из 50-ти особей, и было смоделировано три поколения.

Для селекции стандартное отклонение распределения Гаусса задано численностью популяции.

Формирование нового поколения производится на 60% механизмом селекции, на 20% механизмом мутации и на 20% переходом первых наилучших по величине критерия оптимизации особей в новое поколение.

Следует отметить, что процесс оптимизации был автоматизирован с помощью созданных программных кодов, выполняющих формирование исходных файлов для запуска расчетов в TRIGEX и обработки выходных файлов результатов расчетов; реализацию механизмов селекции и мутации; формирование первой и последующих популяций.



Для рассмотренного в качестве примера варианта активной зоны реактора БН получено, что для базовой топливной загрузки и траектории движения топлива (перестановки при перегрузках) глубина выгорания составляет 8%, а для найденной оптимальной загрузки и траектории глубина выгорания составляет 9,7%. Выигрыш от оптимизации составляет около 1,7%, что дает колоссальный экономический эффект.

Для расчета глубины выгорания одной особи, состоящей из трех кампаний, уходит 40 минут машинного времени (расчет первой кампании 20 минут, расчет второй и третьей кампании 10 минут). Это ограничило возможность произвести анализ с помощью эволюционного моделирования большего числа поколений и популяций большей численности (40 минут на одну особь; в случае рассмотрения 500 особей и 20-ти поколений получаем значительные затраты машинного времени). Однако даже такой сокращенный вариант привел к хорошим результатам и показал высокую эффективность применения генетического алгоритма в данной задаче.

Усреднение глубин выгорания по каждому поколению особей дало среднюю глубину: для первого поколения ~8,49%; для второго – ~8,4%; для третьего – ~8,42%. Значения для второго и третьего поколений наглядно показывают, что генетический алгоритм производит поиск оптимальных решений вне зависимости от везения, которое здесь реализовалось в первом поколении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование и предложена методика оптимизации топливной загрузки и перегрузок реактора на примере реактора типа БН с помощью модели генетического алгоритма. В рамках предложенной методики указаны все основные моменты, касающиеся реализации генетического алгоритма. Не менее важно еще раз обратить внимание, что выбранный в качестве примера вариант активной зоны реактора БН описан по минимуму и является лишь примером, взятым из личных соображений авторов.

Основным результатом работы является демонстрация применимости и эффективности использования эволюционного моделирования (генетического алгоритма) в задачах компоновки активной зоны реактора, включая перегрузки топлива. Другим не менее важным результатом являются конкретные указания к организации генетического алгоритма (алгоритмы селекции и мутации).

## Литература

1. Кислицина Т.С., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ TRIGEX № 2013618540 от 11 ноября 2013 г.
2. TRIGEX.051. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный № 313 от 9 октября 2012 г. / Паспорт ФБУ «НТЦ ЯРБ».
3. Адеев В.А. Опыт формирования топливных загрузок реакторов ВВЭР-440 при работе на повышенном уровне мощности / В.А. Адеев, А.Е. Панов, И.С. Меленчук. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-043.pdf> (дата обращения: 13.12.2015).
4. Самохин Д.С. Генетический алгоритм в задачах оптимизации перегрузки ядерного топлива в РУ типа БН / Д.С. Самохин, В.С. Слотин / Тез. докл. XIII Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров» 1 – 5 октября 2013. – Обнинск: ИАТЭ, 2013. – С. 251.
5. Соболев А.В. Оптимизации топливной загрузки ядерного реактора с помощью эволюционного моделирования / А.В. Соболев, А.С. Газетдинов / Тез. докл. IV Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» 27 – 30 сентября 2016. – Москва: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2016. – 122 с.
6. Авдеев Е.Ф. Расчетное обоснование конструкции стенда для исследования тепломассообмена в активной зоне реактора БН-1200 / Е.Ф. Авдеев, С.Т. Лескин, И.А. Чусов и др. / Сб. тр. II Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» 6 – 8 октября 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – 152 с.

