

УДК 621.039.5:004.942

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА

И.В. Шаманин, П.М. Гаврилов*, С.В. Беденко, В.В. Мартынов*

Томский политехнический университет

*ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск

E-mail: bedenko@tpu.ru

Проведены расчетные исследования нейтронно-физических характеристик систем «сухого» хранения отработанного ядерного топлива реактора РБМК-1000. Оптимизированы параметры систем и схем обращения в процессе «сухого» хранения отработанного топлива за счет чередующегося размещения его слоев с различной глубиной выгорания и обогащения.

Ключевые слова:

«Сухое» хранение, отработанное ядерное топливо, нейтронно-физические характеристики, эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Key words:

Dry storage system, spent nuclear fuel, neutron-physical parameters, effective neutron multiplication factor.

Состояние исследований

Темпы развития ядерной энергетики в значительной степени определяются внешними составляющими ядерного топливного цикла, в частности, долговременным хранением отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и его переработкой.

Хранилища ОЯТ РБМК-1000, ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, ЭГП-6 были спроектированы в 60–70 гг. прошлого века. В последние годы, когда одновременно с фактическим изменением концепции замкнутого топливного цикла изменились требования безопасности, возникла необходимость уплотнения хранения топлива и увеличения вместимости существующих хранилищ. В первую очередь это связано с увеличением количества ОЯТ реакторов РБМК и ВВЭР, так как топливо РБМК-1000, ВВЭР-1000, ЭГП-6 пока не перерабатывается и находится на хранении «мокрым» способом на АЭС в бассейнах промежуточной выдержки, которые близки к заполнению. Для снятия этой проблемы существует необходимость ввода в эксплуатацию дополнительной мощности по долговременному хранению (50 и более лет) ОЯТ [1, 2].

После заметного распада короткоживущих радионуклидов и предварительной выдержки ОЯТ в воде с целью снижения тепловыделения и радиоактивности, становится целесообразным переход на «сухой» метод хранения ОЯТ. Поэтому разноплановые исследования и научно-технические разработки для создания условий долговременного «сухого» хранения ОЯТ представляют большой практический интерес.

Целью работы является оптимизация нейтронно-физических параметров систем и схем размещения ОЯТ в процессе «сухого» хранения. Достижение указанной цели создает возможности для повышения эффективности и безопасности «сухого» хранилища отработанного ядерного топлива (СХОЯТ).

В настоящее время топливо реакторов РБМК-1000 вначале хранится под водой в приреакторных бассейнах выдержки, затем в долговременных хранилищах. С учетом состояния оболочек, которые определяют срок хранения отработанных ТВС (ОТВС) в воде не более 30 лет, возникает необходимость переходить на «сухое» хранение. Мировой опыт проектирования «сухих» хранилищ позволяет прогнозировать значительно более высокий, чем в бассейнах с водой, уровень ядерной безопасности, что достигается конструкцией прочных и герметичных гнезд хранения и пеналов, способных выдержать различные проектные и запроектные аварии, и отсутствием замедлителей нейтронов в камерах и пеналах.

На сегодняшний день общей задачей для всех хранилищ является жесткое обоснование ядерной безопасности при переходе на уран-эрбиевое топливо обогащением до 3 % по ^{235}U [2, 3]. Для обоснования ядерной безопасности систем хранения ОЯТ широко используют пакеты программ, реализующих метод Монте–Карло: MCU-RFFI, MCNP, SCALE, MMKFK-2, которые позволяют рассчитывать эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{\text{эфф}}$ в хранилище с точностью $\sim 10^{-4} \dots 10^{-6}$.

С появлением нового вида топлива – уран-эрбиевого для РБМК, уран-гадолиниевого для ВВЭР, смешанного оксидного $(\text{U,Pu})\text{O}_2$, нитридного $(\text{U,Pu})\text{N}$, карбидного $(\text{U,Pu})\text{C}$ для БН-600 и в перспективе для ВВЭР-1000, возникает необходимость обоснования безопасности имеющихся систем хранения.

Алгоритм расчета

Расчет проводился с использованием программного комплекса SCALE 5.0, позволяющего проводить расчёты нейтронно-физических параметров систем хранения и транспортных контейнеров с отработанным и свежим ядерным топливом, а также расчёты изотопного состава ОЯТ.

Для расчетных исследований использована аналитическая последовательность CSAS25, которая автоматически обрабатывает сечения, а затем в зависимости от начальных и граничных условий рассчитывает физический вес моделируемой размножающей системы.

