УДК 681.5

С.Л. Морева, О.И. Золотов, А.Л. Ляшенко

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА РБМК-1000

Высокий уровень надежности современных атомных станций – доказанный наукой и временем факт. Тем не менее, обеспечение безопасности является приоритетом ядерной промышленности, а ее совершенствованию уделяется самое пристальное внимание. Работа с высокими технологиями и огромная ответственность персонала атомных станций (в первую очередь перед населением) требуют, чтобы учитывались даже маловероятные риски возникновения аварии. Для этого проводится постоянный мониторинг состояния реакторной установки. Диагностирование физического состояния энергоблока позволяет выявить возможные нарушения функций безопасности, вызванные отказами оборудования и систем, оценить приоритетность восстановления этих функций и определить оптимальную последовательность действий оператора, направленных на обеспечение безопасности и перевод энергоблока в нормальный режим работы.

Описание объекта и постановка задачи

В качестве примера рассмотрим реактор АЭС РБМК-1000. Данный реактор является канальным реактором с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. В качестве топлива используется диоксид урана UO2 с добавкой оксида эрбия Er2O3. Активная зона представляет собой цилиндрическую кладку диаметром 11,8 и высотой 7 м, состоящую из вертикальных графитовых колонн [1].

Графитовая кладка цилиндрической формы состоит из вертикальных графитовых блоков сечением 250*250 мм. Блоки по вертикальной оси имеют сквозные отверстия диаметром 114 мм, предназначенные для размещения технологических каналов и каналов для контроля и управления. Часть технологического канала, размещенная в активной зоне, представляет собой циркониевую трубу диаметром 88 мм с толщиной стенки 4 мм. Для обеспечения теплового контакта с блоками кладки на трубу надеты графитовые кольца. Каждое чередующееся кольцо имеет непосредственный контакт по боковой поверхности либо с трубой, либо с внутренней поверхностью графитового блока, а также одно с другим по торцам. Это расположение определено из условия недопустимости заклинивания канала в кладке вследствие ее радиационно-термической усадки, а также термической и радиационной ползучести циркониевой трубы канала. В технологические каналы устанавливаются тепловыделяющие сборки (ТВС). Каждая ТВС содержит 18 твэлов (топливных стержней), дистанционированных специальными стальными решетками, и опирается на стальную концевую решетку. Твэлы диаметром 13,6 мм расположены по двум окружностям. На первом радиусе расположено 6 твэлов, на втором – 12.

Геометрическое расположение графитовой кладки, образующей вместе с топливными каналами активную зону, представлено на рис. 1.

Технологические каналы предназначены для размещения ТВС, дополнительных поглотителей и организации потока теплоносителя. Теплоноситель (вода) поступает в топливные каналы снизу, при температуре 270° С. Участок канала, на котором вода нагревается до температуры насыщения, имеет высоту около 2,5 м от низа активной зоны. На остальной ее части имеет место процесс развитого кипения. Расход теплоносителя по каждому топливному каналу может регулироваться независимо индивидуальным запорно-регулирующим клапаном.

Приблизительно 95 % энергии, выделяющейся в результате реакции деления ядер урана, передается теплоносителю, омывающему ТВС. Около 5 % мощности реактора выделяется в графите за счет замедления нейтронов и поглощения гамма-излучения. Эта доля тепла также передается теплоносителю через стенку технологического канала. Для снижения термического сопротивления, предотвращения окисления графита и улучшения теплопередачи от графита к технологическим и специальным каналам полость кладки заполнена циркулирующей газовой смесью гелия и азота, ко-