7. Белов С.Б. Результаты верификации программ расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора типа БН-1200 / С.Б. Белов, А.В. Киселев, Е.В. Марова и др. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов – 2014. – № 4. – С. 66.
8. Шепелев С.Ф. Проект БН-1200. Электронный ресурс:  
<http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/2512d560b136e33f06e679b1e183cfc0.pdf>  
(дата обращения: 13.12.2015).
9. Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика (учебное пособие). – СПб.: ГУАП, 2008. – 52 с.
10. Toshinsky V.G. A method to improve multiobjective genetic algorithm optimization of a self-fuel-providing LMFBR by niche induction among nondominated solutions. / V.G. Toshinsky, H. Sekimoto, G.I. Toshinsky // Annals of Nuclear Energy. – 2000. – No. 27 (5). – PP. 397-410.
11. Бать Г.А. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Учеб. пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алхутов; под ред. Г.А. Батя. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.
12. ГНЦ РФ-ФЭИ. – Вычислительные коды и комплексы. Электронный ресурс:  
<http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/comp/4-1-1.php> (дата обращения: 13.12.2015).
13. Волков Ю.В. Разработка методов и оценка показателей надежности персонала по статистике инцидентов на АЭС РФ / Ю.В. Волков, Д.С. Самохин, А.В. Соболев, А.Н. Шкаровский // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С 15-24.
14. Давидюк Н.В. Формирование начальной популяции в процедуре генетического поиска варианта эффективного расположения средств обнаружения на объекте защиты / Н.В. Давидюк, С.В. Белов // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 1. – С. 114-118.
15. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
16. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский, пер. с польск. – М: Горячая линия - Телеком, 2008. – 452 с.
17. Скобцов Ю.А. Основы эволюционных вычислений / Учеб. пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с.
18. Poli R. A Field Guide to Genetic Programming / R. Poli, W.B. Langdon, N.F. McPhee – Электронный ресурс: <http://www.Lulu.com> (дата обращения: 10.09.2015).
19. Кошев А.Н. Разработка генетического алгоритма с адаптивными мутациями для определения глобального экстремума функции  $n$ -переменных / А.Н. Кошев, В.В. Салмин, А.А. Генералова, Д.С. Бычков // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8. – № 6. Электронный ресурс: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN616.pdf> (дата обращения: 16.11.2016).
20. Генералов К.А. Математическое обеспечение и программные средства реализации генетических алгоритмов на основе теории нумерации. Дисс. канд. техн. наук: 05.13.17, 05.13.11. – Пенза, 2009. – 178 с.
21. Дьячков Ю.А. Прикладная оптимизация в проектировании колесных машин. Учеб. пособие. / Ю.А. Дьячков, А.А. Семенов, А.А. Генералова – М.: Мир науки, 2016. – 210 с.
22. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФизМатЛит, 2006. – 320 с.

Поступила в редакцию 08.06.2016 г.

#### Авторы

Соболев Артем Владимирович, старший преподаватель каф. РКР

E-mail: SobolevArtem82@gmail.com

Газетдинов Азамат Салаватович, инженер ФБУ «НТЦ ЯРБ»

E-mail: azmt2008@gmail.com

Самохин Дмитрий Сергеевич, и.о. начальника отдела ИЯФиТ НИЯУ МИФИ

E-mail: dssamokhin@mephi.ru

## GENETIC ALGORITHMS FOR NUCLEAR REACTOR FUEL LOADING AND RELOADING OPTIMIZATION PROBLEMS

Sobolev A.V., Gazetdinov A.S.\* , Samohin D.S.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety

2/8 bld. 5 Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140 Russia

### ABSTRACT

The article provides the prerequisites for the use of a genetic algorithm for optimization of loading and subsequent overloads of fuel assemblies in the nuclear reactor core. The reason why the use of classical methods based on continuous scanning of phase space or gradient approaches is unacceptable is given. The questions of choosing an optimization criterion are briefly discussed, in the quality of which the burn up depth of fuel is used. The burn up depth is estimated after the fuel assembly is unloaded from the core, i. e. after working off 3 campaigns.

