

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

Карлов Юрий Кимович

**ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ И СБОРОК АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ**

Специальность 05.13.05

Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор В.К. Кулешов

Томск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	1
Глава 1 Научные и технические проблемы контроля параметров твэлов энергетических, исследовательских и промышленных реакторов.....	18
1.1 Твэл как объект контроля	18
1.2 Технологический процесс изготовления и контролируемые параметры твэлов энергетических, исследовательских и промышленных реакторов	28
1.3 Проблемы реализации сплошного контроля параметров твэлов	44
1.4. Обоснование направлений диссертационных исследований	52
Глава 2 Методы и средства контроля параметров твэлов реакторов различного назначения	54
2.1 Радиационные методы контроля	54
2.2 1 Абсорбционные методы измерения	55
2.2.2 Методы измерения с применением обратно рассеянного излучения	59
2.2.3 Спектрометрические методы измерения	64
2.2.4 Томографические методы измерения	69
2.2 Ультразвуковые методы контроля	76
2.2.1 Эхо-импульсный метод ультразвукового контроля	77
2.2.2 Теневой метод ультразвукового контроля	80
2.2.3 Резонансный метод ультразвукового контроля	82
2.3 Оптические методы контроля	86
2.3.1 Теневой и дифракционный методы измерения	87
2.3.2 Интерференционный метод измерения	89
2.4 Электромагнитные методы	92
2.4.1 Контроль дефектов внешнего вида поверхности твэла	93
2.4.2 Контроль содержания оксида гадолиния в твэле	97
2.5 Тепловые методы контроля	101
2.6 Выводы по главе 2	105

Глава 3 Принципы построения и разработки автоматизированных комплексов контроля параметров твэлов	107
3.1 Требования к контролю критических параметров твэлов	107
3.2 Основные принципы построения автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов	110
3.2.1 Принцип системного подхода	110
3.2.2 Принцип обратной связи	115
3.2.3 Принцип многоканальности	120
3.2.4 Принцип многофункциональности	123
3.2.5 Принцип адаптивности	125
3.2.6 Принцип метрологической устойчивости	128
3.3 Выводы по главе 3	133
Глава 4 Алгоритмы функционирования автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов	134
4.1 Алгоритм функционирования автоматизированного комплекса контроля толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэлов промышленного реактора	135
4.2 Алгоритм радиометрического контроля сплошности топливного столба твэлов реактора ВВЭР	158
4.3 Алгоритм контроля геометрических размеров твэлов реактора ВВЭР	162
4.4 Алгоритм функционирования автоматизированного комплекса контроля геометрических размеров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000	168
4.5 Алгоритм функционирования автоматизированного комплекса контроля дефектов внешнего вида поверхности твэлов ВВЭР-1000	174
4.6 Выводы по главе 4	177
Глава 5 Элементы и устройства автоматизированных систем управления контролем параметров твэлов и ТВС	179

5.1 Автоматизированный комплекс контроля толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности типа МПК-3	180
5.2 Автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров твэлов реакторов типа ВВЭР	200
5.3 Автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000	208
5.4 Автоматизированный комплекс контроля сплошности топливного столба твэлов реактора типа ВВЭР	220
5.5 Автоматизированные комплексы контроля дефектов поверхности твэлов реактора типа ВВЭР-1000	225
5.5.1 Автоматизированный комплекс контроля дефектов поверхности твэлов ВВЭР-1000 типа «ВИТОК»	225
5.5.2 Автоматизированный комплекс контроля дефектов поверхности твэлов ВВЭР-1000 типа «ПРОФИЛЬ»	230
5.6. Выводы по главе 5	235
Заключение	236
Список литературы	238
Приложение А	248
Приложение Б	249
Приложение В	250
Приложение Г	251

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Высокий уровень развития атомной промышленности и энергетики в Российской Федерации является важнейшим фактором, который определяет энергетическую безопасность и обороноспособность нашей страны. Ядерное топливо, которое изготавливают предприятия Росатома, представляет собой тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), собранные в специальные тепловыделяющие сборки (ТВС) различной конструкции в зависимости от типа реактора и его назначения.

Необходимость обеспечения высокого качества ядерного топлива для атомных реакторов является важнейшей задачей для его конструкторов, технологов и изготовителей. Требования к качеству ядерного топлива постоянно возрастают в связи с необходимостью повышения безопасности эксплуатации атомного реактора и увеличением сроков использования ядерного топлива.

Получение необходимых объективных данных о параметрах конструкции ядерного топлива и соответствие их требованиям конструкторской и технологической документации невозможны без применения автоматизированных систем управления их контролем. Параметры конструкции ядерного топлива, которые непосредственно влияют на безопасность и эффективность работы атомного реактора, относятся к критическим параметрам и подлежат 100% (сплошному) выходному контролю на соответствие техническим требованиям, указанным в технических условиях (ТУ).

В связи с этим возникла необходимость в создании элементов автоматизированных комплексов контроля (АКК) критических параметров ТВЭЛов и ТВС, которые могут быть встроены в технологическую линию их изготовления, способны формировать отдельные линии сплошного выходного контроля и составлять основную часть автоматизированных систем управления контролем параметров (АСУКП) ТВЭЛов и ТВС. Решение данной проблемы до начала нынешнего века было затруднено отсутствием необходимой элементной базы

технических средств, прежде всего, специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной и измерительной техники необходимых для создания АКК критических параметров твэлов и ТВС различных реакторов.

Актуальность диссертационной работы связана с разработкой и внедрением специальных первичных преобразователей, элементов и устройств микропроцессорной и измерительной техники, алгоритмов их функционирования в автоматизированных системах управления контролем критических параметров ядерного топлива. Актуальность разработки и создания специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной и измерительной техники и алгоритмов их функционирования для современных АКК критических параметров ядерного топлива нового поколения, работающих в технологических линиях, подтверждается материалами российских, европейских и всемирных конференций по неразрушающему контролю, а также конференций европейского ядерного общества. Кроме того, работы по данному направлению постоянно включаются в планы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) топливной компании «ТВЭЛ» госкорпорации «РОСАТОМ» в разделах по совершенствованию технологии изготовления ядерного топлива и повышению его качества.

Степень разработанности темы

В начале 80-х годов во Всесоюзном научно-исследовательском институте радиационной техники (ВНИИРТ) под руководством профессора, доктора технических наук Штань А.С. была предложена концепция развития АКК параметров твэлов и ТВС ядерных реакторов на базе системного подхода к организации структуры АКК. В период с 1983 по 1987 г. во ВНИИРТе совместно с ПАО «НЗХК» проведена большая научно-исследовательская работа в этом направлении. Одними из главных задач в этой работе были разработка и создание специальных первичных преобразователей для различных полей излучения, микропроцессорных устройств для цифровой обработки информации и алгоритмов их функционирования. Особое внимание было уделено вопросам развития

элементов и устройств технического зрения для контроля геометрических параметров ТВЭЛОВ и ТВС.

В работах [1–3] рассмотрен ряд новых АКК ядерного топлива для атомных электростанций (АЭС), где были использованы новые специальные первичные преобразователи и микропроцессорные устройства. В работе [4] доктором технических наук Афанасьевым В.Н. предложен модульный агрегатный принцип построения АКК ядерного топлива. В этой работе предлагается сформировать единый подход к разработке и изготовлению основных элементов и устройств для АКК ядерного топлива на основе модульного принципа построения их архитектуры. АКК рассматривается как основной структурный блок системы управления контролем готовой продукции технологического процесса производства ТВЭЛОВ и ТВС. Особое внимание в работе уделяется средствам сбора и обработки информации и вопросам магистральной передачи данных. В работе [5] сформулированы основные требования к базовым элементам и модулям агрегатного комплекса технических средств для промышленного контроля ТВЭЛОВ АЭС.

В это же время во Всесоюзном научно-исследовательском институте неорганических материалов имени А.А. Бочвара (ВНИИНМ) под руководством академика Решетникова Ф.Г. и доктора технических наук Бибилашвили Ю.К. была проведена большая работа по формализации технических требований к критическим параметрам ТВЭЛА ВВЭР-1000 для автоматизированного контроля. Особое внимание в работе уделяется вопросам использования различных специальных первичных преобразователей для повышения эффективности сплошного контроля критических параметров ядерного топлива.

Научные исследования и разработки в этой области проводятся в таких известных компаниях по производству ядерного топлива как Westinghouse (США), Areva (Франция), BNFL (Великобритания). Накоплен большой практический опыт работ в этой области рядом зарубежных фирм, специализирующихся в этом направлении, среди которых выделяются такие как Intercontrole, General Electric, Siemens, Toshiba. В России большой вклад в разработку и создание современных специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной,

измерительной техники и алгоритмов их функционирования для АКК критических параметров твэлов и ТВС внесли такие организации как ВНИИТФА, ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН), Московский инженерно-физический институт (МИФИ). Каждая из этих организаций выполняла отдельно взятую задачу по созданию АКК критических параметров твэлов и ТВС для сплошного контроля, и на полученных результатах отрицательно сказалось отсутствие единого методического обеспечения этих работ.

Во многом поэтому, поставленная цель по созданию полного объёма АКК для сплошного контроля критических параметров твэлов ВВЭР-1000 в технологическом процессе его производства, который удовлетворял бы современным техническим требованиям, предъявляемым к ядерному топливу нового поколения, не была достигнута. Выходной контроль геометрических параметров конструкции твэла, недопустимых механических дефектов оболочки твэла, давления гелия внутри твэла, а также геометрических размеров дистанционирующей решётки ТВС, продолжал проводиться либо выборочно, вручную, либо по альтернативному, допусковому признаку. Между тем научно обоснованные принципы построения и разработки АКК критических параметров твэлов и создание специальных первичных преобразователей, микропроцессорных, измерительных устройств и алгоритмов их функционирования для АКК критических параметров твэлов позволяют актуальное осуществление полного объема сплошного выходного контроля твэлов за счет повышения его производительности и точности.

Цель работы заключается в научном обосновании принципов построения и разработки АКК критических параметров твэлов и разработке и создании специальных элементов – первичных преобразователей, устройств измерительной, микропроцессорной техники и алгоритмов их функционирования для автоматизированных комплексов контроля твэлов и ТВС атомных реакторов, отличающихся высокой производительностью и достоверностью контроля, способных работать в составе технологических линий производства твэлов и ТВС.

Задачами исследования являются:

- выполнение обзора научных и технических проблем, методов и средств контроля параметров твэлов различных реакторов;
- проведение анализа методов и средств контроля параметров твэлов реакторов различного назначения;
- формулировка основных принципов построения и разработки автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов;
- научное обоснование разработки элементов и устройств автоматизированных систем управления контролем параметров твэлов и тепловыделяющих сборок.

Объектом исследований являются технологический процесс производства твэлов и ТВС для реакторов различного назначения, алгоритмы функционирования и конструкция автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов и ТВС.

Методы исследований:

- теневой и эхо-импульсный метод ультразвуковой дефектоскопии;
- гамма-абсорбционный и гамма-спектрометрический радиометрические методы;
- электронный альбедный радиометрический метод толщинометрии;
- интерференционный и дифракционный оптический методы размерного контроля;
- электромагнитный вихретоковый метод дефектоскопии;
- методы математической статистики и теории вероятности, обработки изображений и спектров;
- теория взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, теория распространения оптического, электромагнитного, ультразвукового излучения в различных средах;
- общая теория систем;
- метрологические нормы и стандарты.

Предметом исследований являются:

- создание основных принципов построения АКК критических параметров твэлов и ТВС;
- научное обоснование разработки первичных преобразователей измерительных каналов, устройств измерительной и микропроцессорной техники и алгоритмов их функционирования;
- совершенствование технических характеристик автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов и ТВС;
- реализация сплошного выходного контроля критических параметров твэлов и ТВС реакторов различного назначения в технологическом процессе их производства.

Научная новизна:

1. Предложены и научно обоснованы основные принципы построения автоматизированных комплексов для осуществления сплошного выходного контроля критических параметров твэлов и тепловыделяющих сборок в составе технологических линий производства ядерного топлива, за счет чего реализовано методическое обеспечение создания этих автоматизированных комплексов.

