

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Обнинский институт атомной энергетики –
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Отделение Интеллектуальные кибернетические системы

**Выпускная квалификационная работа —
бакалаврская работа**

по направлению подготовки **09.03.02 Информационные системы и технологии**

Направленность (профиль) **Информационные технологии**

**«Разработка ИС автоматизированного
статистического анализа данных, полученных при
КГО стендовым методом на реакторах типа ВВЭР»**

Выполнил:

студент гр. ИС2-Б20

Костевич А.Е.

Руководитель ВКР,

старший преподаватель ОИКС

Радаев А.В.

Нормоконтроль

доцент отделения ИКС, к.ф.-м.н.

Качанов Б.В.

Выпускная квалификационная

работа допущена к защите

Руководитель

образовательной программы

09.03.02 Информационные системы

и технологии

канд. тех. наук

Мирзеабасов О.А.

Обнинск, 2024 г

РЕФЕРАТ

Работа 18 стр., 2 табл., 3 рис., 4 ист.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КГО СТЕНДОВЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР.

В данной работе производится подробный анализ существующего подхода к проведению процедуры и анализу данных КГО на реакторах типа ВВЭР, приводятся предложения по улучшению и автоматизации анализа данных с целью повышения точности результатов, а также описывается процесс разработки программного обеспечения с учётом внесённых предложений.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования;
- предмет исследования;
- цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- научную новизну исследования (для магистерских диссертаций);
- практическую значимость результатов работы;
- степень внедрения (при наличии справки о внедрении);
- экономическую эффективность работы.

Текст реферата должен размещаться на одном листе (странице).

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Реперный радионуклид — радионуклид, по выходу которого из твэла в теплоноситель первого контура судят о герметичности оболочки твэла, так как он обладает ядерно-физическими и химическими характеристиками, позволяющими надежно регистрировать его в условиях эксперимента.

Негерметичный твэл - твэл, в оболочке которого имеется повреждение, приводящее к выходу продуктов деления из него.

Негерметичная ТВС — ТВС, в составе которой имеются негерметичные твэлы.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БВ — Бассейн выдержки.

ВВЭР — Водо-водяной энергетический реактор.

КГО — Контроль герметичности оболочек.

ПД — Продукты деления.

ПК — Продукты коррозии.

СОДС — Система обнаружения дефектных сборок.

ТВС — Тепловыделяющая сборка.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Обзор существующей методики проведения процедуры КГО стендовым методом	4
1.1 Основные положения	4
1.2 Процедура проведения КГО стендовым методом	4
1.3 Обработка результатов	5
1.4 Учет выгорания топлива ТВС	10
2 Предложения по улучшению методики обработки данных	12
2.1 Проблемы существующего подхода	12
3 Разработка программного обеспечения с учётом внесённых предложений	13
3.1 Рисунки	13
3.2 Таблицы	13
3.3 Исходный код	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	15
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	16
Приложение А	17

ВВЕДЕНИЕ

Атомные электростанции играют ключевую роль в современной энергетике. Однако сопутствующие ядерной энергетике риски требуют непрерывного совершенствования методов контроля и обслуживания ядерных установок.

В частности, одним из значимых аспектов эксплуатации ядерных реакторов является контроль герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. В настоящее время анализ данных, полученных при проведении КГО, частично осуществляется в ручном режиме, что требует значительных ресурсов времени и труда. Более того, этот подход подвержен человеческим ошибкам и может ограничивать возможности в проведении анализа данных с высокой точностью и скоростью.

Как известно, одним из недостатков реактора типа ВВЭР является невозможность перегрузки топлива без остановки реактора и ошибка, допущенная при принятии решения относительно герметичности ТВС, может потребовать незапланированную остановку реактора, что влечёт за собой существенные экономические издержки.

Цель настоящей работы заключается в разработке программного обеспечения, работа которого направлена на повышение эффективности и достоверности результатов КГО, а также снижение трудовых затрат.

В данной работе будет проведен обзор существующего метода обработки результатов КГО, приведены предложения по его автоматизации, а также описан процесс создания прототипа программного обеспечения.