An important aspect determining the efficiency of the use of the genetic algorithm in the considered task is the performance of the physical calculation of the reactor core with the detailing allowing to «feel» the change in the relative location of the fuel assemblies. The use of a coarse instrument leads to the uselessness of the proposed approach to optimizing the loading of the reactor core. On the other hand, excessive detailing entails a significant increase in the expenditure of computer time. In the presented work, the TRIGEX software package was used to analyze the neutron-physical characteristics of the reactor core, which provides an acceptable detailing and sensitivity of the results to changes in the reactor load.

The genetic algorithm implies the use of at least two basic procedures - selection and mutation. One of the most important questions for the application of the genetic algorithm is the definition of the basic concepts such as mutation, crossing, and specimen. The answers to these questions for this problem are given in the article. In addition, the main recommendations for the organization of procedures for crossing and mutation are also given.

The efficiency of using the developed model of the genetic algorithm is demonstrated in a test example of a BN type reactor. The results of the test application showed that the use of the proposed approach allows to search for optimal reactor loads, in the sense of the fuel placement chart at each reloading. The main goal of the work performed was to demonstrate the suitability and efficiency of a new, effective, modern approach to solving the problem of fuel loading into a nuclear reactor, which can give the quality of another, higher class.

**Key words:** optimization of fuel loading and reloading, burnup value, genetic algorithm, nuclear reactor.

### REFERENCES

1. Kislicina T.S., Manturov G.N., Nikolaev M.N., Pivovarov V.F., Seregin A.S., Tsiboulya A.M. Certificate of state registration the computer program № 2013618540, TRIGEX. Registration at 11 November 2013.
2. TRIGEX.051. Software attestation passport. Registration № 313 at 9 October 2012. Passport SECNRS.
3. Adeev V.A., Panov I.S., Melenchuk I.S. Opyt formirovaniya toplivnyh zagruzok reaktorov VVER-440 pri rabote na povyshennom urovne moshnosti [The experience of forming fuel



loadings VVER-440 reactors at work within increased power level]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-043.pdf> (accessed 13.12.2015) (in Russian).

4. Samokhin D.S., Slotin V.S. Geneticheskiy algoritm v zadachakh optimizatsii peregruzki yadernogo topliva v RU tipa BN. [Genetic algorithm in nuclear fuel optimization problems for BN reactor.] Abstracts of XIII International conference «Bezopasnost' AES i podgotovka kadrov» [NPP Safety and Personnel Training]. Obninsk 1 – 5 Oct 2013. Obninsk. INPE Publ., 2013, p. 251 (in Russian).

5. Sobolev A.V., Gazetdinov A.S. Optimizatsiya toplivnoy zagruzki yadernogo reaktora s pomosh'yu evolyucionnogo modelirovaniya [Optimization of nuclear reactor fuel loading by evolutionary modeling] Abstracts of IV International Scientific and Technical Conference «Innovate designs and technologies of nuclear power». Moscow. NIKIET Publ., 2016. 122 p. (in Russian).

6. Avdeyev E.F., Leskin S.T., Chusov I.A, Slobodchuk V.I., Shelegov S.A., Kalyakin S.G., Zaryugin D.G. Raschetnoye obosnovaniye konstruksii stenda dlya issledovaniya teplomassoobmena v aktivnoy zone reaktora BN-1200 [Calculated justification stand design to study heat and mass transfer in core of nuclear reactor BN-1200] Proc. All-Russian scientific and practical conference «Teplofizicheskiye osnovy energeticheskikh tekhnologiy» [Thermophysical basis of energy technologies]. 6 – 8 October 2011. Tomsk. TPU Publ., 2011. 152 p. (in Russian).

7. Belov S.B., Kiselov A.V., Marova Ye.V. Rezul'taty verifikatsii programm rascheta neytronno-fizicheskikh kharakteristik aktivnoy zony reaktora tipa BN-1200 [Results of the Verification of the Computer Codes Used for Analysis of the BN-1200 Reactor Core Neutronics]. *VANT. Ser. Fizika yadernykh reaktorov*. 2014, no. 4, p. 66 (in Russian).