2. Предложены функциональная схема системы управления комплексным контролем геометрических параметров твэлов ВВЭР-1000, отличающаяся использованием оптикоэлектронных первичных преобразователей, и алгоритм функционирования системы управления автоматизированным комплексом, отличающийся введением дополнительных измерительных каналов.

3. Предложен алгоритм функционирования системы управления комплексным контролем механических дефектов наружной поверхности твэлов ВВЭР-1000, отличающийся совместным использованием разработанных для этой цели вихретоковых и оптикоэлектронных первичных преобразователей измерительных каналов. (Патент РФ № 2235999 от 05.08.2002).

4. Предложены алгоритм функционирования и структурная схема элементов конструкции автоматизированной системы управления контролем геометрических параметров дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок реактора

ВВЭР-1000, отличающаяся использованием дифракционного оптического элемента Дамманна и лазерной измерительной головки. (Патент РФ № 2334944 от 17.07.2006).

5. Создан блок специальных первичных преобразователей с устройством их автоматической регулировки и алгоритмом их функционирования в автоматизированной системе управления многоканальным радиометрическим контролем толщины слоев твэлов промышленного реактора. (Патенты РФ № 2069338 от 25.04.1994 и № 2079172 от 31.01.1994).

6. Предложены алгоритм функционирования и структурная схема элементов конструкции автоматизированной системы управления контролем сплошности топливного столба твэлов реакторов типа ВВЭР, отличающаяся более высокой надёжностью выявления дефектов сплошности топливного столба (Патенты РФ № 2172529 от 20.10.1999 и № 2222063 от 13.12.2001).

7. Созданы специальные элементы – первичные преобразователи измерительных каналов, устройства микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмы их функционирования для автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов и тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000, с помощью которых впервые осуществлен сплошной выходной контроль в технологическом процессе производства ядерного топлива.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Принципы построения автоматизированных комплексов контроля критических параметров ядерного топлива, сформулированные на основе опыта разработки и внедрения специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования, позволяют реализовать оптимальную структуру и конструкцию автоматизированных комплексов контроля твэлов и тепловыделяющих сборок реакторов различного назначения для их работы в технологических линиях производства ядерного топлива.

2. Алгоритм функционирования системы управления автоматизированным комплексом контроля сплошности топливного столба твэлов реактора типа ВВЭР и

структурной схемы элементов конструкции автоматизированного комплекса позволяет повысить точность контроля малых зазоров топливного столба ТВЭЛОВ типа ВВЭР в 1,5 раза.

3. Предложенные специальные первичные преобразователи, устройства микропроцессорной и измерительной техники и алгоритмы их функционирования для автоматизированных комплексов контроля внешнего вида поверхности, геометрических размеров и сплошности топливного столба ТВЭЛОВ позволяют осуществить полный сплошной контроль ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 в технологической линии их производства в соответствии с техническими условиями в режиме реального времени.

4. Специализированные дифракционные оптические элементы и алгоритм функционирования автоматизированного оптикоэлектронного комплекса контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 позволяют повысить производительность контроля в сравнении с контактно-измерительными машинами в 20 раз.

5. Совокупность новых решений в применении специального блока радиометрических первичных преобразователей и алгоритма их функционирования в автоматизированной системе управления контролем толщины слоев ТВЭЛОВ позволяет реализовать контроль толщины слоев ТВЭЛОВ промышленного реактора с повышенными производительностью (в 5 раз) и точностью (в 2,5 раза).

6. Совокупность предложенных решений в применении вихретоковых первичных преобразователей для обнаружения механических дефектов наружной поверхности ТВЭЛА с фиксацией их координат и оптикоэлектронных первичных преобразователей измерения их глубины и раскрытия позволяет осуществить сплошной контроль дефектов внешнего вида ТВЭЛОВ ВВЭР-1000.

Теоретическая значимость работы

1. Изложены основные принципы построения автоматизированных комплексов контроля критических параметров ТВЭЛОВ и ТВС атомных реакторов.

2. Доказано, что комплексное использование созданных автором первичных преобразователей и соответствующих алгоритмов их функционирования в

автоматизированных системах управления контролем критических параметров позволяет решить задачу сплошного контроля ТВЭЛОВ и ТВС атомных реакторов,

3. Проведена адаптация предложенных автором алгоритмов функционирования систем управления контролем критических параметров ТВЭЛОВ и ТВС для внедрения их в технологические процессы производства ТВЭЛОВ и ТВС атомных реакторов.

4. Полученные результаты исследований по измерению критических параметров ТВЭЛОВ и ТВС расширяют возможности применения разработанных специальных первичных преобразователей для контроля ТВЭЛОВ и ТВС других различных модификаций при разработке и изготовлении перспективных конструкций ядерного топлива реакторов нового поколения.

Практическая значимость

1. Разработанные специальные первичные преобразователи, устройства микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмы их функционирования для автоматизированных комплексов контроля критических параметров ядерного топлива для энергетических, исследовательских и промышленных реакторов позволили осуществить полный сплошной контроль ТВЭЛОВ и ТВС на соответствие требованиям технических условий с высокой производительностью и необходимой точностью, обеспечив тем самым высокое качество выпускаемого ядерного топлива, как для российских, так и для зарубежных потребителей.

2. Автоматизированные комплексы контроля внешнего вида поверхности ТВЭЛА ВВЭР («ВИТОК», «ПРОФИЛЬ»), геометрических размеров «РАЗМЕР», сплошности топливного столба «КСИГ», а также автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000 «РЕШЁТКА» и автоматизированный комплекс контроля толщины слоёв ТВЭЛОВ промышленного реактора «МПК-3М» внедрены на ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» г. Новосибирск.

Достоверность результатов обеспечена адекватным применением теории измерений, связанных с использованием ионизирующих излучений,

электромагнитных и ультразвуковых полей, метрологических норм и стандартов, стандартных образцов и мер, стандартных измерительных приборов и подтверждается результатами метрологической аттестации и сравнительными испытаниями с разрушающими методами измерения и химического анализа.

Апробация работы. Основные результаты и положения работы докладывались на следующих конференциях: 15-я Всемирная конференция по неразрушающему контролю, Рим, 15–20 октября 2000 г.; 8-я конференция по неразрушающему контролю, Барселона, 17–21 июня 2002 г.; международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности (производство, наука, образование)», Томск, 7–9 июня 2004 г.; 16-я Всемирная конференция по неразрушающему контролю, Монреаль, 30 августа – 3 сентября 2004 г.; научно-техническая конференция «Ядерное топливо нового поколения для АЭС», г. Москва, 17–19 ноября 2010 г.; конференция «Инновации в неразрушающем контроле SibTest», Алтайский край, 25–28 июля 2011 г.; конференция «TopFuel 2012», Манчестер, Англия, 2–6 сентября 2012 г.

Личный вклад автора. Основные исследования по теме диссертации выполнены лично автором, либо при его участии. Часть исследований, выполненных автором, проводились совместно с его коллегами с Центральной научно-исследовательской лаборатории автоматики Новосибирского завода химконцентратов, а также со специалистами КТИ НП СО РАН. Автором были сформулированы основные принципы и положения исследований по теме диссертации, он принимал непосредственное участие в разработке технических заданий, методик испытаний, разработке конструкции первичных преобразователей функциональных схем и алгоритмов работы автоматизированных комплексов.

Публикации

По теме диссертации имеется 49 публикаций (3 без соавторов), в том числе 17 статей в журналах из перечня ВАК (1 без соавторов), 1 монография, 16 патентов РФ на изобретения, 7 авторских свидетельств, 8 работ в трудах конференций.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений, имеет 251 страницу машинописного текста, в тексте приведено 80 рисунков, 9 таблиц и библиография из 110 наименований.

Основное содержание работы

Во введении представлена краткая характеристика работы.

В главе 1 рассмотрены научные и технические проблемы, связанные с организацией контроля критических параметров твэлов энергетических, исследовательских и промышленных реакторов. Проанализированы основные особенности конструкции твэлов различных реакторов как объекта контроля, а также технические требования, предъявляемые к параметрам твэла, которые являются определяющими для разработки конструкции специальных первичных преобразователей измерительных каналов.

Отдельно рассмотрены особенности технологического процесса изготовления твэлов. Проведена оценка влияния конструкции твэла и особенности технологического процесса его производства на алгоритм функционирования элементов и устройств автоматизированного комплекса для осуществления контроля параметров твэлов с необходимой точностью и производительностью. В конце главы сформулированы задачи исследования, стоящие перед автором при создании систем управления контролем критических параметров твэлов различных реакторов.

Во главе 2 рассмотрены основные методы и технические средства контроля параметров твэлов различных реакторов в технологическом процессе их изготовления. Исследованы и проанализированы их преимущества и недостатки в

использовании различных первичных преобразователей измерительных каналов для автоматизированного контроля различных твэлов, а также критерии их выбора для высокопроизводительного контроля параметров твэлов с необходимой точностью измерения.

Особое внимание уделено в данном анализе вопросам комплексного использования различных типов специальных первичных преобразователей для контроля критических параметров твэлов и многоканальной структуры АКК для осуществления высокопроизводительного и компактного контроля критических параметров твэлов в технологическом процессе их производства.

В главе 3 рассмотрены принципы построения и разработки АКК критических параметров твэлов и ТВС, сформулированные на основе опыта внедрения специальных первичных преобразователей измерительных каналов, современных устройств микропроцессорной техники и различных алгоритмов их функционирования.

Важной информацией для обоснования основных принципов построения и разработки АКК параметров ядерного топлива являются требования, предъявляемые к контролю критических параметров твэлов и ТВС ядерных реакторов, которые изложены в технических условиях, для реактора ВВЭР-1000.

В главе 4 предложены и рассмотрены алгоритмы функционирования автоматизированных систем управления контролем параметров ядерного топлива, которые позволяют повысить эффективность сплошного контроля критических параметров твэлов и ТВС различных реакторов.

Предлагается алгоритм комплексного автоматизированного контроля дефектов внешнего вида наружной поверхности твэла ВВЭР-1000 с использованием специальных вихретоковых и оптикоэлектронных преобразователей измерительных каналов.

В главе 5 представлены элементы и устройства, определяющие структуру и конструкцию АКК критических параметров твэлов различных реакторов, внедрённых в технологический процесс их производства.

Дано описание конструкции и элементной базы автоматизированных комплексов, их технические данные, особенности алгоритмов их функционирования в составе технологических линий. Обсуждены вопросы метрологического обеспечения и поддержания метрологической исправности специальных первичных преобразователей в процессе эксплуатации.

На примере ряда некоторых АКК параметров твэлов показана эволюция развития алгоритмов функционирования и конструкции технических средств контроля данного критического параметра твэла в течение последних десятилетий. В заключении к главе рассмотрены дальнейшие перспективы развития и применения специализированных первичных преобразователей и алгоритмов их функционирования в АКК критических параметров твэлов различных реакторов.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейших исследований.

ГЛАВА 1

НАУЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЭЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕАКТОРОВ

1.1 Твэл как объект контроля

Ядерное топливо, которое помещается в активную зону реактора, представляет собой тепловыделяющую сборку (ТВС), состоящую из определенного количества твэлов в зависимости от типа и конструкции реактора. Конструкция ТВС и входящих в неё твэлов также индивидуальна для каждого типа реактора. Собственно ядерное топливо сосредоточено в твэлах в виде урановых таблеток или металлокерамического слоя, состоящего из двуокиси урана и алюминия. Конструкция твэла, прежде всего, должна обеспечивать герметичность и предохранять ядерное топливо от химического воздействия теплоносителя и препятствовать неконтролируемому уходу урана из объёма твэла наружу.

В этой связи очень важным является материал оболочки твэла. Он должен быть устойчив к коррозии и не терять свои прочностные качества при высоких температурах. Кроме того, он должен иметь малые сечения захвата нейтронов. Вышеперечисленным требованиям удовлетворяют сплавы циркония, алюминия, а также нержавеющая сталь. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и недостатки, например – нержавеющая сталь, выдерживает большие температуры, однако сильнее поглощает нейтроны, чем цирконий и алюминий.