Данная аналитическая последовательность позволяет проводить расчеты $k_{эфф}$ в 3D-геометрии. Для этого в программном комплексе SCALE 5.0 задается изотопный состав топлива или нескольких типов топлив, а также составы других материалов, которые затем используются при построении модели. В зависимости от поставленной задачи выбираются аналитическая последовательность и библиотека сечений. В расчетах использовалась 27-групповая библиотека сечений, полученная при свертке 218-групповой библиотеки констант на основании данных библиотеки ENDF/B-IV. Такой выбор оптимален при проведении расчетов на критичность.

В программном комплексе SCALE 5.0 используется ячейечный метод моделирования, что существенно упрощает расчёт нейтронно-физических параметров данной системы. При этом достаточно детально описывается геометрии одной ячейки, затем задается поле – массив размером 22×11 ячеек. Более подробно расчётная модель описана в следующем разделе.

Модуль CSAS25 последовательно запускает функциональные модули BONAMI, NITAWL-II и KENO V.a. для обработки требуемых сечений и расчета $k_{эфф}$ в СХОЯТ.

Расчетная модель камеры хранения ОЯТ

ОЯТ при хранении размещается в специальных гнездах, внутри которых, в свою очередь, размещаются герметичные пеналы с ОТВС. Каждая камера хранения имеет 242 гнезда для герметичных пеналов с ОТВС РБМК-1000, расположенных в гнезде в два яруса. В каждом гнезде размещается 3,503 т

(по урану) ОЯТ реактора РБМК-1000 (или 2,4 т ОЯТ реактора ВВЭР-1000).

Гнезда размещаются в квадратной решетке с шагом 1000 мм (диаметр гнезда 720 мм, толщина стенки 7 мм). Пенал представляет собой стальную трубу размером (диаметр и толщина стенки) 630×7 мм, длина пенала 4,1 м, изготовлен из стали марки 10ХСНД. В каждом пенале размещены по 31 ампулы с ОТВС РБМК-1000, рис. 1. Размер ампул (диаметр и толщина стенки) 92×2 мм, ампулы расположены в треугольной решетке с шагом 96 мм. Пеналы в гнезде размещаются в два яруса друг над другом.

Для расчета значений $k_{эфф}$ расчетная модель в максимальной степени приближена к реальному хранилищу по геометрии. Каждое гнездо расчетной модели с размещенным в нем пеналом представляет собой ячейку.

Для описания одной ячейки СХОЯТ в программном комплексе SCALE 5.0 создается эквивалентная ячейка, называемая «UNIT». Из таких ячеек сформирован массив размером 22×11 . Пример заполнения массива ячейками приведен на рис. 2.

Дополнительно были сделаны следующие допущения, усиливающие консервативность оценок ядерной безопасности [1, 2]:

- Топливо в пеналах «свежее» (проектная авария).
- Анализ ядерной безопасности для запроектных аварий произведен с учётом глубины выгорания.
- Из основных продуктов деления рассматривается только ^{149}Sm .
- Основными источниками спонтанных нейтронов являются изотопы Pu, Am и Cm.
- Основными источниками (α, n) -нейтронов являются диоксиды: ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm и ^{244}Cm .
- Система является ядерно-безопасной только в том случае, если $k_{эфф} \leq 0,85$.