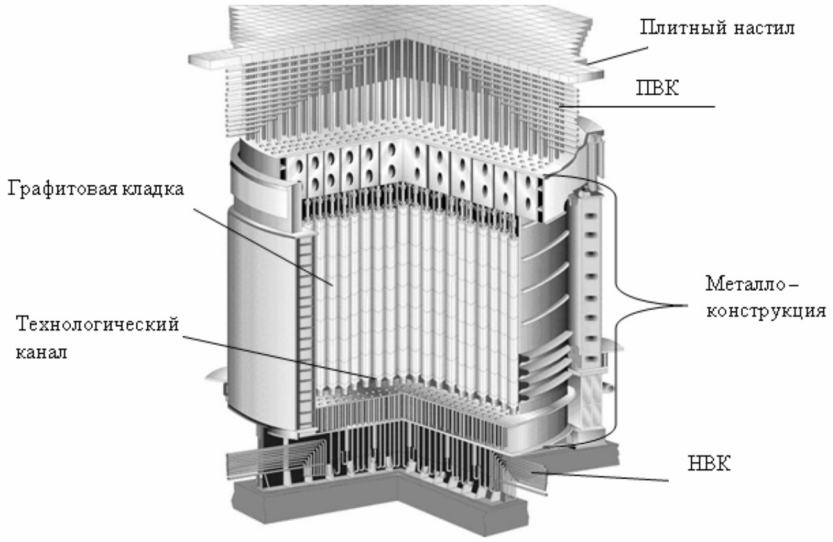


Рис. 1. Активная зона реактора

торая используется одновременно и для контроля целостности каналов путем измерения влажности и температуры газа [1].

Мониторинг параметров реакторной установки связан с необходимостью анализа непрерывных физических процессов, протекающих в активной зоне. С этой целью разработан ряд программных продуктов, рассмотренных в [2, 7]. Важная роль при исследовании ядерных установок отводится расчету тепловыделяющей системы, математической моделью которой является уравнение теплопроводности, выведенное на основе первого закона термодинамики [3].

Составим математическую модель температурных полей для графитовой кладки.

Разработка математической модели

При моделировании рассматривались тепловые процессы, протекающие в графитовых кладках, набранных из графитовых блоков. На рис. 2 показан фрагмент кладки в количестве девяти блоков. В технологическом канале располагается тепловыделяющая сборка, омываемая теплоносителем. Высота графитовой кладки 8330 мм. Поверхности ТВС будем рассматривать как функции входа, а контрольные точки во внутренних углах графитовых кладок – как функции выхода. На рисунке представлены рассматриваемые ячейки, ориентированные в горизонтальной плоскости осей пространственных координат *X*-*Z*, ось *Y* в данном случае является осью ординат.

Ниже представлен фрагмент математической модели, составленный для ячейки 5 (см. рис. 2).

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к графитовой кладке:

$$\frac{\partial T_{51}(x,y,z,t)}{\partial t} = a_{\Г}\left[\frac{\partial^2 T_{51}(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{51}(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{51}(x,y,z,t)}{\partial z^2}\right] + \frac{a_{\Г} W_{\Г}}{\lambda_{\Г} V_{\Г}}, \quad (1)$$

где $a_{\Г}$ – коэффициент температуропроводности графита; x, y, z – пространственные координаты; $W_{\Г}$ – мощность, выделяемая при торможении нейтронов; $\lambda_{\Г}$ – коэффициент теплопроводности графита; $V_{\Г}$ – объем графитовой кладки; $X2 < x < X3,\ Y1 < y < Y2,\ Z2 < z < Z3$.

При анализе тепловых процессов в технологических каналах, уравнение теплопроводности удобнее записывать в сферических координатах.

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к циркониевой трубе:

$$\frac{\partial T_{52}(y,\varphi,R,t)}{\partial t} = a_{\Ц}\left[\frac{\partial^2 T_{52}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R}\frac{\partial T_{52}(y,\varphi,R,t)}{\partial R} + \frac{\partial^2 T_{52}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2}\right], \quad (2)$$

где $a_{\Ц}$ – коэффициент температуропроводности циркония; $Y1 < y < Y2,\ R2 < R < R3$.