В основном конструкция твэла имеет трубчатую конфигурацию. Сечение может быть круглым, квадратным или шестигранным. Рассмотрим вначале твэлы для энергетических реакторов. Для энергетических реакторов твэлы имеют круглую форму, хотя сама ТВС может быть квадратной или шестигранной. Для распространенных отечественных реакторов типа ВВЭР-1000 или ВВЭР-440 ТВС имеет шестигранную конфигурацию, а для зарубежных реакторов той же группы характерна квадратная форма.

В том и другом случае ТВЭЛ представляет собой циркониевую трубу, заполненную урановыми таблетками различного обогащения. На рисунке 1.1 представлен вид общий ТВС для реактора ВВЭР-1000 типа ТВС-2М.

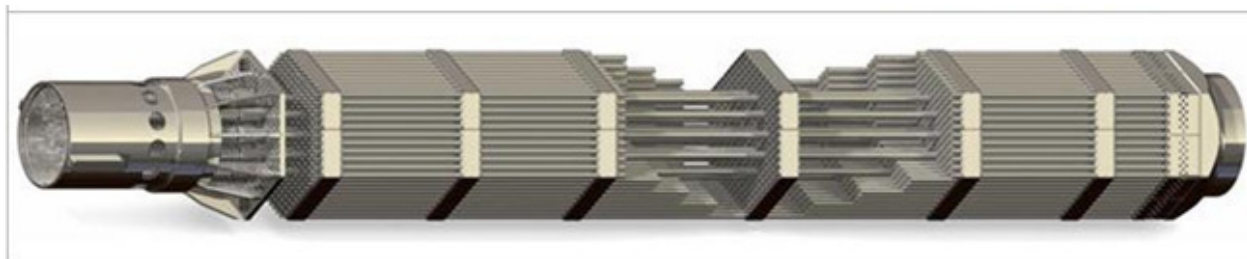


Рисунок 1.1 – Общий вид ТВС реактора ВВЭР-1000 типа ТВС-2М

Каркас ТВС ВВЭР-1000 состоит из центральной трубы, тринадцати или восемнадцати направляющих каналов и закрепленных на них дистанционирующих решеток, равномерно распределенных по высоте ТВС. Каждая решетка состоит из 312 или 317 ячеек в зависимости от типа ТВС. В настоящее время ТВС-2М является одной из самых современных разработок топливной сборки реактора ВВЭР-1000, внедренных в производство и эксплуатирующихся на АЭС. Кроме этой топливовыделяющей сборки, внедрены в эксплуатацию и другие конструкции ТВС, такие как ТВС-2, УТВС и другие. Технические требования к контролю критических параметров изложены в технических условиях на ТВЭЛ [6].

Анализ и тенденции развития ТВС для реактора ВВЭР-1000 в настоящее время приведён в работе [7]. На рисунке 1.2 приведён общий вид ТВЭЛА ВВЭР-1000 для реактора ТВС-2М. Основные различия в конструкции ТВЭЛов разных исполнений кассет для реактора ВВЭР-1000 связаны с различными параметрами используемых топливных таблеток (обогащение, конструкция, размеры, содержание «выгорающего» поглотителя), также может быть изменена длина ТВЭЛА, конструкции верхних и нижних заглушек и способы сварки их с оболочкой. Стоит отметить, что первые двадцать лет эксплуатировалась практически одна модификация ТВС ВВЭР-1000, и только за последние десять лет освоено не менее четырех новых конструкций.



Рисунок 1.2 – Общий вид твэла реактора ВВЭР-1000 типа ТВС-2М

Это связано с возрастающими требованиями ядерного рынка, прежде всего, с увеличением срока эксплуатации ТВС, что повышает экономическую эффективность использования топливной сборки. Не нужно забывать и о жестких требованиях к эксплуатационной надежности кассеты, её ремонтпригодности и эргономичности. Совместить эти требования в рамках одной конструкции задача очень сложная. В связи с этим проводится постоянная работа по улучшению технико-экономических и эксплуатационных показателей кассеты, что реализуется в различных типах топливной сборки ВВЭР-1000. Разрабатываются ТВС для реакторов и новых поколений, таких как ВВЭР-1200 и ВВЭР-1600, что в перспективе придут на смену ВВЭР-1000. В настоящее время базовым

энергетическим реактором, который эксплуатируется в России и строится у нас и в ряде стран дальнего зарубежья, является реактор ВВЭР-1000.

В последнее время в нашей стране ведутся работы по освоению промышленного производства топливной сборки для реактора PWR, который используется в ряде зарубежных реакторов, изготавливаемых фирмами Westinghouse, GE, Areva. Эта ТВС имеет квадратную форму и в связи с этим другой набор дистанционирующих решёток. Однако конструкция самого твэла незначительно отличается от твэла ВВЭР-1000. На рисунке 1.3 показан вид общий твэла для реактора PWR. Можно отметить практически одинаковую длину твэла и топливного столба твэлов для этих ТВС, очень близкие размеры диаметра труб (9,1 мм ВВЭР и 9,5 мм PWR). Это связано с тем, что основные базовые проекты этих реакторов были разработаны практически в одно время [8, 9].

Технические характеристики топливной сборки реактора фирмы Westinghouse AP1000 практически идентичны техническим данным топливной сборки реактора ВВЭР-1000 ТВС-2М. Имеется лишь разница в применяемых сплавах циркония, в профилировании обогащения топливных таблеток, конструкции дистанционирующих решёток и других комплектующих топливной сборки.

В нашей стране продолжается эксплуатация энергетических реакторов типа РБМК, несмотря на аварию, произошедшую на одном из блоков Чернобыльской АЭС, где был установлен такой реактор. РБМК (реактор большой мощности канальный) имеет одноконтурный принцип действия и меньшую эксплуатационную надёжность по своим конструкционным особенностям, в сравнении с реактором типа ВВЭР. В работе [10] приведён анализ конструкции и технических характеристик этого реактора. Эти реактора после выработки своего ресурса будут выведены из эксплуатации и их в скором времени сменят реактора типа ВВЭР. РБМК сейчас работают на Курской и Ленинградской АЭС.

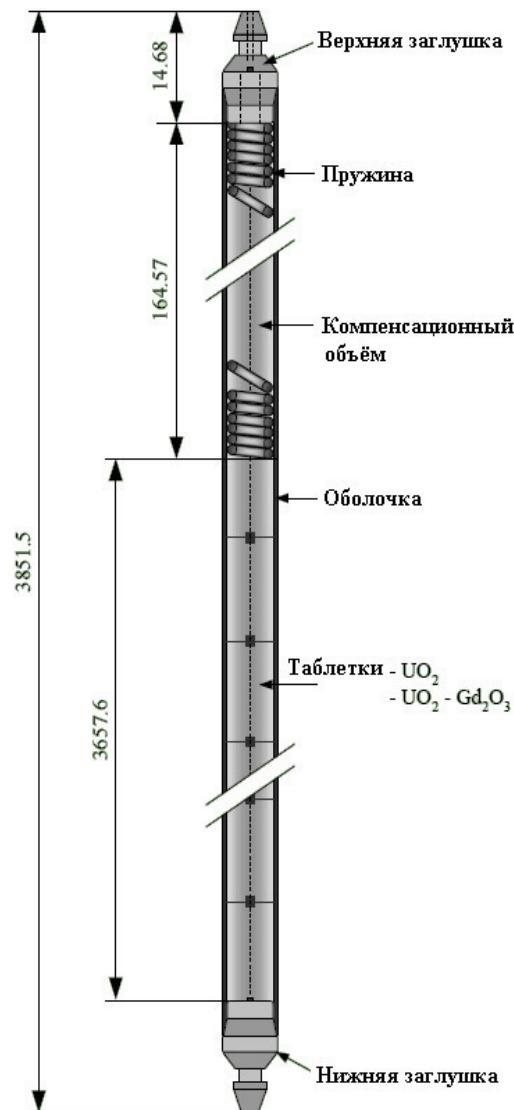


Рисунок 1.3 – Общий вид твэла реактора PWR

Конструкция твэла РБМК похожа на твэлы реакторов ВВЭР или PWR (рисунки – 1.2, 1.3), основное отличие состоит в том, что диаметр твэла значительно больше и составляет 13,6 мм. Длина твэла составляет 3644 мм, а длина топливного столба таблеток 3430 мм, что вполне сопоставимо с твэлами рассмотренных выше водородных реакторов.

Перейдём к рассмотрению конструкции твэлов для исследовательских и промышленных реакторов. Назначение этих реакторов заключается в получении мощных потоков нейтронов для научных исследований или для получения изотопов различных элементов, которые используются в промышленности или медицине. В связи с этим конструкции этих реакторов в зависимости от задачи могут сильно

отличаться друг от друга, что в первую очередь касается ТВС, соответственно относится и к твэлам. В России основным ведущим предприятием, которое проводит разработки исследовательских и промышленных реакторов, является научно-исследовательский конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала (НИКИЭТ). На протяжении нескольких десятков лет учёные и специалисты НИКИЭТа успешно реализовывали оригинальные проекты различных реакторов, которые работают и в настоящее время не только в нашей стране, но и в таких странах как Польша, Венгрия, Чехия, Казахстан, Узбекистан. Интерес к ядерным исследованиям в последнее время заметно вырос. После некоторого спада, связанного с Чернобыльской аварией, многие страны проявляют интерес к новым российским разработкам. В работе [11] проведен анализ работ института и рассмотрены перспективы их развития.

На ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» (ПАО «НЗХК»), который входит в топливную компанию ОАО «ТВЭЛ» освоен выпуск практически всех ТВС и твэлов для исследовательских и промышленных реакторов, разработанных в России. На приведённых ниже рисунках 1.4 – 1.6 показан общий вид ТВС и твэлов наиболее известных исследовательских реакторов ВВР-М2, ВВР-М5, ИРТ-3М.

Характерной особенностью этих ТВС является то, что в топливной сборке могут присутствовать твэлы различной конфигурации: квадратные, шестигранные, круглые. Число твэлов в ТВС может составлять от 4 до 8. Длина исследовательских твэлов значительно меньше, чем энергетических твэлов, и не превышает 1,5 метров. Конструкция твэла исследовательского реактора принципиально отличается от конструкции твэлов энергетических реакторов.

Как видно из приведённых выше рисунков, это трубчатый бесшовный твэл, топливный слой которого представляет урановую композицию, заключённую в алюминиевые оболочки. Технология изготовления такого твэла кардинально отличается от технологии изготовления твэлов энергетических реакторов.

Можно отметить два вида технологического процесса изготовления исследовательских твэлов. Это метод «горячего» совместного выдавливания (метод экструзии) и метод холодного волочения с высокотемпературным газовым

обжатию. Используется также и комбинация этих двух методов. Обогащение урана варьируется от 20% до 90%. В последние годы в связи с ужесточением требований МАГАТЭ по гарантиям качества необходимо снижать обогащение урана для исследовательских реакторов до 20%.

