

**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 17 стр., 3 табл., 2 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

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>3</b>
<b>1 Обзор существующей методики проведения процедуры КГО стендовым методом</b>	<b>4</b>
1.1 Основные положения . . . . .	4
1.2 Процедура проведения КГО стендовым методом . . . . .	4
1.3 Обработка результатов . . . . .	5
<b>2 Предложения по улучшению методики обработки данных</b>	<b>10</b>
2.1 Рисунки . . . . .	10
2.2 Таблицы . . . . .	10
2.3 Исходный код . . . . .	10
<b>3 Разработка программного обеспечения с учётом внесён- ных предложений</b>	<b>12</b>
3.1 Рисунки . . . . .	12
3.2 Таблицы . . . . .	12
3.3 Исходный код . . . . .	12
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>14</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>15</b>
<b>Приложение А</b>	<b>16</b>

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

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". Этот подход применим для выборок, значения которых извлечены из нормально распределённых генеральных совокупностей. Исходя из опыта эксплуатации НВ АЭС, значения активностей крайне редко бывают распределены по нормальному закону в си-



лу влияния множества факторов. Кроме того, среднее и среднеквадратическое отклонение, рассчитываемые в данном методе, также изменяются под воздействием аномальных значений, что приводит к маскировке выбросов[3]. Следовательно, имеет смысл рассмотреть альтернативы методу "трёх сигм". Предложения на замену данному приведены в параграфе II.

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

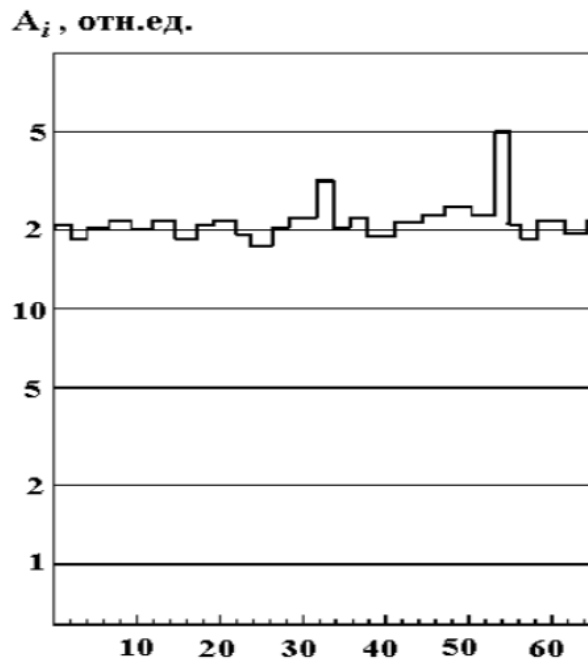


Рисунок 1 – Графическое хронологическое представление данных, принадлежащих к одному распределению.[1]

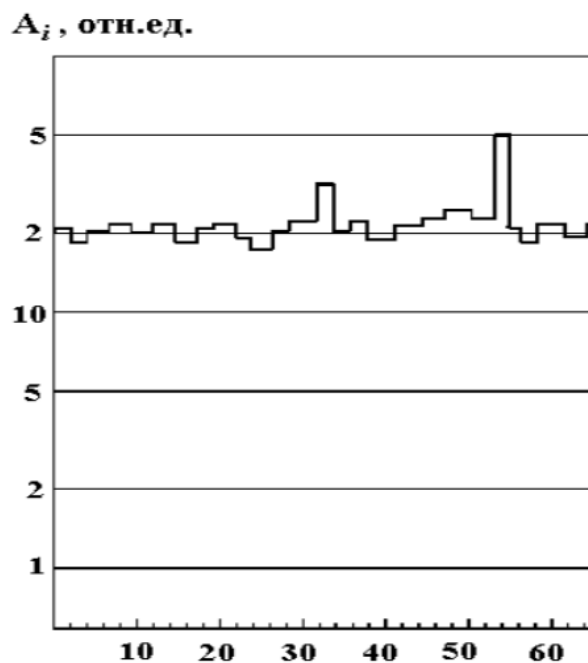


Рисунок 2 – Графическое хронологическое представление данных, принадлежащих к различным распределениям.[1]

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  $^{131}\text{I}$  (и  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ) и  $\bar{A}_{\text{кго}}^{i'}$  — среднеарифметическое значение удельной активности  $^{54}\text{Mn}$  (или  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ), по формулам 1 и 2:

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

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

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

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

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

где  $N$  — количество проверенных ТВС.

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

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

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

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

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

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

## 2. Предложения по улучшению методики обработки данных

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.

### 2.1. Рисунки

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

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

### 2.2. Таблицы

Таблицы добавляются в текст аналогично графике, только используется окружение `table` (см. таблицу 3).

Таблица 2 – Заполнение ячеек

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

### 2.3. Исходный код

Исходный код программ можно добавить с помощью окружений, определенных сразу после преамбулы. Пример — на листинге 2.

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 }

```

---

### 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 3).

Таблица 3 – 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 2.

Листинг 2 – 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

---