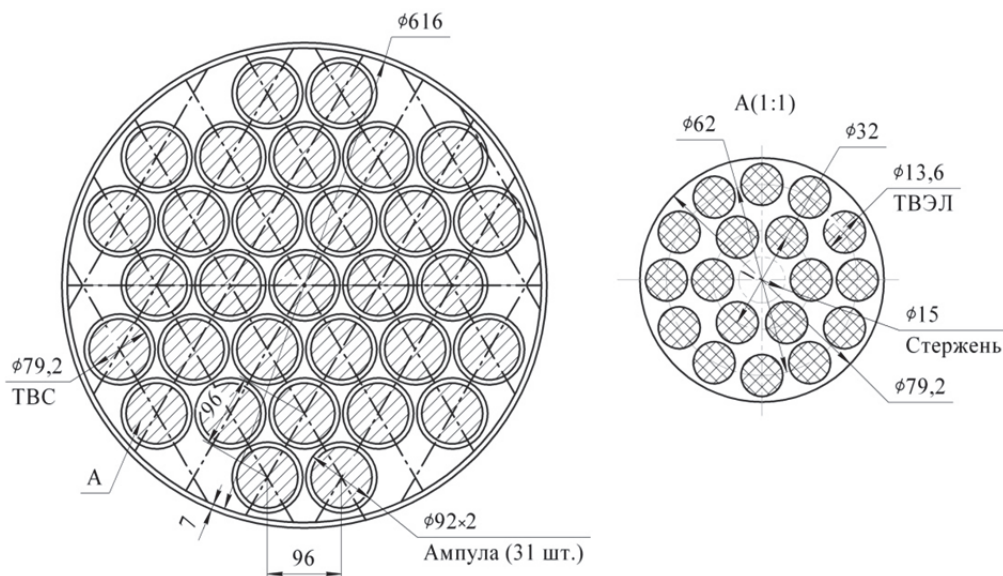


Рис. 1. Схема расположения ампул с ОТВС РБМК-1000 в пенале: А – схема расположения твэл в ТВС

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 2. Массив размером 22x11, состоящий из ячеек одного типа

Результаты расчетов $k_{эфф}$ в одиночной камере СХОЯТ РБМК-1000

«Свежее» топливо. Рассмотрены варианты проектных (заполнение хранилища водой при отсутствии воды в самом гнезде с пеналом) и запроектных аварий (заполнение водой всего хранилища и всех ампул, находящихся в герметичных пеналах в гнезде хранилища).

При расчете $k_{эфф}$ СХОЯТ рассматривалось урановое топливо с обогащением 1,6; 2,0; 2,4; 2,6 и 2,8 %. Результаты расчета $k_{эфф}$ топлива с начальным обогащением 1,6 % для пяти вариантов загрузок:

1. В хранилище находится одно гнездо с пеналом, размещенное в центре, $k_{эфф}=0,1252\pm0,0004$.
2. Полная загрузка хранилища топливом, $k_{эфф}=0,2829\pm0,0008$.
3. В хранилище находится одно гнездо с пеналом, размещенное в центре. Все остальное пространство полностью заполнено водой, вода везде, кроме самого гнезда с пеналом, $k_{эфф}=0,3572\pm0,0010$.
4. Полная загрузка хранилища топливом. Все остальное пространство полностью заполнено водой, вода везде, кроме гнезд с пеналом, $k_{эфф}=0,3867\pm0,0009$.
5. Полная загрузка топливом. Рассмотрена внештатная (запроектная) авария, при которой происходит заполнение всего хранилища водой и всех ампул, находящихся в герметичных пеналах в гнезде хранилища, $k_{эфф}=0,8146\pm0,0014$.

Результаты расчета $k_{эфф}$ для топлива других вариантов обогащения сведены в таблицу.

Таким образом, возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления возможно

только в случае запроектной аварии, например, когда происходит заполнение водой всего хранилища и отдельных его зон, и только для свежего топлива с обогащением свыше 2,6 %. Однако, данное событие имеет пренебрежимо малую вероятность. Кроме того, ядерная безопасность при запроектной аварии заведомо гарантирована при учёте факта выгорания топлива [2], так как в СХОЯТ хранится выгоревшее топливо.

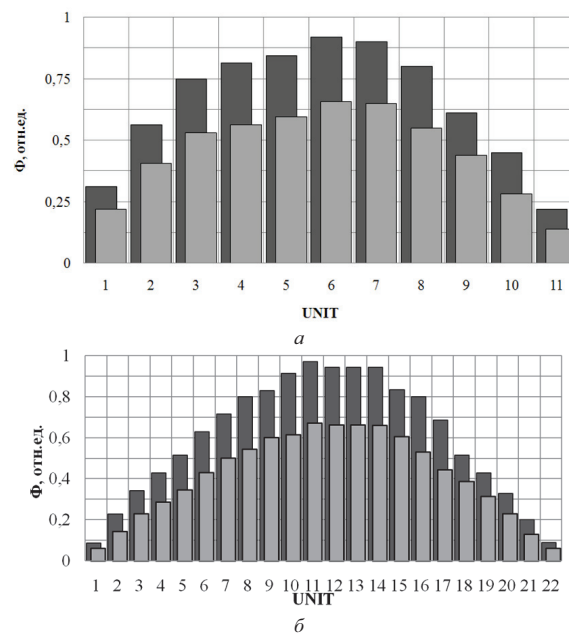


Рис. 3. Значения потоков быстрых нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве; ■, ■ – выдержка ОЯТ РБМК-1000 0,5 и 10 лет соответственно