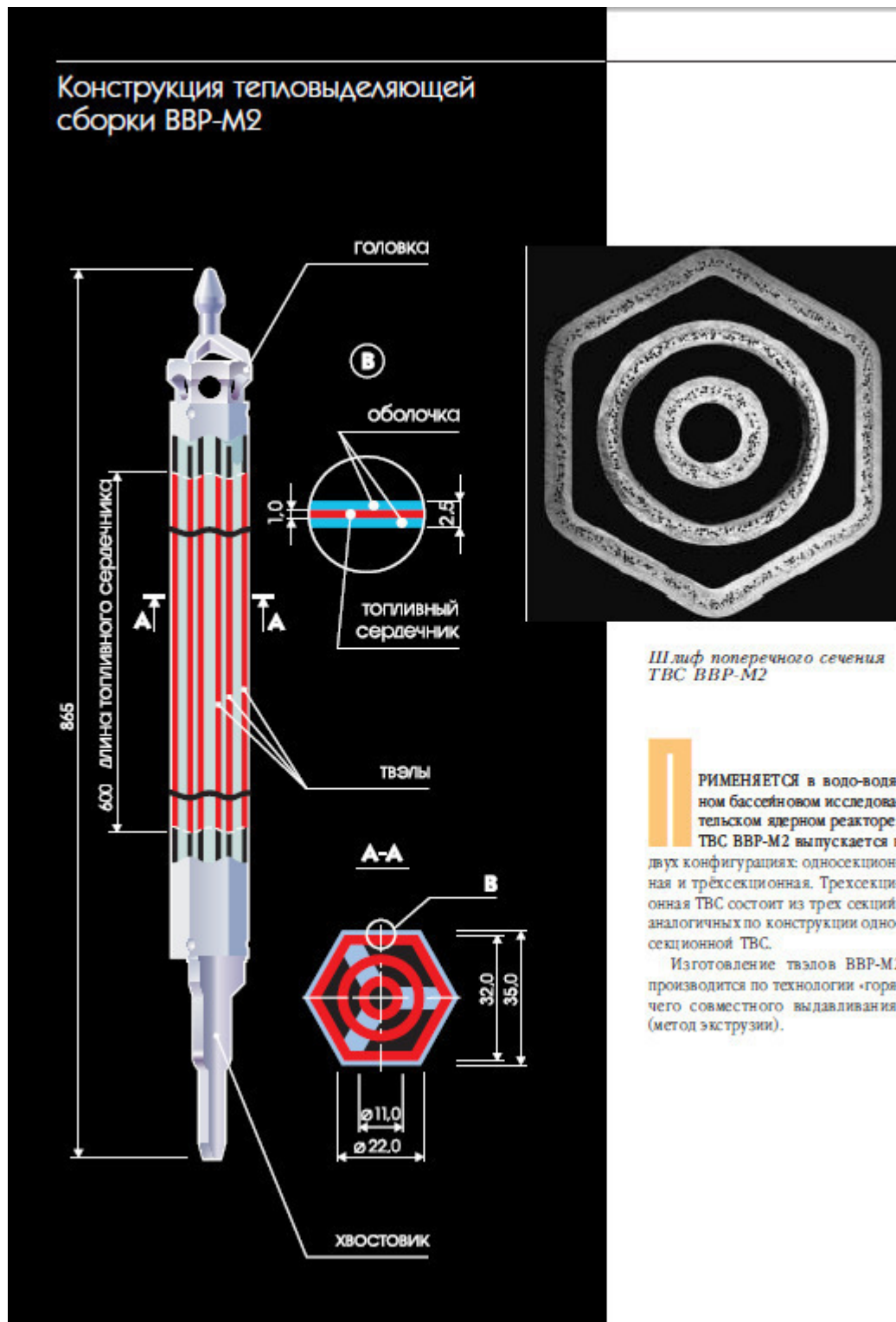


Рисунок 1.4 – Общий вид ТВС и твэла реактора ВВР-М2

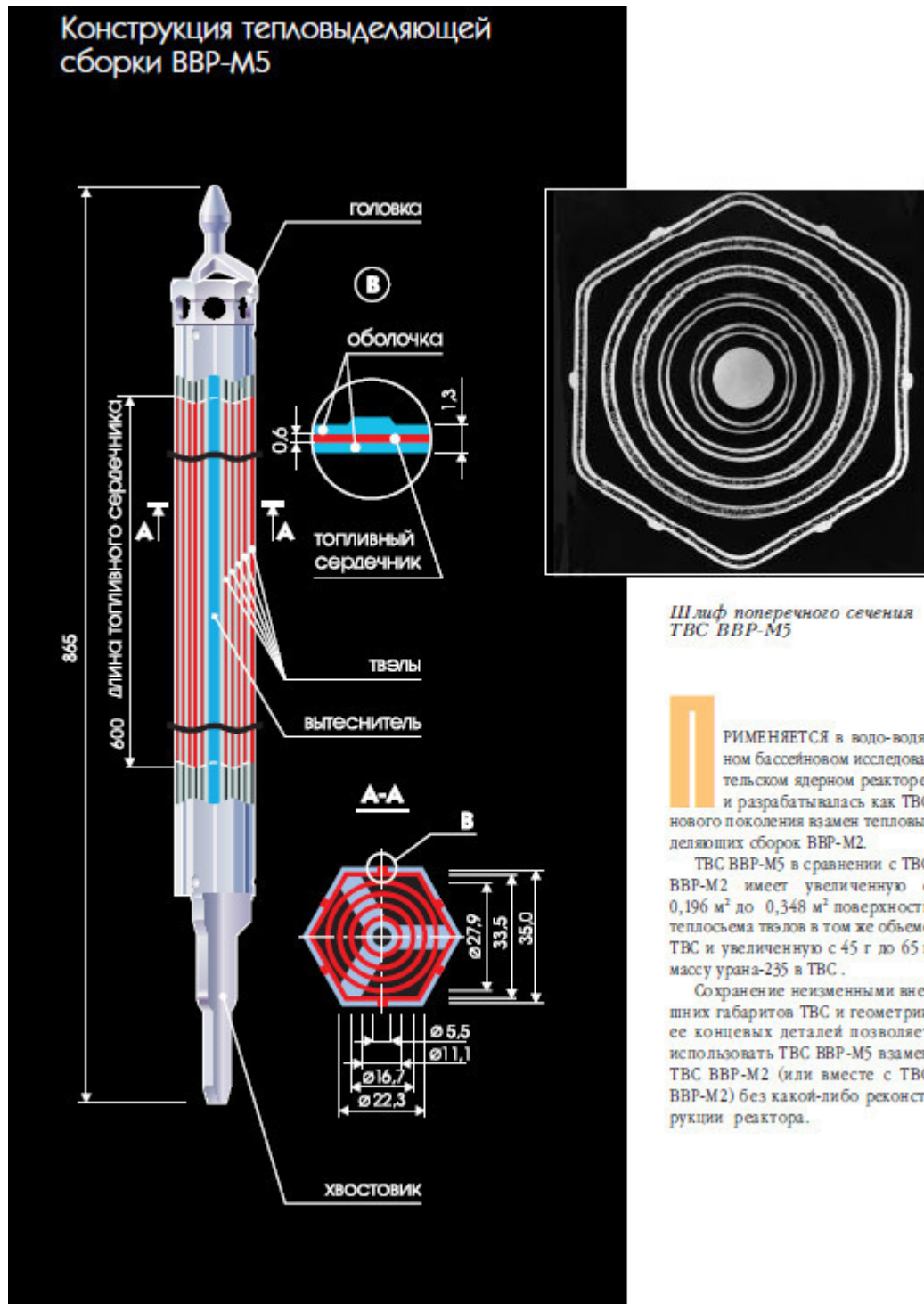


Рисунок 1.5 – Общий вид ТВС и твэла реактора ВВР-М5

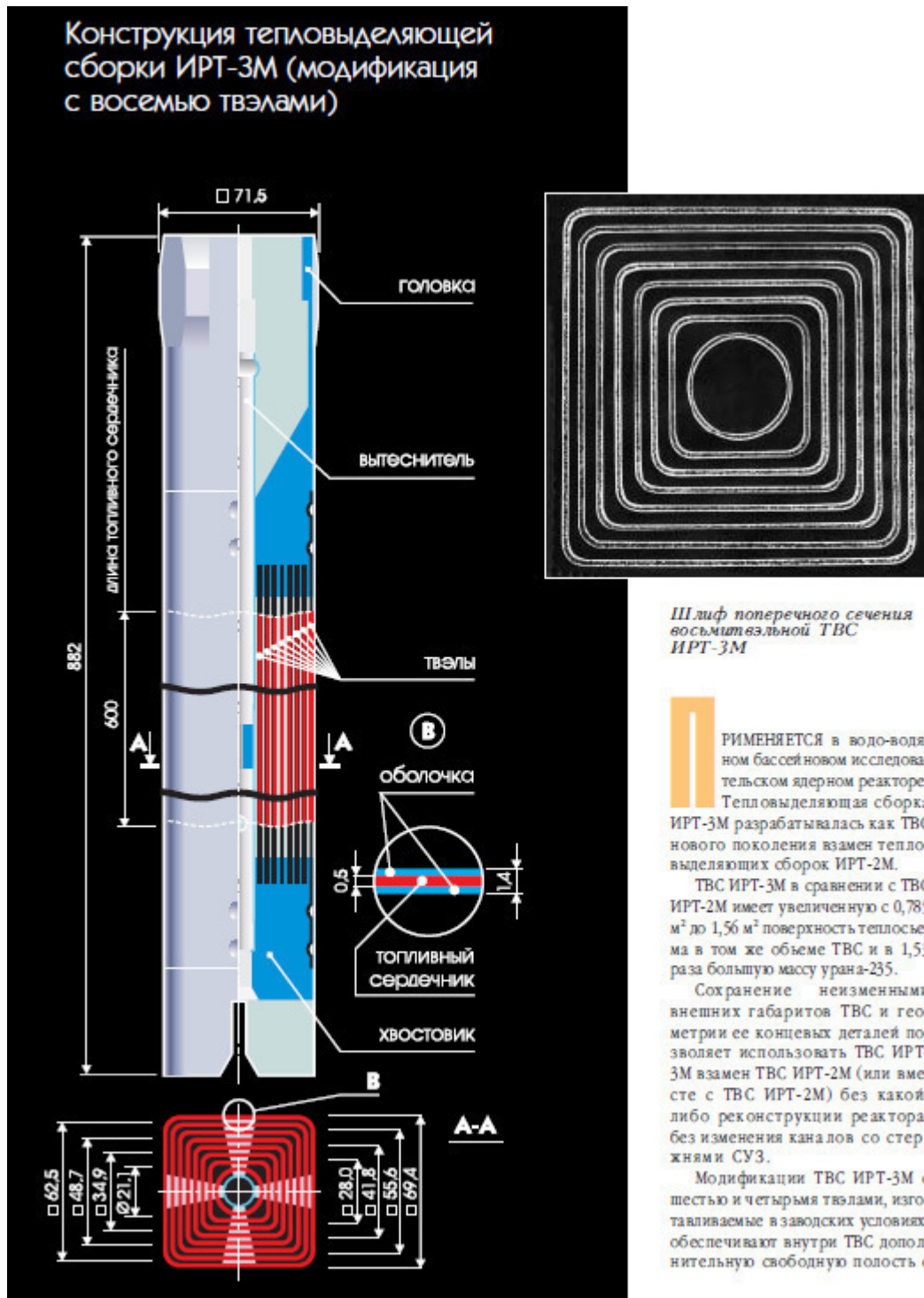


Рисунок 1.6 – Общий вид ТВС и ТВЭла реактора ИРТ-3М

Одна из актуальных задач сегодня состоит в переводе серийных ТВС исследовательских реакторов на ТВЭлы с 20% обогащением ураном-235. В связи с тем, что интерес к ядерным исследованиям в последние годы значительно вырос, то появилась возможность проведения работ по совершенствованию конструкций и технологии изготовления ТВЭлов и ТВС исследовательских реакторов.