Запишем дифференциальное уравнение те-

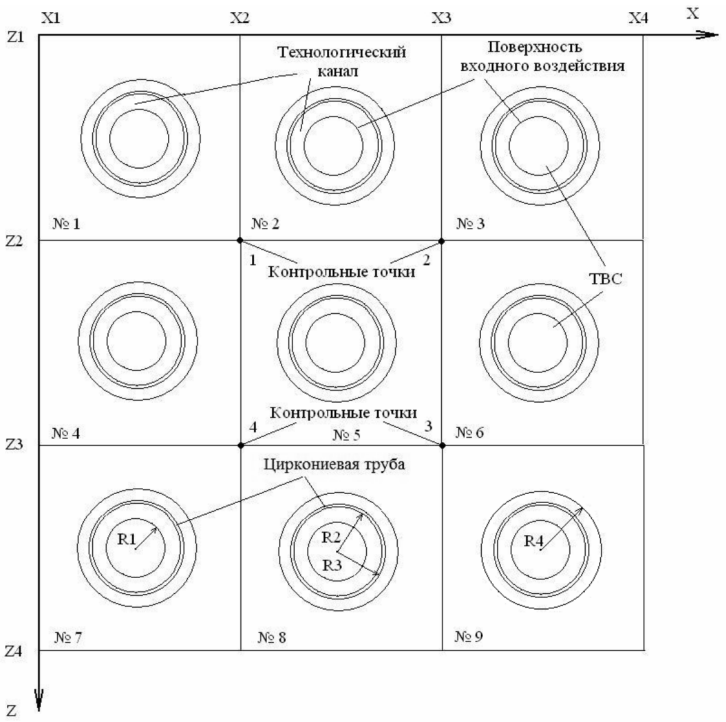


Рис. 2. Схема расположения рассматриваемых ячеек технологических каналов

плопроводности применительно к теплоносителю в канале [5]:

$$\frac{\partial T_{53}(y,\varphi,R,t)}{\partial t} = a_{\text{Т}}\left[\frac{\partial^2 T_{53}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{R}\frac{\partial T_{53}(y,\varphi,R,t)}{\partial R} + \frac{\partial^2 T_{53}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2}\right] - \quad (3)$$

$$- \vartheta(R,t)\cdot\frac{\partial T_{53}(y,\varphi,R,t)}{\partial \varphi},$$

где ϑ – скорость движения теплоносителя в канале; $a_{\text{Т}}$ – коэффициент температуропроводности теплоносителя; $Y1 < y < Y2,\ R1 < R < R2$.

Функции входа U заданы в виде выражения:

$$U = T_{\text{ТВС}}(y,\varphi,R,t), \quad (4)$$

где $T_{\text{ТВС}}$ – температура на поверхности ТВС; $Y1 < y < Y2,\ \Phi1 < \varphi < \Phi2,\ R = R1$.

Численные значения температуры на поверхности ТВС будем искать из значений энергораспределения, полученных с помощью информационно-вычислительной системы (ИВС) «Скала-микро».

Аналогично составлены дифференциальные уравнения теплопроводности для остальных ячеек.

В разработанной математической модели присутствуют уравнения, записанные в прямоугольной и цилиндрической системе координат. Подробно вопрос стыковки данных уравнений рассмотрен в [4]. Для их стыковки выделены зоны цилиндрической формы с радиусом R4 в графитовых блоках, они совпадают с границами сквозных отверстий в графитовых блоках (см. рис. 2). Для этих зон составлено дополнительно дифференциальное уравнение теплопроводности.

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к выбранной ячейке графитовой кладки:

$$\frac{\partial T_{11}(y,\varphi,R,t)}{\partial t} = a_{\Gamma}\left[\frac{\partial^2 T_{11}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2} + \right.$$

$$+ \frac{1}{R}\frac{\partial T_{11}(y,\varphi,R,t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2}\frac{\partial^2 T_{11}(y,\varphi,R,t)}{\partial \phi^2} + \quad (5)$$

$$\left. + \frac{\partial^2 T_{11}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2}\right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}};$$

$$Y1 < y < Y2,\ \Phi1 < \varphi < \Phi2,\ R3 < R < R4.$$

Данное дифференциальное уравнение отражает общий характер процесса. Для получения полной математической модели объекта, соответствующей конкретной задаче, необходимо за-

дание условий однозначности.