1. Обзор существующей методики проведения процедуры КГО стендовым методом

1.1. Основные положения

В данной работе рассматривается метод КГО в пеналах СОДС[1], который является одним из наиболее надёжных способов определения негерметичных ТВС. СОДС входит в состав обязательного оборудования всех действующих и проектируемых АЭС с реактором ВВЭР.

Метод основан на измерении утечки ПД из-под оболочек твэлов путем гамма-спектрометрического анализа изотопного состава проб воды, отбираемых из контура циркуляции СОДС, по активности реперных радионуклидов ^{131}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs и ^{133}Xe . Инициирование выхода радионуклидов в воду стенда КГО осуществляется посредством изменения давления циркулирующей по контуру стенда воды в процессе выдержки ТВС в этой воде – настаивании.

1.2. Процедура проведения КГО стендовым методом

1. Процедура проведения КГО начинается проведения испытаний для каждой ТВС в пеналах СОДС с последующим отбором проб воды.

Проверка ТВС проводится при циркуляции воды по контуру стенда КГО без ее замены и состоит из двух циклов:

- Настаивание ТВС при избыточном (верхнем) давлении в контуре от $4,5 \cdot 10^5$ Па до $6,0 \cdot 10^5$ Па продолжительностью 5 минут.
- Настаивание ТВС при избыточном (нижнем) давлении в контуре от $1,0 \cdot 10^5$ Па до $1,5 \cdot 10^5$ Па до полного перемешивания (не менее 15 минут).

С целью соблюдения одинаковых условий испытаний требуется, чтобы значения верхнего и нижнего избыточного давления были одинаковыми при проверке всех ТВС.

2. После завершения настаивания ТВС производится отбор пробы воды из контура стенда КГО.

3. В каждой j -ой пробе воды, взятой из стенда КГО при испытании j -ой ТВС, на спектрометрической установке измеряются значения удельной активности и приводятся на момент останова реактора:

- $A_{j, \text{КГО}}^i$ — реперных i -х радионуклидов продуктов деления (^{131}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs и ^{133}Xe)
- $A_{j, \text{КГО}}^{i'}$ — радионуклида продуктов коррозии(ПК) (^{54}Mn или ^{58}Co , ^{60}Co , ^{51}Cr , ^{59}Fe).

4. Для учета фоновой активности радионуклидов йода, цезия и продуктов коррозии периодически производится измерение их активности в воде, подаваемой в стенд КГО (с каждой вновь приготовленной порцией раствора борной кислоты на СВО), и в бассейне выдержки (один раз в сутки).

5. Проверка фоновой составляющей за счет загрязнения стенда радиоактивными продуктами (холостая проба) производится перед началом работ по КГО, а также периодически (не реже одного раза в сутки). Для этого без загрузки ТВС в пенал проводятся все операции по промывке контура и настаиванию с отбором и анализом пробы.

6. Итогом проведения спектрометрического анализа проб воды является таблица значений, в которых для каждой j -ой ТВС приводятся в соответствие значения активности $A_{j, \text{КГО}}^i$ каждого из регистрируемых реперных радионуклидов и $A_{j, \text{КГО}}^{i'}$ продуктов коррозии. Статистический анализ результатов измерения проводится для ТВС, в пробах которых значимо регистрировались ПД. Результаты измерений ТВС, при проверке которых реперные ПД не регистрировались, из статистического расчета исключаются.

1.3. Обработка результатов

1. Анализ герметичности ТВС, согласно [1], основан на выборочном поиске выбросов методом "трёх сигм".

2. Основными реперными радионуклидами, по которым устанавливается наличие(отсутствие) негерметичных твэлов в ТВС являются ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs . Наличие в контролируемой пробе ^{136}Cs и(или) ^{133}Xe , значимо

превышающих их содержание в холостых пробах, является однозначным основанием для включения ТВС в список подозрительных, требующих как минимум дополнительной проверки.

3. Полученные значения представляются в графическом виде в такой хронологической последовательности, в какой ТВС проверялись в стенде КГО. Примеры графического представления результатов КГО приведены на рисунках 1 и 2. На основании визуального анализа этих данных на графике может быть сделано заключение, относятся ли они к одному статистическому распределению. Таким способом проводится оценка соблюдения одинаковых условий проверки всех ТВС. Если условия менялись с течением времени (на практике так происходит почти всегда), то производится разделение исходных данных на выборки, которые относятся к одному статистическому распределению.