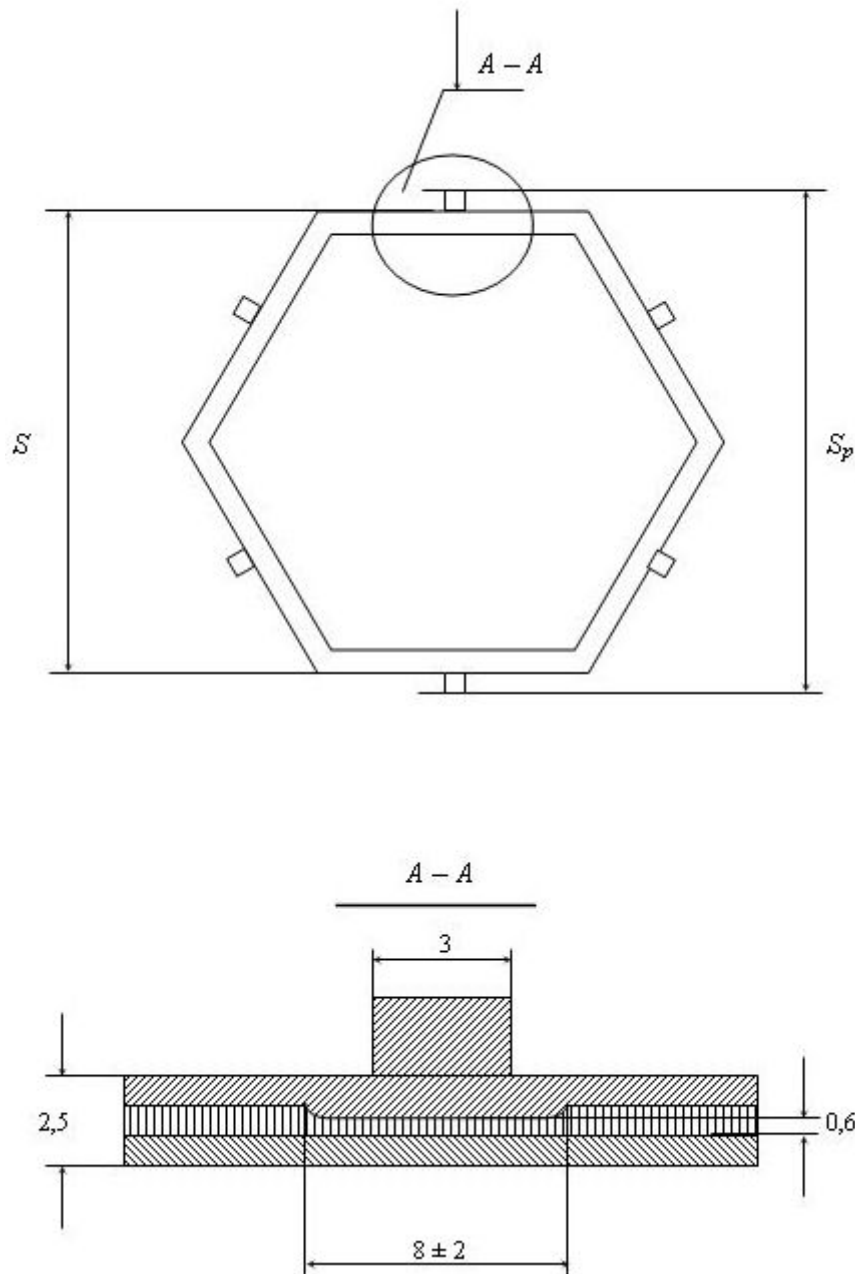


Рисунок 1.7 – Общий вид твэла промышленного реактора

Перейдём к рассмотрению твэла для промышленного реактора, конструкция которого очень похожа на некоторые типы твэлов для исследовательских реакторов. На рисунке 1.7 изображен общий вид такого твэла. ТВС состоит из четырёх твэлов, длина которых составляет 1010 мм, топливный слой не менее 890 мм. Размер под «ключ» S находится в пределах от 85,2 мм до 121,2 мм. Есть некоторые особенности в конструкции этих твэлов, например – «утонение» топливного слоя под ребром, сдвиг ребра у самого большого типоразмера относительно оси грани. Необходимо отметить,

что обогащение урана в этих твэлах составляет 90%. Загрузка урана может быть разной, «облегчённые» твэлы могут быть на 40% или 60% от номинальной загрузки. Это позволяет комбинировать распределением ТВС в активной зоне реактора, устанавливая «облегчённые» ТВС ближе к периферии активной зоны, учитывая неравномерность нейтронного потока в реакторе.

Мы рассмотрели основные типы твэлов энергетических, исследовательских и промышленных реакторов. Очевидно, что конструкция твэлов существенно отличается друг от друга. Отметим, что твэлы для исследовательских и промышленных реакторов имеют определённое сходство в своих конструктивных особенностях. В связи с этим очевидно, что технологический процесс изготовления твэлов и требования к контролируемым параметрам имеют отличие друг от друга.

Рассмотрение этого вопроса предстоит в следующем разделе.

1.2 Технологический процесс изготовления и контролируемые параметры твэлов для энергетических, исследовательских и промышленных реакторов

Технологический процесс изготовления промышленной продукции есть упорядоченная последовательность регулируемых и контролируемых операций, в результате выполнения которых происходит целенаправленное преобразование исходного материала в конечную продукцию таким безопасным и экономичным образом, чтобы она удовлетворяла заданным требованиям [12]. Есть и другие варианты определения технологического процесса, но приведённый выше довольно кратко и точно передаёт основную суть технологического процесса производства промышленной продукции. В любом случае можно рассматривать технологический процесс изготовления продукции как цепь параллельных и последовательных технологических операций. Рассматривать технологическую операцию только как физический процесс преобразования исходного материала в продукт (полупродукт) с заданными свойствами будет очень общим взглядом на технологический процесс. Контрольные и транспортные операции с материалом и продукцией можно считать

вспомогательными действиями, но они являются частью общего технологического процесса изготовления продукции.

Предметом нашего интереса являются контрольные операции в ходе выполнения технологического процесса продукции. Технологический процесс изготовления твэлов содержит большое количество контрольных операций самого изделия и его комплектующих, большая часть которых охватывает 100% всех твэлов. Это является сплошным выходным контролем продукции. Для осуществления такого контроля необходимо иметь высокопроизводительные и компактные АКК. Технические требования к контролю критических параметров сформулированы в техническом проекте или технических условиях на каждый тип твэла. Они учитывают уровень технических возможностей для реализации контроля конкретного критического параметра и особенности технологического процесса изготовления данного типа твэла.

В настоящий момент стоит остановиться на рассмотрении основных критических параметров ядерного топлива, которые подлежат сплошному контролю в ходе технологического процесса производства. Конструкция твэла определяет конструкцию всей тепловыделяющей сборки и её технико-экономические характеристики. Твэлы реакторов всех видов в большинстве своём имеют трубчатую конфигурацию. Разница состоит в том, что для энергетических реакторов – это циркониевая труба, наполненная урановыми таблетками различного обогащения, а для исследовательских и промышленных реакторов – это трехслойная труба, полученная путем совместного прессования уранового сердечника и алюминиевой матрицы, где ураносодержащий топливный слой окружен алюминиевыми герметизирующими слоями.

Контролируемые параметры конструкции твэлов для различных реакторов.

1. Твэлы энергетических реакторов типа ВВЭР, РБМК, PWR.

1.1 Геометрические размеры твэла:

- длина твэла, длина компенсационного объёма;
- диаметр твэла;

- прогиб твэла на длине 500 мм или 250 мм;
- несоосность верхней заглушки;
- длина топливного слоя;
- длина сжатой части пружинного фиксатора.

1.2 Сплошность топливного столба:

- размер единичного зазора между таблетками и величина суммарного зазора;
- наличие крошки в компенсационном объёме.

1.3 Качество сварных швов:

- длина зоны проплавления для контактно-стыковой сварки;
- непровар в корне шва для электронно-лучевой сварки;
- наличие пор в сварном шве.

1.4 Обогащение топливного столба ураном-235:

- средняя массовая доля урана-235 в топливном столбе;
- обнаружение нештатной таблетки;
- определение бланкетных зон топливного столба;
- определение зон различного обогащения.

1.5 Давление гелия в твэле:

- давление гелия внутри твэла.

1.6 Внешний вид наружной поверхности твэла:

- риски поперечные;
- риски продольные;
- вмятины.

1.7 Герметичность твэла:

- скорость натекания гелия.

2. Твэлы исследовательских и промышленных реакторов.

2.1 Толщина герметизирующих оболочек:

- толщина наружной оболочки;
- толщина внутренней оболочки.

2.2 Состояние топливного слоя:

- неравномерность поверхностной плотности топливного слоя;

- наличие участков скопления урана;
- длина топливного слоя.

Все вышеперечисленные параметры являются критическими с точки зрения эксплуатационной надёжности атомного реактора и его технико-экономических характеристик. В связи с этим, технические требования по вышеперечисленным параметрам указаны в соответствующих технических условиях и по ним регламентируется сплошной выходной контроль всех изготавливаемых ТВЭЛОВ.

За несколько десятилетий технологический процесс изготовления ТВЭЛОВ для энергетических, исследовательских и промышленных реакторов на ПАО «НЗХК» постоянно совершенствовался и технические требования по некоторым критическим параметрам ТВЭЛА ужесточались. Кроме того, велась постоянная работа по повышению производительности производства, что также усложняло задачи по созданию автоматизированных комплексов контроля ТВЭЛОВ. Рассмотрим технологические схемы изготовления ТВЭЛОВ энергетических, исследовательских и промышленных реакторов. На рисунке 1.8 представлена современная технологическая схема изготовления ТВЭЛА для реактора ВВЭР-1000. Данную технологическую схему можно охарактеризовать как сборочную схему изготовления, характерную для машиностроительной отрасли. Вначале на линию подготовки оболочки (ЛПО-90) поступают циркониевые трубы для обрезки в размер и приварки нижней заглушки. Затем происходит взвешивание оболочки и далее она поступает на установку снаряжения топливными таблетками нужного обогащения ураном-235. Перед снаряжением топливные таблетки проходят контроль внешнего вида, чтобы дефектные таблетки не попали на комплектование топливного столба ТВЭЛА. На установке снаряжения происходят формирование топливного столба ТВЭЛА из таблеток нужного обогащения и загрузка его в циркониевую оболочку, поступившую с линии ЛПО-90. Образовавшийся свободный объём называется компенсационным объёмом (рисунок 1.2) в него устанавливается пружинный фиксатор, который упирается в последнюю таблетку, либо в оболочку, заполняется гелием до нужного давления. Перед этим производится операция обеспыливания компенсационного объёма для устранения посторонних частиц, которые могут

попасть внутрь данного объёма, и взвешивание снаряженного твэла. Затем устанавливается верхняя заглушка и производится контактно-стыковая сварка (КСС) для герметизации твэла.

В ходе выполнения основных технологических операций производится ряд контрольных и измерительных операций, которые относятся к технологическому контролю, туда входит контроль чистоты и состава гелия аналитическим способом, входной контроль заглушек и оболочки. Отдельно производится металлографический контроль образца-свидетеля на качество контактно-стыковой сварки. Это происходит перед запуском каждой партии твэлов для установки режимов сварки. Сначала производится сварка определённого количества образцов, а затем они проходят металлографический контроль и в случае нормального результата контроля начинается процесс сварки твэлов. После выполнения сварки верхней заглушки твэлы поступают на линию выходного контроля.

Выходной контроль твэлов ВВЭР-1000 определяется требованиями технических условий к критическим параметрам твэла, поэтому он носит характер сплошного контроля. Для его осуществления необходимы автоматизированные комплексы контроля нужной производительности и точности измерений. Это специализированные средства измерения и контроля, прошедшие испытания, аттестацию и приёмку как единичные средства измерений. Они объединены в автоматизированную линию СТ-60 с помощью АСУКП твэлов. АСУКП твэлов состоит из механизмов загрузки, выгрузки твэлов, узла разбраковки, изолятора брака, считывающих устройств для расшифровки номера твэла и партии и соответствующих АКК твэлов. Данная линия осуществляет полный сплошной контроль всех параметров твэлов ВВЭР-1000 и является уникальным технологическим оборудованием. Некоторые АКК были разработаны специалистами ПАО «НЗХК», а ряд других АКК специалистами различных институтов и предприятий совместно со специалистами завода. Здесь нужно отметить, что каждый твэл имеет штрих-кодovou маркировку, нанесённую на верхнюю заглушку лазерной установкой. В состав АСУКП твэла входит считывающее устройство, которое идентифицирует каждый твэл, который

поступает на соответствующий АКК. За счет этого происходит автоматизированное формирование паспорта каждого твэла, прошедшего выходной контроль, организуется статистический учёт проконтролированной продукции. Процесс создания каждого АКК, которые указаны на рисунке 1.8, занимает полный цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР).

Почти все АКК прошли путь последовательных модернизаций для того, чтобы полностью удовлетворить все требования технических условий и производства твэлов ВВЭР-1000. Рассмотрим подробнее АКК, которые входят в технологическую схему изготовления твэлов ВВЭР-1000.