8. Shepelev S.F. BN-1200 project. Available at: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/2512d560b136e33f06e679b1e183cfc0.pdf> (accessed 13.12.2015) (in Russian).

9. Burakov M.V. Geneticheskij algoritm: teoriya i praktika (uchebnoye posobiye) [Genetic algorithm: theory and practice (manual)]. Saint Petersburg. GUAP Publ., 2008, 52 p. (in Russian).

10. Toshinsky V.G., Sekimoto H., Toshinsky G.I. A method to improve multiobjective genetic algorithm optimization of a self-fuel-providing LMFBR by niche induction among nondominated solutions. *Annals of Nuclear Energy*, no. 27(5), pp. 397-410, 2000.

11. Bat' G.A., Bartolomey G.G., Baybakov V.D., Alkhutov M.S. Osnovy teorii i metody raschyota yadernykh energeticheskikh reaktorov [Base of theory and methods to nuclear power reactors calculation]. Manual for university. Edited by G. A. Bat'. Moscow. Energoizdat Publ., 1982. 511 p. (in Russian).

12. SSCRF-IPPE. Calculational codes and systems. Available at: <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/comp/4-1-1.php> (accessed 13.12.2015) (in Russian).

13. Volkov Yu.V., Samokhin D.S., Sobolev A.V., Shkarovskiy A.N. Razrabotka metodov i otsenka pokazateley nadezhnosti personala po statistike intsidentov na AES RF [Development of methods and staff reliability estimation based on statistics of incidents at Russian nuclear power plants]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2008, no. 4, pp. 15-24 (in Russian).

14. Davidyuk N.V., Belov S.V. The formation of initial population in genetic algorithm of effective disposition of detectivity sensors on the maintenance object. *Vestnik Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2010, no 1, pp. 114-118 (in Russian).

15. Panchenko T.V. Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie [Genetic algorithms]. Astrakhan. Astakhanskij Universitet Publ., 2007. 87 p. (in Russian).

16. Rutkovskaya D., Pilin'sky M., Rutkovsky L. Neural nets, genetic algorithm and fuzzy systems: 2-nd ed. Moscow. Goryachaya liniya - Telekom Publ., 2008. 452 p. (in Russian).

17. Skobcov Yu.A. Osnovy evolucionnyh vychislenij [Base evolutionary computation]. Donetsk. DonNTU Publ., 2008. 326 p. (in Russian).
18. Poli R., Langdon W.B., McPhee N.F. A Field Guide to Genetic Programming. Available at: <http://www.Lulu.com> (accessed 10.09.2015)
19. Koshev A.N. Salmin V.V., Generalova A.A., Bychkov D.S. The development of genetic algorithm with adaptive mutations to determine the global extremum function of n-variables. *Scientific open access journal «Naukovedenie»*. 2016, v. 8, no. 6. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN616.pdf> (accessed 16.11.2016) (in Russian).
20. Generalov K.A. Matematicheskoe obespechenie i programmnye sredstva realizacii geneticheskikh algoritmov na osnove teorii numeracii. Diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical and program tools for implementing genetic algorithms based on number theory. Cand. Sci. (Engineering) Diss.]. Penza, 2009. 178 p. (in Russian).
21. D'yachkov Yu.A. Semenov A.A., Generalova A.A. Prikladnaya optimizaciya v proektirovanii kolyosnyh mashin [Applied optimization in the design of wheeled vehicles]. Moscow. Mir Nauki Publ., 2016. 210 p. (in Russian).
22. Gladkov L.A., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow. FizMatLit Publ., 2006. 320 p. (in Russian).

#### **Authors**

Sobolev Artyom Vladimirovich, Senior Lecturer

E-mail: [SobolevArtem82@gmail.com](mailto:SobolevArtem82@gmail.com)

Gazetdinov Azamat Salavatovich, Engineer

E-mail: [azmt2008@gmail.com](mailto:azmt2008@gmail.com)

Samokhin Dmitry Sergeevich, Head of Department

E-mail: [dssamokhin@mephi.ru](mailto:dssamokhin@mephi.ru)