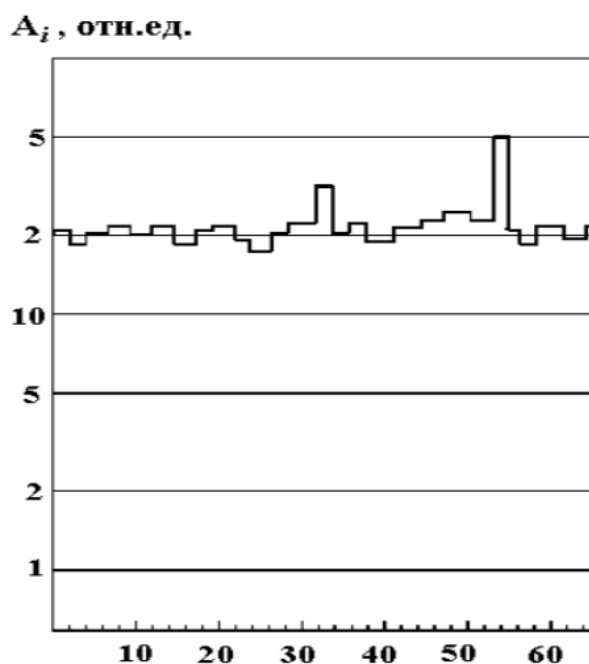


Рисунок 1 – Графическое хронологическое представление данных, принадлежащих к одному распределению.[1]

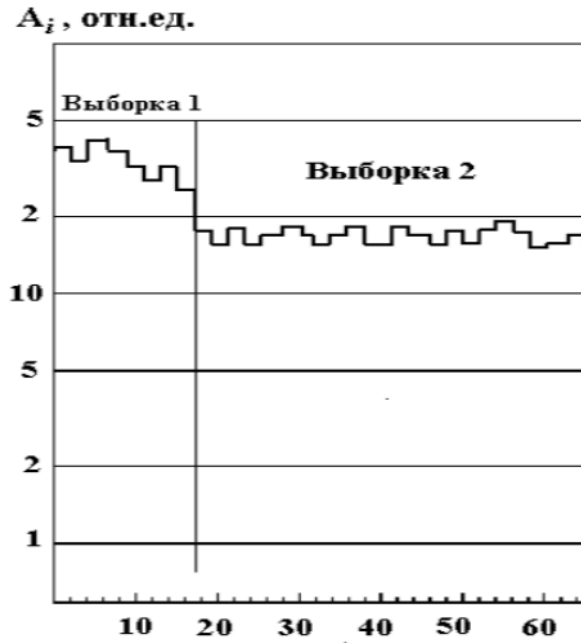


Рисунок 2 – Графическое хронологическое представление данных, принадлежащих к различным распределениям.[1]

4. Для каждой полученной совокупности данных, относящихся к одному и тому же статистическому распределению, вычисляются $\bar{A}_{\text{кго}}^i$ — среднеарифметические значения удельной активности радионуклидов ^{131}I (и ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{133}Xe) и $\bar{A}_{\text{кго}}^{i'}$ — среднеарифметическое значение удельной активности ^{54}Mn (или ^{58}Co , ^{60}Co , ^{51}Cr , ^{59}Fe), по формулам 1 и 2:

$$\bar{A}_{\text{кго}}^i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{j,\text{кго}}^i \quad (1)$$

$$\bar{A}_{\text{кго}}^{i'} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{j,\text{кго}}^{i'} \quad (2)$$

Кроме того, рассчитывают соответствующие им среднеквадратичные отклонения (стандартные статистические неопределенности) по формулам 3 и 4:

$$\sigma_{A_{\text{кго}}^i} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (A_{j,\text{кго}}^i - \bar{A}_{\text{кго}}^i)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{A_{\text{кго}}^{i'}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (A_{j,\text{кго}}^{i'} - \bar{A}_{\text{кго}}^{i'})^2} \quad (4)$$

где N — количество проверенных ТВС.