АКК контроля длины и сплошности топливного столба, компенсирующей части фиксатора и обогащения топливного столба типа МАКС представляет собой сложный комплекс технических средств, который позволяет контролировать состояние большого количества параметров топливного столба твэла. Автоматизированный комплекс состоит из двух основных измерительных позиций. Первая измерительная позиция осуществляет контроль сплошности столба, его длину и компенсирующую часть пружинного фиксатора. Она реализована на базе установки КСИГ, которая в своё время была разработана ВНИИРТом и прошла ряд усовершенствований в части оптимизации алгоритма управления процессом контроля и внедрения микропроцессорных устройств нового поколения для цифровой обработки сигналов и связи с промышленным компьютером, которые были реализованы специалистами центральной научно-исследовательской лаборатории автоматики (ЦНИЛА) ПАО «НЗХК». В основу работы этой установки положена гамма-абсорбционная методика измерения величины зазоров между топливными таблетками, сколов, длины самого топливного столба и определения компенсирующей части пружинного фиксатора [13 – 15]. Вторая измерительная позиция этого комплекса представляет собой пассивный гамма-сканер измерения обогащения топливного столба ураном-235 в различных зонах твэла. В основу работы этой позиции положена работа специальных первичных преобразователей и измерительных устройств в режиме спектрометрического измерения собственного гамма-излучения урана-235, основную линию которого представляют собой кванты

с энергией 185,7 кэВ [16]. Данная измерительная позиция представляет собой двадцатичетырехканальный гамма-спектрометр со специализированным программным обеспечением.

Следующий измерительный пост — это АКК контроля герметичности твэла. Для диагностики трещин, которые могут возникнуть в зонах сварных швов и оболочке твэла, проводятся измерения скорости натекания гелия. Особенность работы данного АКК состоит в том, что твэл не подвергается нагреванию, а измерения проводятся в динамическом режиме. Для этого применена оригинальная конструкция измерительной камеры, которая была разработана специалистами Электростальского машиностроительного завода (ОАО «МСЗ»). В качестве гелиевых течеискателей применяются течеискатели «AUTOTEST» фирмы VARIAN.

АКК качества сварных швов представляет собой автоматизированную установку ультразвукового контроля типа АКС, которая была разработана ЦНИЛА ОАО «НЗХК» [17]. В основу конструкции установки заложена теневая методика ультразвуковой дефектоскопии, которая широко применяется для контроля сварных соединений различных изделий [18]. В данной технологической схеме применяется установка для контроля контактно-стыковой сварки (КСС) заглушки, но имеется и вариант установки АКС, которая используется для контроля электронно-лучевой сварки (ЭЛС) заглушки. В этой модификации установки АКС реализована эхо-импульсная методика контроля сварных швов. После контроля сварных швов твэл поступает на позицию контроля геометрических размеров.

Автоматизированный контроль геометрических размеров твэла является комплексным, т.к. измеряется сразу несколько важных критических параметров геометрии твэла. Прежде всего, это диаметр твэла, затем его длина, прогиб на длине 250мм и несоосность заглушки с оболочкой. Данный контроль осуществляется АКК типа «РАЗМЕР». В составе АКК «РАЗМЕР» имеется несколько блоков специализированных оптикоэлектронных прецизионных преобразователей и фоточувствительных матриц, которые обеспечивают бесконтактный процесс контроля геометрических параметров твэла.[19]. Преимущество данного контроля в сравнении с ранее применяемой контактным контролем с помощью щупов и

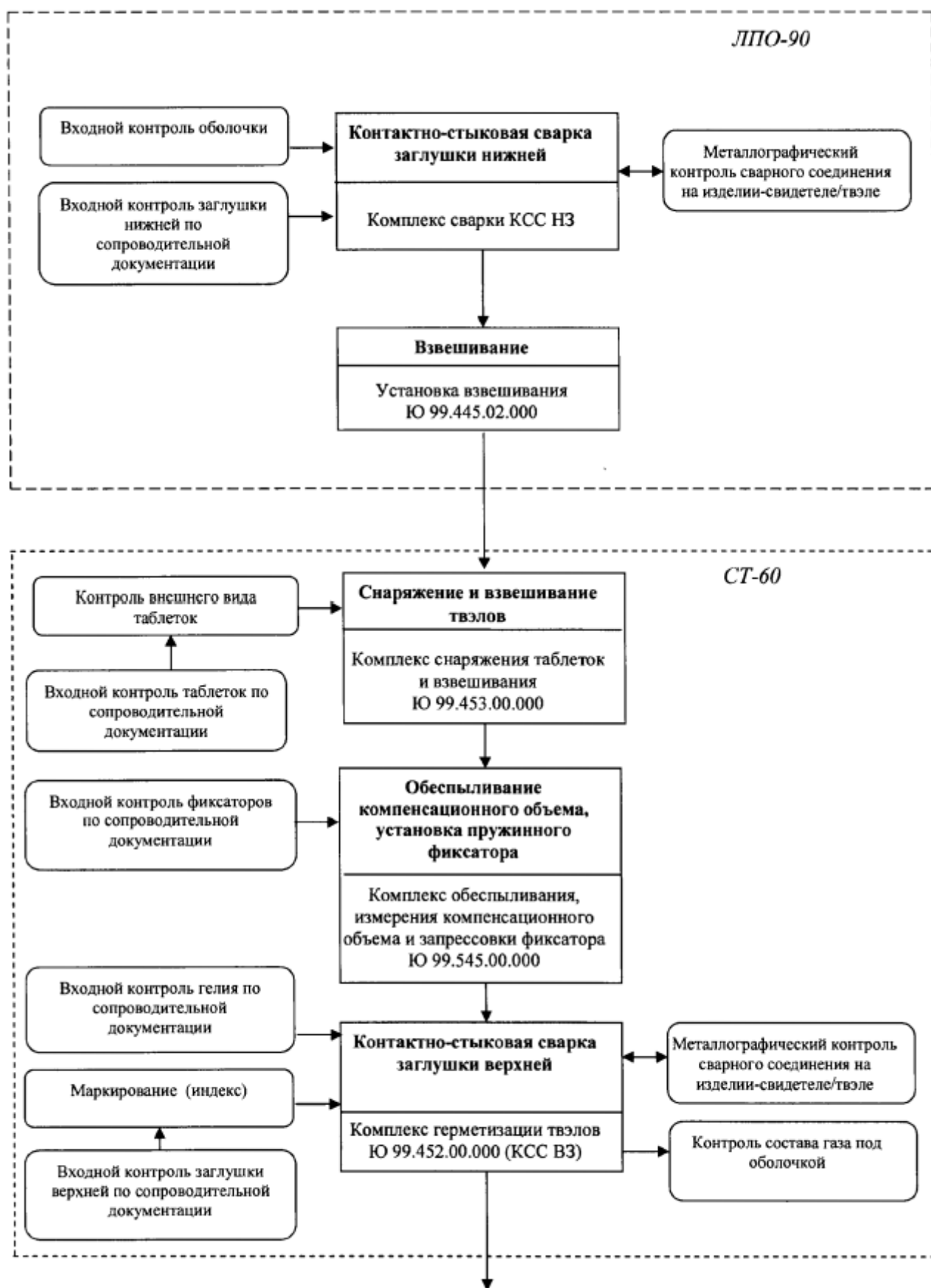
концевых мер очевидно. Во-первых, при применении контактного измерения геометрических размеров твэла на высокой скорости сканирования твэла (4-6) м/мин. можно нанести механические дефекты внешней поверхности твэла. Во-вторых, все результаты линейных измерений геометрических размеров имеют действительные размеры. Контроль прогиба твэла ранее можно было проводить на отдельном столе с помощью концевых мер, а контроль несоосности можно было осуществить только выборочно. Таким образом, использование АКК «РАЗМЕР» даёт возможность сплошного высокопроизводительного контроля геометрических параметров твэла.

Следующая позиция контроля представляет собой АКК давления гелия в твэле. Это может быть либо установка термоиндукционного контроля ДГТ разработки ВНИИТФА, либо установка ультразвукового резонансного контроля УЗКД разработки МИФИ [20]. Эти установки имеют сравнимые метрологические характеристики по измерению давления гелия в компенсационном объёме твэла. Опыт эксплуатации установки ДГТ для контроля твэлов ВВЭР-1000 значительно больше, чем у установки типа УЗКД. В последнее время предпочтение стало отдаваться установкам типа УЗКД.

Причина этого состоит в том, что поддержание метрологической исправности установки ДГТ более трудоёмка, ввиду большего количества факторов, влияющих на работоспособность термоиндукционного контроля давления гелия в твэле в промышленных условиях производства. Существенным влиянием на результаты измерений давления термоиндукционной установки обладают следующие факторы: флуктуации температуры окружающей среды в рабочей зоне измерительного блока, разностенность оболочки твэла, нестабильность нагрева оболочки индуктором. Кроме того, блок первичных преобразователей ДГТ жёстко привязан к конкретному диаметру контролируемого твэла. Блок первичных преобразователей УЗКД более универсален к типоразмерам твэла и свободен от вышеуказанных мешающих факторов, присущих к термоиндукционному измерению давления. Техническими условиями [6] разрешено применение как установки ДГТ, так и УЗКД в технологическом процессе производства твэлов типа ВВЭР.

Последней позицией автоматизированного контроля линии СТ-60 является АКК внешнего вида наружной поверхности оболочки твэла. АКК внешнего вида наружной поверхности оболочки твэла представляет собой комбинацию позиции вихретокового контроля механических дефектов наружной поверхности оболочки твэла типа «ВИТОК» и позиции оптикоэлектронного измерителя типа «ПРОФИЛЬ» для измерения размеров обнаруженных дефектов внешнего вида твэла. Он позволяет выявлять поперечные, продольные риски и вмятины предельных размеров, допускаемых техническими условиями. Контрольная позиция комплекса «ВИТОК» фиксирует координаты дефектов с недопустимыми размерами и производит своего рода разметку поверхности оболочки твэла на участки с недопустимыми механическими дефектами. После этого твэл поступает на позицию оптикоэлектронного измерителя «ПРОФИЛЬ», где производится измерение величины размеров обнаруженных дефектов и по результатам этого контроля принимается окончательное решение о годности данного изделия [21]. Комплекс «ПРОФИЛЬ» располагается вне линии СТ-60, поэтому твэлы, которые предварительно были отобраны на вихретоковом комплексе, поступают на позицию оптикоэлектронного контроля отдельным транспортом.

Ранее контроль внешнего вида твэла ВВЭР-1000 проводили с помощью ручного визуального контроля на операционном столе групповым методом. Подтверждение окончательной дефектности проводилось с помощью лаборантов ЦЗЛ, которые применяли для этой цели методику контроля глубины дефекта с применением слепков профиля дефекта с последующим его измерением. Данные операции чрезвычайно трудоёмки, а результат контроля во многом зависит от субъективного фактора. На этом можно завершить краткое рассмотрение технологической линии СТ-60, которая реализует выходной контроль твэлов ВВЭР-1000, в соответствии с технологической схемой на рисунке 1.8. Управление линии СТ-60 осуществляется с помощью средств АСУКП и АСУТП, имеющей центральный сервер управления.