Граничные условия для графитовой кладки зададим соотношениями:

$$T_{11}(y,\varphi,R3,t) = T_{52}(y,\varphi,R3,t); \quad (6)$$

$$\lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{11}(y,\varphi,R3,t)}{\partial R} = \lambda_{\text{Ц}}\frac{\partial T_{52}(y,\varphi,R3,t)}{\partial R}; \quad (7)$$

$$T_{51}(x,y,Z2,t) = T_{21}(x,y,Z2,t); \quad (8)$$

$$\lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{51}(x,y,Z2,t)}{\partial Z} = \lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{21}(x,y,Z2,t)}{\partial Z}; \quad (9)$$

$$T_{51}(X3,y,z,t) = T_{61}(X3,y,z,t); \quad (10)$$

$$\lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{51}(X3,y,z,t)}{\partial X} = \lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{61}(X3,y,z,t)}{\partial X}; \quad (11)$$

$$T_{51}(x,y,Z3,t) = T_{81}(x,y,Z3,t); \quad (12)$$

$$\lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{51}(x,y,Z3,t)}{\partial Z} = \lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{81}(x,y,Z3,t)}{\partial Z}; \quad (13)$$

$$T_{51}(X2,y,z,t) = T_{41}(X2,y,z,t); \quad (14)$$

$$\lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{51}(X2,y,z,t)}{\partial X} = \lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{41}(X2,y,z,t)}{\partial X}, \quad (15)$$

где $T_{21}, T_{61}, T_{81}, T_{41}$ – температура в графите ячеек 2, 6, 8 и 4 соответственно; λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности графита; $\lambda_{\text{Ц}}$ – коэффициент теплопроводности циркония.

Граничные условия для циркониевой трубы зададим соотношениями:

$$T_{52}(y,\varphi,R3,t) = T_{51}(y,\varphi,R3,t); \quad (16)$$

$$\lambda_{\text{Ц}}\frac{\partial T_{52}(y,\varphi,R3,t)}{\partial R} = \lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{51}(y,\varphi,R3,t)}{\partial R}. \quad (17)$$

$$T_{52}(y,\varphi,R2,t) = T_{53}(y,\varphi,R2,t); \quad (18)$$

$$\lambda_{\text{Ц}}\frac{\partial T_{52}(y,\varphi,R2,t)}{\partial R} = \lambda_{\text{Т}}\frac{\partial T_{53}(y,\varphi,R2,t)}{\partial R}. \quad (19)$$

Граничные условия для теплоносителя зададим соотношениями:

$$T_{53}(y,\varphi,R2,t) = T_{52}(y,\varphi,R2,t); \quad (20)$$

$$\lambda_{\Gamma}\frac{\partial T_{53}(y,\varphi,R2,t)}{\partial R} = \lambda_{\text{Ц}}\frac{\partial T_{52}(y,\varphi,R2,t)}{\partial R}. \quad (21)$$

Данная математическая модель получилась сложной. Решить полученную систему дифференциальных уравнений в частных производных аналитически (выделить передаточную функцию) не представляется возможным. Данные дифференциальные уравнения решались методом «сеток» [6].

Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. Упрощенная блок-схема вычислительного алгоритма решения дифференциальных уравнений представлена на рис. 3.

В процессе составления дискретных моделей были решены задачи «стыковки» граничных условий, обеспечения устойчивости вычислительной схемы и выбраны шаги дискретизации по пространственным переменным.