5. Если $N > 10$, то ТВС, для которых выполняется условие 5 являются герметичными.

$$A_{j, \text{кго}}^i \leq A_{\text{кго}}^i + 3 * \sigma_{A_{\text{кго}}^i} \quad (5)$$

ТВС, для которых одновременно выполняются условия 6 и 7 являются негерметичными.

$$A_{j, \text{кго}}^i > A_{\text{кго}}^i + 3 * \sigma_{A_{\text{кго}}^i} \quad (6)$$

$$A_{j, \text{кго}}^{i'} \leq A_{\text{кго}}^{i'} + 3 * \sigma_{A_{\text{кго}}^{i'}} \quad (7)$$

Важно отметить, что активности радионуклидов ПК измеряются с целью учёта при анализе данных. ПК, образующиеся в конструкционных материалах реактора по мере эксплуатации, переносятся по теплоносителю и могут откладываться на ТВС, что влечёт за собой повышение активности в том числе и реперных ПД[2]. Именно поэтому повышение активности реперных ПД совместно с активностями ПК может являться признаком некачественной отмывки ТВС при подготовке к проведению испытаний.

6. Если количество ТВС в выборке $N < 10$, то в формулах 5-7 в качестве коэффициента при и вместо коэффициента 3 используются коэффициенты Стьюдента, приведенные в таблице 1, для доверительной вероятности 0,95.

Таблица 1 – Значения коэффициента Стьюдента в зависимости от количества проверенных ТВС и вероятности, с которой ТВС могут быть отнесены к разряду имеющих негерметичные твэлы

Кол-во ТВС	0,95	0,99	0,999
2	12,7	66,7	637
3	4,30	9,93	31,6
4	3,18	5,84	12,9
5	2,78	4,60	8,61
6	2,57	4,03	6,86
7	2,45	3,71	5,96
8	2,36	3,50	5,41
9	2,31	3,36	5,04
10	2,26	3,25	4,78

7. Заключение о герметичности ТВС, для которых при выполнении условия 7 условие 6 выполняется не для всех основных реперных ПД(^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs), производится с учетом дополнительной информации: наличие (величина удельной активности) в пробах КГО других реперных ПД(^{136}Cs , ^{133}Xe), а также соотношения активности ^{134}Cs и ^{137}Cs с учётом выгорания.

8. Если в результате вычислений выявлены ТВС, содержащие твэлы с негерметичными оболочками, то проводится повторный расчет величин по формулам 1-4 и проверка по условиям 6 и 7 для остальных ТВС.

9. Повторение расчетов и проверок производится до тех пор, пока все ТВС, включаемые в повторную проверку, не будут удовлетворять условию 5.

10. После завершения последовательно проведенных расчетов и проверок повторный КГО твэлов проводится для следующих ТВС:

- для которых выполняется условие 6 для основных реперных ПД и одновременно не выполняется условие 7;
- для которых выполняется условие 6, но проверенных сразу после ТВС, для которых также выполняется условие 6.
- для которых выполняются условие 6 и условие 7, но удельная активность ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробе не превышала $7,4 \cdot 10^4$ Бк/кг ($2 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг).

11. Результат повторной проверки включается в анализируемую совокупность вместо первичного, если он качественно отличается от него.

1.4. Учет выгорания топлива ТВС

Радионуклид ^{137}Cs ($t_{1/2}=30$ лет) является конечным продуктом радиоактивного бета-распада предшественников в цепочке радиоактивного распада. Влияние других мод образования ^{137}Cs несущественно, так что количество атомов этого радионуклида в топливе и под оболочкой ТВЭЛ оказывается прямо пропорционально выгоранию.

Радионуклид ^{134}Cs ($t_{1/2}=2,06$ лет) образуется преимущественно за счет реакции (n, γ) на ядрах стабильного изотопа ^{133}Cs , который является последним членом цепочки радиоактивного распада и накапливается в топливе практически линейно с выгоранием.

Поскольку образование ^{134}Cs из ^{133}Cs в первом приближении линейно с выгоранием, общее количество ^{134}Cs оказывается близким к квадратичной функции от выгорания, естественно, с учетом радиоактивного распада. Таким образом, соотношение активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs в топливе и под оболочкой оказывается значимо зависящим от выгорания. При проведении КГО на остановленном реакторе в пеналах СОДС определение соотношения удельных активностей радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробах КГО может быть использовано в качестве индикатора для дополнительной проверки факта обнаружения ТВС с негерметичными ТВЭЛами.