Таблица. Расчетные значения $k_{эфф}$ СХОЯТ для топлива различного обогащения

Обогащение топлива, %	Варианты загрузок				
	1	2	3	4	5
1,6	0,1252±0,0004	0,2829±0,0008	0,3572±0,0010	0,3867±0,0009	0,8146±0,0014
2,0	0,1299±0,0004	0,3034±0,0006	0,3779±0,0010	0,4108±0,0011	0,8942±0,0014
2,4	0,1338±0,0004	0,3277±0,0007	0,4003±0,0011	0,4319±0,0013	0,9502±0,0015
2,6	0,1355±0,0004	0,3399±0,0008	0,4058±0,0012	0,4422±0,0012	0,9756±0,0017
2,8	0,1362±0,0004	0,3499±0,0008	0,4115±0,0012	0,4492±0,0011	0,9967±0,0014

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10	39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
9	40	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	5
8	41	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	5
7	42	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	5
6	43	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	5
5	44	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	5
4	45	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	5
3	46	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
2	47	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
1	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	

Рис. 4. Массив размером 22x11. UNIT 1, 2, 3 – гнезда с пенами, выгорание 20, 25, 30ГВт-сут/т соответственно; 5, 39–69 – пустые гнезда

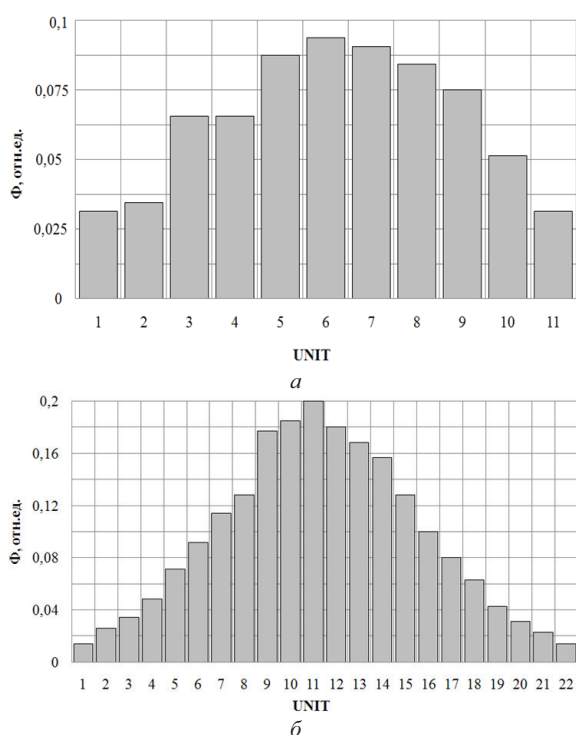


Рис. 5. Значения потоков быстрых нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве, выдержка ОЯТ 10 лет

«Выгоревшее» топливо. СХОЯТ полностью загружено ОЯТ РБМК-1000 (обогащение – 2 %, выгорание – 20 ГВт-сут/т, выдержка – 180 сут. и 10 лет). Параметры источника нейтронов (нейтр./с·т) рассчитаны по данным работ [1, 3, 4], методика расчета изложена в работе [5].

Эффективный коэффициент размножения в СХОЯТ, загруженном ОЯТ РБМК-1000, составляет $k_{эфф}=0,2229\pm 0,0005$. Значения потоков нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве приведены на рис. 3.

Расчетные исследования показали, что учёт глубины выгорания приводит к уменьшению значения $k_{эфф}$ на 32 %, и с точки зрения ядерной безопасности одиночная камера пролетом СХОЯТ является глубоко подкритической системой даже для за-

проектных аварий (с учётом глубины выгорания ОЯТ).

Уровни плотности потоков быстрых нейтронов превышают предельно допустимые значения при выгорании, начиная от 20 ГВт-сут/т.

На рис. 4 приведена одна из схем загрузки СХОЯТ, позволяющая снизить уровни нейтронного излучения в критических точках хранилища до предельно допустимых значений. Эффективный коэффициент размножения моделируемой системы равен $k_{эфф}=0,2148\pm 0,0003$.

Значения потоков в зависимости от расположения UNIT в массиве приведены на рис. 5.

Анализ возможных нейтронно-физических состояний технических систем «сухого» хранения отработанного топлива с различной глубиной выгорания показал, что необходима оптимизация схем размещения ОТВС в СХОЯТ с различной глубиной выгорания с целью уменьшения дозовой нагрузки на персонал.