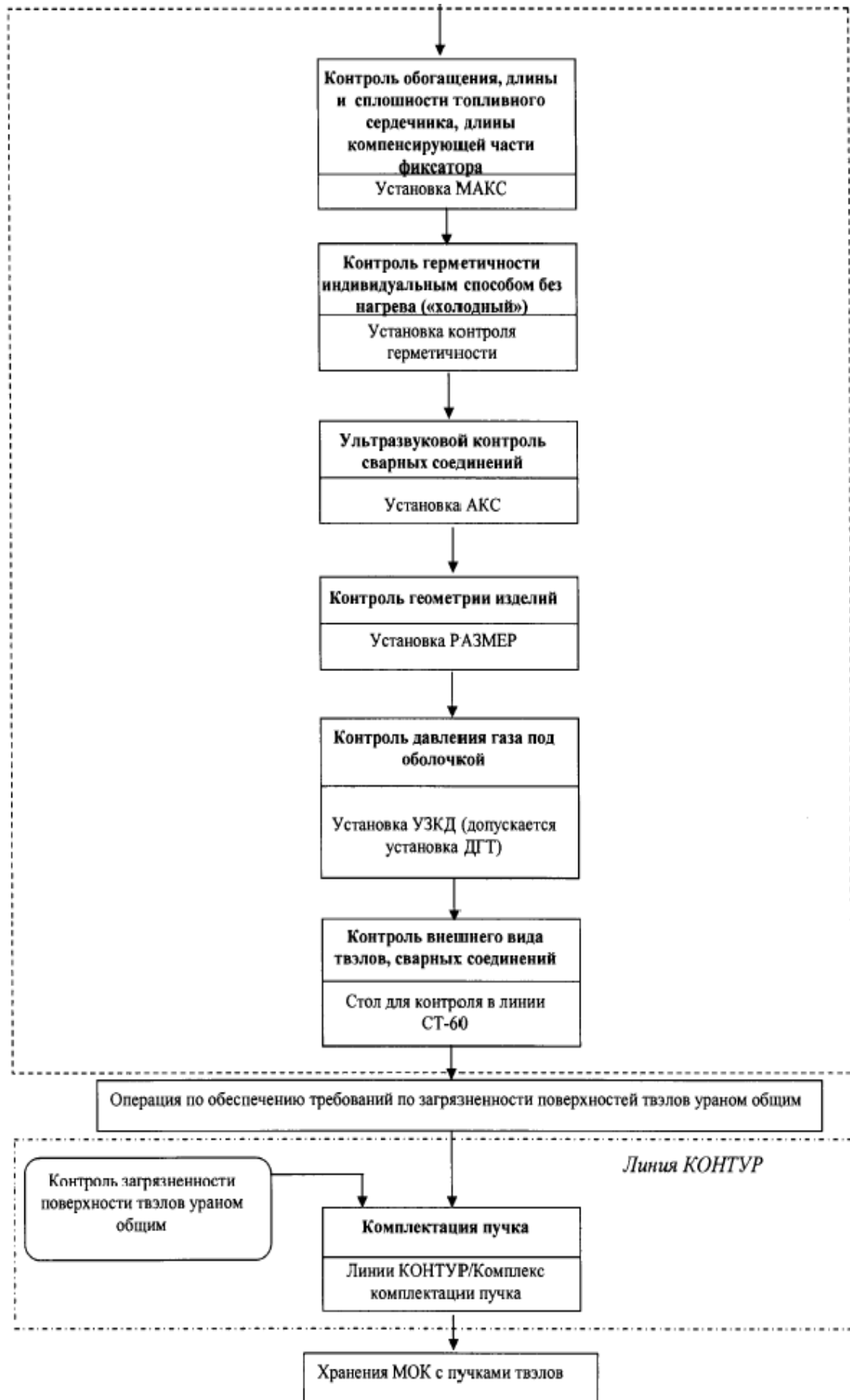


Рисунок 1.8 – Технологическая схема изготовления твэлов ВВЭР-1000

Перейдём к рассмотрению технологической схемы изготовления твэлов для исследовательского или промышленного реактора. На рисунке 1.9 изображена комбинированная технологическая схема изготовления твэлов для промышленного или исследовательского реактора. Основная цель этого технологического процесса – изготовление трубчатого бесшовного твэла, топливный слой которого представляет металлокерамическую урановую композицию, заключённую в алюминиевые оболочки. Вначале проводится операция смешивания порошков двуокиси урана и алюминия. Эта операция проводится в специальных смесителях, сложность этого процесса состоит в том, что за счёт большой разницы в удельном весе урана и алюминия смешение может быть неравномерным. Для избежания большой неравномерности урана в получаемой шихте применяются специальные пластификаторы, улучшающие сцепление частиц двуокиси урана и алюминиевого порошка.

Следующим этапом является получение металлокерамической шашки с помощью холодного прессования, затем полученные сердечники помещаются в печь для отгазовки и спекания. После этого проводится горячая калибровка с дальнейшей токарной обработкой для получения необходимых геометрических размеров сердечника. Затем урановый сердечник помещается в алюминиевый стакан, специально изготовленный под этот типоразмер сердечника. После сборки полученная композиция идёт на горячее совместное прессование за счёт чего получается трехслойная труба, необходимого размера. В дальнейшем трехслойная труба обрезается в нужный размер и заваривается электроннолучевой сваркой.

На этом технологический процесс изготовления твэла не заканчивается. Далее твэл проходит сплошной контроль ряда критических параметров, которые существенным образом влияют на его надежность во время эксплуатации в реакторе всей топливной сборки. К таким параметрам можно отнести толщину внутренней и наружной оболочек, неравномерность распределения урана в топливном слое твэла, наличие локальных скоплений урана в топливном слое и «холостых» концах твэла. Для сплошного контроля этих критических параметров успешно работают АКК, которые были разработаны и внедрены специалистами отраслевой лаборатории

автоматики ПАО «НЗХК» в разные годы. В первую очередь необходимо отметить многоканальный автоматизированный комплекс типа МПК для контроля ТВЭлов промышленного реактора (рисунок 1.7).

Этот автоматизированный комплекс представляет собой сложную радиометрическую систему, состоящую из девяти измерительных каналов, способную одновременно вести контроль внутренней и наружной алюминиевой оболочек и поверхностной плотности топливного слоя ТВЭла. Для измерения толщины алюминиевых слоёв используется методика на основе обратного рассеяния (альбеда) электронного потока и его последующего ослабления слоями оболочки ТВЭла, а для измерения поверхностной плотности топливного слоя применяется абсорбционная методика избирательного поглощения топливным слоём потока квантов гамма-излучения [22 – 24]. Для автоматического контроля разных типоразмеров ТВЭлов без дополнительной подстройки и регулировки разработаны: оригинальный механизм сканирования ТВЭла, который содержит блок специальных первичных преобразователей [25], и алгоритм функционирования активного контроля толщин оболочек, который повышает оперативность проведения контроля ТВЭлов [26].

Для ТВЭлов исследовательских реакторов, у которых очень широкий спектр типоразмеров ТВЭлов различной формы, применяются одноканальные установки контроля каждого параметра. Особенно сложной задачей является контроль толщины внутренней оболочки для ТВЭлов малого диаметра (менее 10 мм). Для реализации этой задачи был применён оригинальный первичный преобразователь на базе малогабаритного источника электронов и органического сцинтиллятора, соединённого с измерительным блоком с помощью волоконнооптического кабеля [27]. Кроме этого, необходимо отметить некоторые другие АКК, которые применяются в технологическом процессе производства ТВЭлов исследовательских и промышленных реакторов. К ним относятся: рентгеновский цифровой интроскоп типа РЦИ и робототехнологический комплекс разметки под обрезку типа РТК.

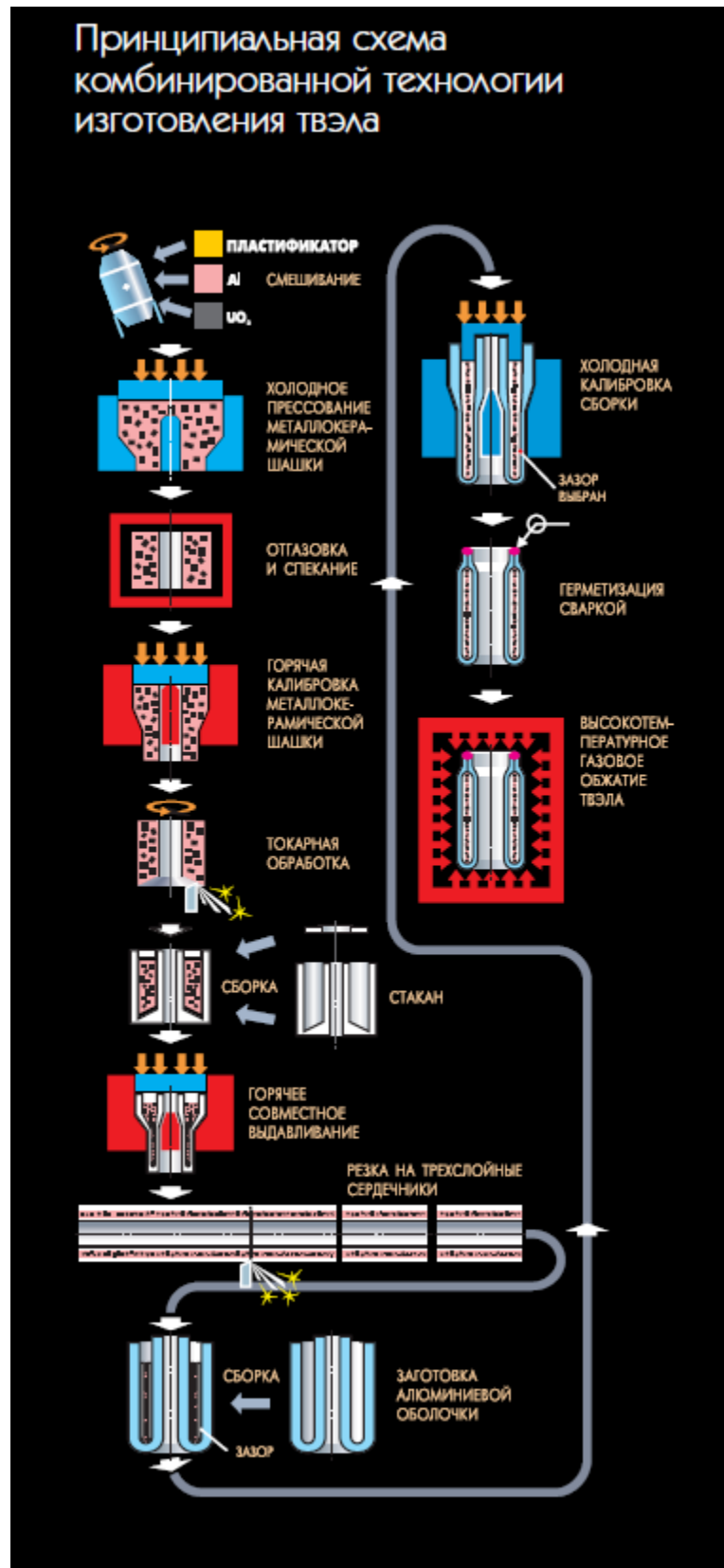


Рисунок 1.9 – Технологическая схема изготовления ТВЭЛов
промышленных и исследовательских реакторов

Оба автоматизированных комплекса основаны на избирательном поглощении рентгеновского излучения топливным слоем твэла. Ранее вместо РЦИ использовалась рентгеновская плёнка, что было связано с большими затратами на материалы и время для обработки информации результатов контроля. Использование сцинтилляционных детекторов и цифровой обработки радиометрического сигнала позволило полностью автоматизировать процесс сбора и обработки информации о качестве топливного слоя, устранить субъективный фактор в оценке дефектов топливного слоя. Комплекс РЦИ успешно эксплуатируется в промышленных условиях и прошёл ряд модернизаций. Комплекс РТК необходим для измерения длины топливного слоя трехслойной трубы после совместного прессования, чтобы оптимально выбрать место для обрезки трубы. Для этого труба просвечивается рентгеновским излучением и определяется начало и конец топливного слоя, затем выбирается нужный размер холостого алюминиевого конца с учётом «размазанности» топливного слоя и производится разметка трубы под обрезку. Информация о контроле выводится на экран радиационного электроннооптического преобразователя (РЭОП) и оценивается оператором-разметчиком. Подача твэлов на разметку и выгрузка их после разметки проводится с помощью робота-манипулятора по командам оператора. Этот комплекс позволил существенно сократить время на операцию разметки. Таким образом, мы рассмотрели технологические схемы изготовления твэлов ряда исследовательских, промышленных и энергетических реакторов и отметили АКК, которые обеспечивают сплошной выходной контроль качества изготовления твэлов на соответствие требованиям ТУ.

Организация выходного контроля твэлов имеет некоторые отличия в зависимости от особенностей технологического процесса их изготовления. Для твэлов энергетических реакторов технологический процесс – это дискретный процесс сборочного производства, весьма близкий к машиностроительной отрасли, когда комплектующие детали (трубы, таблетки, концевые заглушки) поступают на сборку одновременно. Поэтому сборочная линия включает в себя и линию выходного контроля критических параметров твэла, получаемых при его сборке (рисунок 1.8).

Таким образом, весь выходной контроль сконцентрирован в одном месте и все АКК объединены в АСУКП единым транспортом и информационным управлением.

Если принять во внимание, что все твэлы маркируются лазерным устройством, а перед каждым АКК установлено считывающее устройство, то все АКК объединены в общую АСУКП твэлов, которая в результате контроля выдаёт единый паспорт твэла с привязкой к конкретной партии. В дальнейшем система позволяет вести статистический учёт данных контроля твэлов и проводить анализ состояния технологического процесса изготовления.