1. Для ТВС, в которых при выполнении условия (7) условие (6) выполняется не для всех контролируемых реперных ПД, строится коэффициент, равный отношению отношения удельных активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs в j-ой пробе стенда КГО:

$$K_{\text{кго}}^j = \frac{A_{j,\text{кго}}^{134\text{Cs}}}{A_{j,\text{кго}}^{137\text{Cs}}} \quad (8)$$

На основе сопоставления определенных по формуле (8) коэффициентов $K_{\text{кго}}^j$ - соотношений измеренных удельных активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробах от ТВС, определенных как негерметичные, с кривой, приведенной на рисунке 3 определяются расчетные выгорания топлива ТВС с негерметичными ТВЭЛами.

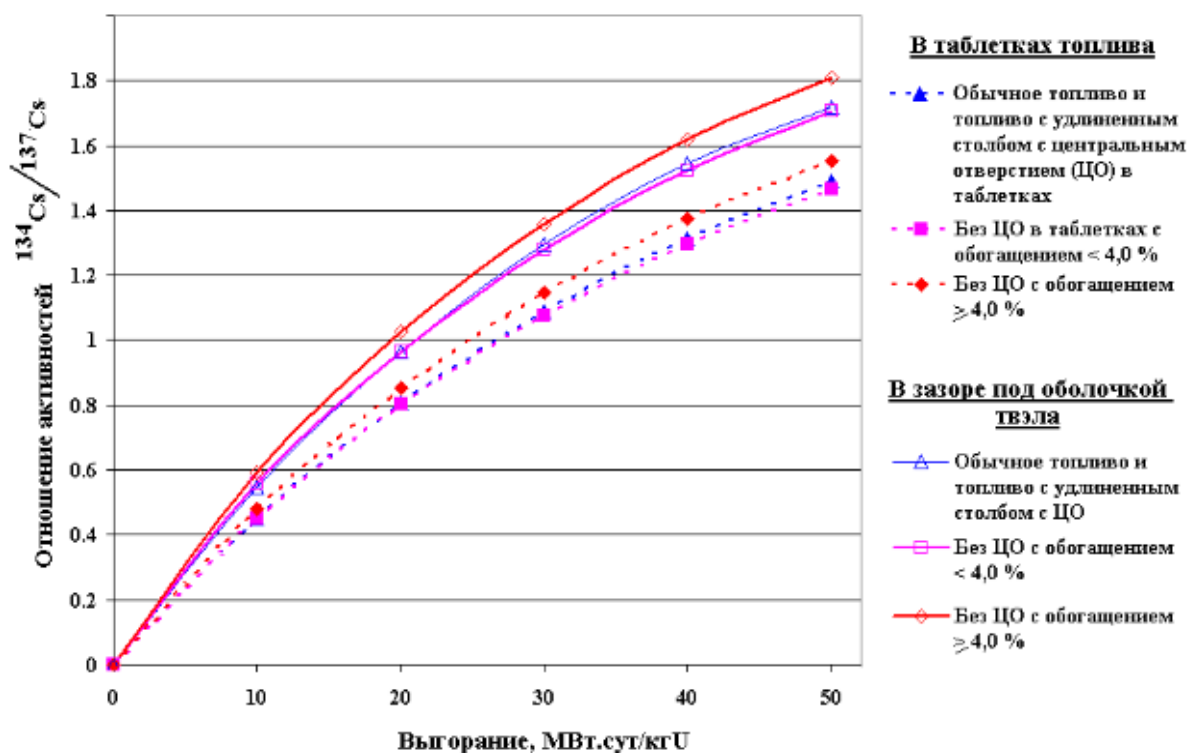


Рисунок 3 – Расчетные соотношения активностей радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs в топливе и в зазоре под оболочкой твэлов в функции выгорания для типичных историй облучения топлива реакторов ВВЭР-1000.[1]

2. Совпадение (с учетом неопределенностей) полученных таким образом выгораний топлива с выгораниями топлива этих же ТВС по данным физических расчетов (с учетом неравномерности энерговыделения и выгорания по высоте и радиусу кассеты) является дополнительным фактом, подтверждающим наличие негерметичных твэлов в составе контролируемых ТВС.