Для проверки адекватности математической

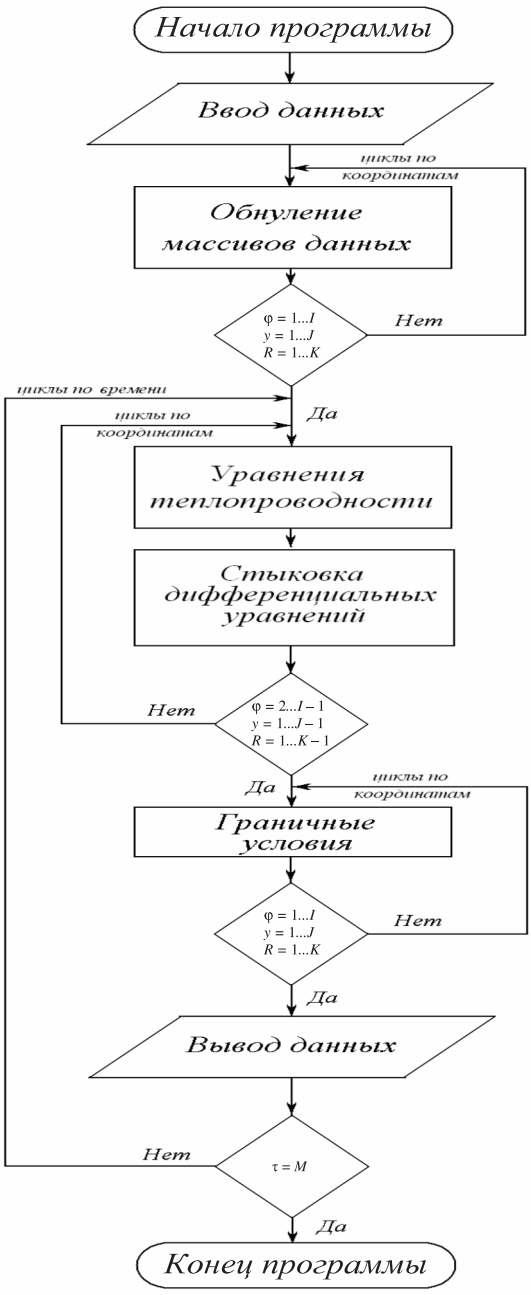


Рис. 3. Блок-схема вычислительного алгоритма

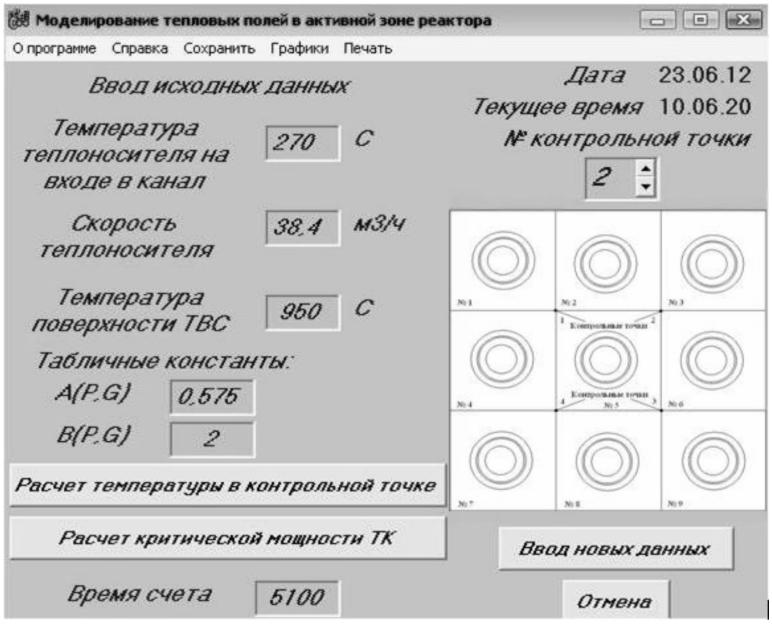


Рис. 4. Окно ввода данных

модели и компьютерного моделирования специально разработано программное обеспечение. В качестве системы программирования выбран язык C++ и среда для разработки Borland C++ Builder. Выбор языка программирования C++ обусловлен тем, что он применяется на практике во многих отраслях промышленности, в т. ч. и на АЭС.

На рис. 4 представлен общий интерфейс программы.

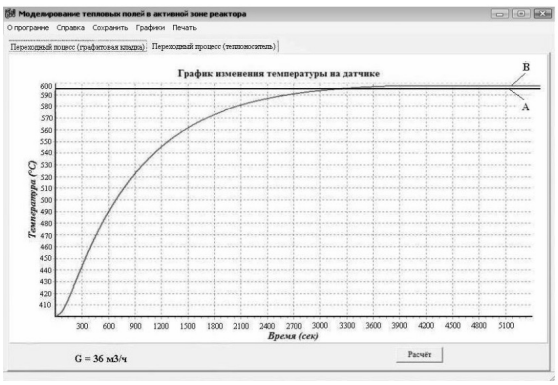
С помощью разработанного ПО рассчитаны значения температур в контрольных точках (рис. 5), соответствующих местам расположения термопар, установленных в графитовой кладке на реакторе.

На рис. 5 графики *A* соответствуют данным, полученным с ИВС «Скала-микро», графики *B* соответствуют данным, полученным расчетным путем.

Результаты моделирования проверены с помощью информационно-вычислительной системы «Скала-микро», обеспечивающей контроль над работой реактора.

Значения, полученные путем моделирования, совпали с показаниями датчиков, установленных в графитовой кладке на реакторе. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели.