Выводы

1. Установлено, что учёт глубины выгорания отработанного ядерного топлива реактора РБМК-1000 в технических системах сухого хранения приводит к снижению эффективного коэффициента размножения на 32 %, при этом система остается глубоко подкритической даже для запроектных аварий. Уровни нейтронного излучения при выгорании начиная с 20 ГВт-сут/т превышают предельно допустимые значения.
2. Оптимизация схем размещения отработанных сборок с различной глубиной выгорания в «сухом» хранилище позволяет уменьшить дозовую нагрузку на персонал, а также увеличить подкритичность.
3. Предложен вариант загрузки хранилища с чередованием слоев отработанного топлива с различной глубиной выгорания, что позволяет снизить уровни излучения в его критических точках до предельно допустимых значений.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Мероприятие 1.2.1. Номер контракта П777 от 20 мая 2010 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беденко С.В., Шаманин И.В. Нейтронная активность отработанного керамического ядерного топлива // Известия вузов. Сер. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/2. – С. 51–56.
2. Внуков В.С. Глубина выгорания как параметр ядерной безопасности хранилищ и транспортных упаковочных комплектов с отработавшим ядерным топливом // Атомная техника за рубежом. – 1990. – № 12. – С. 9–11.
3. Шаманин И.В., Буланенко В.И., Беденко С.В. Поле нейтронного излучения облученного керамического ядерного топлива различных типов // Известия вузов. Сер. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 97–103.
4. Беденко С.В., Гнетков Ф.В., Кадочников С.Д. Дозовые характеристики полей нейтронов облученного керамического ядерного топлива различных типов // Известия вузов. Сер. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 6–12.
5. Шаманин И.В., Беденко С.В., Павлюк А.О., Лызко В.А. Использование программы ORIGEN-ARP при расчете изотопного состава отработанного топлива реактора ВВЭР-1000 // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 25–28.

Поступила 16.01.2012 г.

УДК 541.64:547.759.32

ПРИБЛИЖЕННОЕ ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ ТЕЛА ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ ФУРЬЕ ($Fo < 0,01$)

В.С. Логинов, О.С. Симонова

Томский политехнический университет
E-mail: loginovs@tpu.ru

Получены простые аналитические решения при граничных условиях I и III родов, пригодные для расчета начальных стадий тепловых процессов в телах классической формы (пластина, цилиндр, шар).

Ключевые слова:

Теплопроводность, нестационарный тепловой режим, плотность теплового потока.

Key words:

Thermal conductivity, nonstationery thermal conditions, thermal flux density.

Введение

Длительная эксплуатация элементов энергетического оборудования (трубопроводы тепловых сетей, ядерные реакторы, турбогенераторы, ускорители заряженных частиц) в нерасчетных режимах приводит к их остановке. После ремонта проводится пуск в работу оборудования. В таких ситуациях зачастую наблюдаются необратимые тепловые процессы, связанные с разрушением тепловой и диэлектрической изоляции.

Особую актуальность представляет собой проектирование и расчет новых энергосберегающих энергетических установок с повышенными удельными энергетическими или электромагнитными характеристиками. Расчеты с большим количеством начальных и граничных условий не всегда приводят к достоверным результатам. Таким образом, возникла необходимость в обосновании и исследовании инженерного метода теплового расчета развития начальной стадии теплового процесса.

Постановка задачи

Ниже изложена методика с использованием так называемых датчиков плотности теплового потока [1]:

$$q = \rho c \delta \frac{\partial v}{\partial \tau},$$

где ρ – плотность; c – удельная массовая теплоемкость; δ – характерный размер; v – избыточная температура; τ – текущее время.

В [2] изложен простой метод оценки теплового состояния плоского элемента на начальной стадии процесса. Он не требует использования множества чисел краевой задачи Штурма–Лиувилля и решения трансцендентных уравнений. Целью настоящей работы является получение обобщенного решения теплового состояния элемента ($n=0$ – пластина; $n=1$ – цилиндр; $n=2$ – шар) справедливого для малых чисел Фурье ($Fo < 0,01$).

Пусть требуется приближенно решить одномерную нестационарную задачу теплопроводности

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{1}{R^n} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^n \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), \quad Fo > 0, \quad 0 < R < 1, \quad (1)$$

при краевых условиях

$$\theta(R, 0) = 1, \quad (2)$$

$$\theta(0, Fo) \neq \infty, \quad \frac{\partial \theta(0, Fo)}{\partial R} = 0, \quad (3)$$

$$\theta(1, Fo) = 0. \quad (4)$$

Здесь $\theta(R, Fo) = \frac{T(\xi, \tau) - T_c}{T_0 - T_c}$ – безразмерная

температура; $T(\xi, \tau)$, T_0 , T_c – соответственно температуры: текущая, начальная и на границе тела;

$R = \frac{\xi}{\xi_1}$ – безразмерная координата; ξ , ξ_1 – текущая