2. Предложения по улучшению методики обработки данных

2.1. Проблемы существующего подхода

Рассмотрев методику проведения процедуры КГО согласно[1] можно выделить несколько замечаний, которые можно пересмотреть:

1. Метод анализа данных, приведённый в параграфе 1.3, основывается на поиске выбросов по правилу "3 сигм". Данное правило утверждает

Процедура КГО с учётом времени и объёма испытаний может проходить до нескольких недель. Кроме того, с течением времени может изменяться концентрация борной кислоты в БВ и в воде, подаваемой на стенд КГО с целью борного регулирования. Как известно В связи с этим значения активностей ПД, полученные в разное время, могут принадлежать разным статистическим распределениям.

3. Разработка программного обеспечения с учётом внесённых предложений

В данном разделе приводятся примеры добавления в текст элементов, которые могут нумероваться автоматически — таблиц, рисунков, листингов программ. Важно запомнить, что для корректной работы с такими элементами следует задавать их названия командой `\caption{название}` и определять символическое имя (метку) командой `\label{ключ}`. По этому ключу можно ссылаться на соответствующий объект в тексте командой `\ref{ключ}`, см. примеры ниже.

3.1. Рисунки

Для добавления нумерованного рисунка следует использовать окружение `figure`. Пример приведен на рис. 1.

График построен с использованием языка программирования **R** [4].

3.2. Таблицы

Таблицы добавляются в текст аналогично графике, только используется окружение `table` (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Заполнение ячеек

1	a	b	c
2	Строка 1	Пример 1	Дополнительно
3	Строка 2	Пример 2	

3.3. Исходный код

Исходный код программ можно добавить с помощью окружений, определенных сразу после преамбулы. Пример — на листинге 1.

Листинг 1 – Пример кода на языке R

```
1 # Проверка и тестирование пакета deSolve
2 require(deSolve)
3 require(rgl)
```



```
4 # система Хиндмарша - Розе с параметрами
5 # используются параметры в виде списка (parms$a etc)
6 hindrose <- function(t,y,parms)
7 {
8   ydot <- vector(len=3)
9   ydot[1] <- y[2] - parms$a * y[1]^3 + parms$b*y[1]^2 + parms$ltext - y[3]
10  ydot[2] <- parms$c - parms$d*y[1]^2 - y[2]
11  ydot[3] <- parms$r * (parms$s*(y[1]-parms$xs)-y[3])
12  return(list(ydot))
13 }
```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы была проведена — описать результаты бурной деятельности по выполнению ВКР, разумно в виде списка выполненных задач.

Разработанная программа позволяет — перечислить основные функциональные характеристики и особенности, можно в виде списка:

- выполнено такое-то задание;
- разработана некоторая система;
- у работы есть перспективы развития.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 ТИПОВАЯ МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ / АО «Концерн Росэнергоатом». — 2009. — РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009.
2. Поведение продуктов коррозии в первом контуре ЯЭУ с водным теплоносителем / Б. А. Гусев [и др.] // Вестник СПбГУ. Серия 4. Физика. Химия. — 2012. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povedenie-produktov-korrozii-v-pervom-konture-yaeu-s-vodnym-teplonositelem>.
3. Дорофеев В. С., Волосатова Т. М. Ансамблирование методов обнаружения выбросов при подготовке обучающей выборки данных. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2022. — 10(3). — URL: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=1210>.
4. *R Development Core Team*. R: A Language and Environment for Statistical Computing / R Foundation for Statistical Computing. — Vienna, Austria, 2010. — URL: <http://www.R-project.org/> ; ISBN 3-900051-07-0.

Приложение А

Листинг А.1 – Часть кода реализации класса HashMapValue

```
1 public class HashMapValue {
2
3     protected String filename;
4     protected HashMap<String, String> hashValue =
5     new HashMap<>();
6     protected HashMap<String, Boolean> hashKeysFlag =
7     new HashMap<>();
8
9     public void setData(String key, String value) {
10         hashValue.put(key, value);
11     }
12
13     public String getData(String key) {
14         return hashValue.get(key);
15     }
16     /* ... */
17 }
```

Листинг А.2 – Пример кода

1 код второго приложения