а)



б)

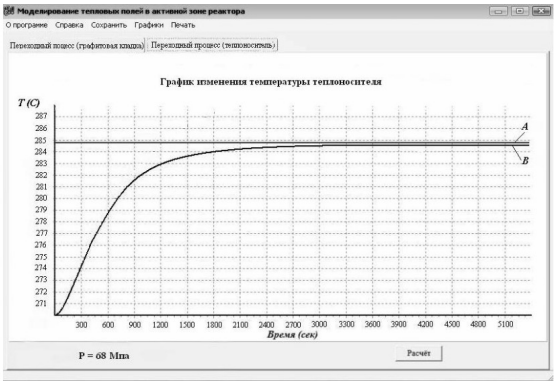


Рис. 5. Графики переходных процессов:
а – график переходного процесса в контрольной точке 2;
б – график переходного процесса в теплоносителе на выходе из канала

Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что предложенное ПО точно моделирует тепловые процессы, протекающие в выделенном участке реактора, и может быть расширено с целью моделирования и мониторинга тепловых процессов во всем реакторе.

Разработанная методика моделирования позволит проводить диагностирование физического состояния энергоблока, выявлять возможные нарушения в его функционировании и прогнозировать возможные варианты работы при различных, в т. ч. и нештатных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов, М.А.** Канальный ядерный энергетический реактор РБМК [Текст] / М.А. Абрамов, В.И. Авдеев, Е.О. Адамов; Под общ. ред. Ю.М. Черкашова. –М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. –632с.

2. **Киселев, А.Е.** Моделирование аварий со снижением подачи теплоносителя для канала реактора РБМК-1000 [Текст] / А.Е. Киселев, А.В. Лемеха, В.Ф. Стрижов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. –1998. –Вып. 1. –С. 48–65. –М.: Российский научный центр «Курчатовский институт».

3. **Лыков, А.В.** Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. –М.: Высш. школа, 1967. –599 с.

4. **Морева, С.Л.** Математическое моделирование системы с распределенными параметрами на примере активной зоны реактора РМБК-1000 [Текст] / С.Л. Морева, А.Л. Ляшенко // Матер. IV Междунар. науч. конф. Системный синтез и прикладная синергетика. –Таганрог.: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. –С. 218–225.

5. **Морева, С.Л.** Разработка программного комплекса для моделирования тепловых процессов в активной зоне реакторных установок [Текст] / С.Л. Морева, А.Л. Ляшенко // Народное хозяйство. Вопросы инновационного развития. –М.: МИИ Наука, 2012. –С. 243–247.

6. **Самарский, А.А.** Численные методы математической физики [Текст] / А.А. Самарский, А.В. Гулин. –М.: Научный мир , 2000. –316 с.

7. **Allison, C.M.** SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual [Text] / C.M. Allison, E.C. Johnson [et al.] // EG&G Idaho, INC. Sept. 1989.

УДК 004.8

В.В. Дармахеев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЯДА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАТОРОВ СЕЛЕКЦИИ

Эволюционные вычисления для генерации моделей автоматов и преобразователей используются давно и успешно [6]. Однако при разработке генетических алгоритмов возникают проблемы. К одной из них относится трудность достижения сходимости алгоритма. Эта проблема тесно связана с выбором генетических операторов, включая операторы селекции. Настоящая статья посвящена вопросу выбора операторов селекции.

Генетический алгоритм разработан для решения прикладной задачи, заключающейся в генерации моделей преобразователей продукционных правил, представленных на естественном языке, в формулы логики предикатов первого порядка.

Данный генетический алгоритм (генератор) основан на следующих положениях [5]:

- автомат (особь) представляется в виде хромосомы;
- хромосома состоит из динамического набора молекул ДНК и имеет графовое представление, при этом одна молекула ДНК представляет собой описание одного состояния автомата;
- молекула ДНК состоит из фиксированного количества генов (минимальная неделимая составная часть молекулы ДНК);
- первая популяция $P(0)$ генерируется случайным образом, при этом значение каждого гена выбирается из соответствующей области допустимых значений.

Во время проведения вычислительных экспериментов была обнаружена проблема выбора особей, к которым впоследствии будут при-