Для твэлов исследовательских и промышленных реакторов технологический процесс производства – это непрерывный процесс близкий к металлургическому производству. Выходной контроль критических параметров твэлов производится после получения трехслойного изделия, и контрольные операции могут проводиться в разных местах. Это связано с большой номенклатурой твэлов исследовательских и промышленных реакторов и малым объёмом выпуска в сравнении с твэлами энергетических реакторов. Создание единой линии выходного контроля в этом случае экономически нерентабельно и технически очень сложно. Твэлы малыми партиями поступают на участки контроля и иногда ожидают своей очереди в связи с тем, что необходимо некоторое время для перестройки автоматизированного комплекса на этот тип твэла. Критическими параметрами конструкции твэла являются такие характеристики, состояние которых может вывести за предельные значения эксплуатационные параметры ядерной установки. Требования к обеспечению безопасности ядерного реактора изложены в работе [28]. Перечень критических параметров твэлов был рассмотрен в начале данного раздела. Необходимо отметить, что представленный перечень критических параметров твэлов различного назначения весьма разнообразен и сложен для сплошного контроля с учётом необходимой производительности и достоверности результатов измерений. Очевидно, что необходим комплекс технических средств, состоящий из различных специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования для успешной реализации промышленного сплошного контроля данного перечня критических параметров твэлов различных реакторов.

В работах [29, 30] рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и внедрением в технологический процесс производства ядерного топлива различных специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования, используемых в АКК параметров ТВЭЛОВ.

1.3 Проблемы реализации сплошного контроля критических параметров ТВЭЛОВ

По результатам проведенного анализа в предыдущем разделе можно сделать вывод о том, что реализация сплошного контроля критических параметров ТВЭЛОВ возможна только с помощью АКК.

Рассмотрим основные проблемы создания АКК для ТВЭЛОВ различных реакторов. Анализ конструкции ТВЭЛОВ и технологии их изготовления показывает, что для ТВЭЛОВ энергетических реакторов необходима группа АКК, которую будет сложно использовать для контроля ТВЭЛОВ исследовательских и промышленных реакторов. Группу АКК для ТВЭЛОВ исследовательских и промышленных реакторов можно разработать универсальной с точки зрения применяемых методик измерения критических параметров, но технически объединить контроль широкой номенклатуры ТВЭЛОВ в единой АСУКП ТВЭЛОВ чрезвычайно трудно.

Следует отметить три основных вида научно-технических проблем, влияющих на разработку и создание комплексов АКК ТВЭЛОВ различного назначения: методические, системотехнические, метрологические.

Методические проблемы создания единого комплекса сплошного контроля критических параметров ТВЭЛОВ различных реакторов относятся к научным проблемам и заключаются в том, что необходимо исследовать большую группу методик контроля с целью определения их возможностей для реализации технических требований контроля всех критических параметров ТВЭЛОВ.

Ни одна из известных групп методик контроля не обладает универсальными возможностями для реализации контроля всего перечня критических параметров ТВЭЛОВ. Можно отметить следующие группы методик контроля, которые могут быть использованы для реализации сплошного контроля критических параметров ТВЭЛА:

- радиационные методики с применением различных источников излучения, а также с использованием собственного излучения урана;
- ультразвуковые методики с использованием широкого диапазона частот зондирующего сигнала и различного расположения первичных преобразователей;
- оптические методики технического зрения с использованием различных облучателей и приёмных матриц;
- электромагнитные методики с использованием проходных или накладных первичных преобразователей;
- методики течеискания;
- тепловые методики.

Большое распространение получили радиационные и ультразвуковые методики контроля различных критических параметров твэлов, особо можно отметить методики, связанные с измерением потоков собственного излучения урана для контроля обогащения и массы делящегося вещества в твэле [31, 32]. В обзоре [33] дан анализ применения различных методик контроля в зарубежных фирмах по производству ядерного топлива. Первоначально широкое применение радиационных и ультразвуковых методик для контроля различных параметров твэлов можно объяснить развитой номенклатурой серийно выпускаемых первичных преобразователей для измерения потоков излучений и необходимой регистрирующей аппаратурой. В связи с этим контрольно-измерительный процесс с помощью данных методик можно легко автоматизировать, что в первую очередь важно для реализации сплошного контроля. Но в целом ряде случаев возникает необходимость разработки конструкции специальных первичных преобразователей. В связи с бурным развитием технических и программных средств вычислительной техники наступил период цифровых измерительных технологий, и стало возможным применение оптикоэлектронных методик для измерения критических параметров твэлов, прежде всего для измерения различных геометрических параметров твэла и ТВС. В работах [34-37] обсуждены возможные направления применения оптических методик с использованием современных фоточувствительных матриц, дифракционных элементов и лазерной техники для измерения геометрических

параметров твэлов и ТВС. Интересно применение термоиндукционного метода контроля величины давления гелия внутри компенсационного объема твэлов для реакторов типа ВВЭР и PWR [38 – 41]. Весьма перспективным является применение электромагнитных методов для контроля таких критических параметров твэла, как содержание оксида гадолиния в урановых таблетках в снаряженном твэле [42 – 45] и величины механических дефектов наружной оболочки твэла [46, 47].

Для исследования данных методик применительно к их использованию для сплошного контроля твэлов различных реакторов необходимо иметь в наличии коллектив специалистов по различным видам контроля, который способен проводить эти работы на высоком научно-техническом уровне. Данный коллектив должен располагать необходимым оборудованием, опытом и научными руководителями по соответствующему направлению. Такая организация работ соответствует уровню специализированных отраслевых институтов.

В настоящей ситуации предприятия-производители твэлов сами проводят организацию исследований, разработки и изготовления АКК твэлов, используя имеющихся в их распоряжении специалистов. Очень часто основные исследования приходится проводить в заводских условиях ввиду невозможности предоставить штатные твэлы в распоряжение предприятия-изготовителя АКК

Системотехнические проблемы возникают, как правило, на стадии опытно-конструкторской разработки АКК. Одной из самых сложных проблем является разработка конструкции специализированных первичных преобразователей измерительного блока АКК, способных производить контроль твэлов разных типоразмеров, отличающихся формой и геометрическими параметрами. Далее возникает проблема обеспечения нужной производительности контроля при требуемой точности измерения контролируемого параметра. С этой целью должна быть разработана необходимая структура технических средств и алгоритмы функционирования АКК. При создании поточной линии сплошного контроля твэлов необходимо, чтобы все АКК, входящие в линию выходного контроля твэлов (рисунок 1.8), обеспечивали нужную производительность контроля.

Учитывая разные возможности применяемых методик контроля, для достижения нужной производительности можно использовать многоканальную структуру АКК, либо применять сложные алгоритмы сбора, обработки информации, поступающей с измерительных каналов, и управления процессом контроля. Это может привести к существенному усложнению всей конструкции разрабатываемого АКК. Для создания паспорта выходного контроля каждого твэла необходимо обеспечить его идентификацию в процессе контроля на любом АКК. Данная проблема может решаться двумя путями.

Первый путь, когда АКК функционирует как автономный пост контроля, тогда номер на изделие может наноситься арабскими символами и считываться визуально оператором для внесения базу данных с терминала. Второй путь реализуется в случае, если несколько АКК образуют единую линию выходного контроля, тогда на изделие наносится штрих-код и перед каждым АКК устанавливается сканер для считывания этого штрих-кода. Это достаточно сложная техническая задача, для решения которой необходимы существенные затраты на программное и техническое обеспечение работ, но без её решения функционирование линии выходного контроля в автоматизированном режиме невозможно. Главная сложность в нанесении штрих-кода на поверхность твэла заключается в том, чтобы он надёжно считывался сканером, и при этом воздействие на наружную поверхность твэла при его нанесении была минимальной. Наиболее подходящим способом нанесения штрих-кода на поверхность твэла оказался способ нанесения лазерной маркировки.

Следующей сложной задачей при реализации сплошного контроля твэлов является необходимость выполнения повторного контроля твэла, забракованного по одному из контролируемых параметров. При поточном контроле твэлов для каждого АКК должен быть предусмотрен накопитель (изолятор) брака. После прохождения контроля всей партии твэлов, из данного накопителя может быть осуществлен повторный контроль предварительно отбракованных твэлов по специальной процедуре. В начале этой процедуры обязательно проводится калибровка измерительных каналов АКК для подтверждения их метрологической исправности, и после получения положительных результатов калибровки можно проводить

повторный контроль твэлов, результат которого считается окончательным. Если по технологии изготовления номинальный размер или значение контролируемого параметра оказываются близкими к браковочному пределу, то высока вероятность предварительной отбраковки твэла по этому параметру. В данном случае лучшим способом избежать неоправданного риска является обеспечение технологического запаса по величине этого параметра с учётом погрешности его измерения, в противном случае иногда возможно разработать алгоритм функционирования активного контроля этого параметра для снижения издержек от процедур повторного контроля.

Перейдём к рассмотрению проблем, связанных с метрологическим обеспечением создания комплексов АКК твэлов. Основные руководящие нормативные документы в области метрологического обеспечения АКК твэлов различных реакторов можно разделить на государственные и отраслевые стандарты.

Для АКК твэлов промышленных и исследовательских реакторов, которые изготавливаются в рамках государственного заказа, требуется государственное регулирование в области метрологического обеспечения в соответствии с требованиями федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений». В этот комплекс требований входит метрологическая экспертиза технической документации, государственные испытания и аттестация на определение типа средств измерений, поверка средств измерений. Ранее до выхода вышеупомянутого закона, Госстандарт делегировал свои полномочия в этой области Министерству среднего машиностроения в лице его метрологической службы проводить аккредитацию метрологических служб юридических лиц своего ведомства на выполнение работ по поверке и аттестации средств измерений.

В настоящий момент все ранее выданные документы считаются легитимными, а вновь изготовленные средства измерений должны проходить все процедуры через органы агентства по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирования) и реестра (Росреестра). Особенно сложными и продолжительными являются работы по государственным испытаниям по определению типа средств измерений и внесению его в государственный реестр.

Эти работы может проводить ограниченное число профильных метрологических институтов и центров.

Для АКК твэлов энергетических реакторов ситуация в области метрологического обеспечения иная. Эти средства измерения (СИ) не подпадают под государственное регулирование в области обеспечения единства измерений, и ответственность по федеральному закону ФЗ-102 полностью возлагается на предприятие, которое разрабатывает, испытывает и внедряет данные АКК. Для обеспечения всех метрологических требований по созданию АКК твэлов на предприятии должна быть организована метрологическая служба, в состав которой входят аттестованные специалисты по метрологической экспертизе и калибровке средств измерений нужного направления. Кроме того, необходимо иметь в наличии специалистов в области аттестации соответствующих методик измерений. Метрологическая служба должна разработать необходимые руководящие документы по организации работ в области метрологического обеспечения разработки, внедрения и эксплуатации АКК на своём предприятии в ранге стандартов предприятия (СТП). Наиболее сложной задачей является разработка, изготовление и аттестация стандартных образцов для проведения испытаний, метрологической аттестации и калибровки АКК твэлов. Создание стандартных образцов предприятия регламентируется в основном требованиями ГОСТ 8.315-97 ГСИ «Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов». Для каждого АКК твэлов необходимо создание стандартного образца, который должен воспроизводить значение соответствующего контролируемого параметра в нужном диапазоне измерений с требуемыми метрологическими характеристиками. Как правило, изготавливают комплект стандартных образцов, который состоит из рабочего и контрольного стандартного образца предприятия (СОП).

Стандартный образец АКК твэла представляет собой либо полномасштабный твэл, либо его фрагмент, которые воспроизводят значения контролируемых параметров, подобранных из штатной продукции или специально изготовленных на разных технологических режимах. В большинстве случаев приходится использовать для изготовления стандартных образцов штатные материалы в соответствии с ТУ на

твэл, в том числе и делящийся материал: уран различного обогащения и его соединения. Это во многом осложняет процесс изготовления СОП, его практически невозможно изготовить в обычных условиях из-за режимных и санитарных требований. Разработчик АКК твэла при формировании технических требований на конструкцию СОП должен учитывать технологические возможности изготовления предлагаемой конструкции СОП в конкретных условиях. Лучше всего, когда технические требования на СОП для АКК разрабатываются в тесном контакте с технологами и конструкторами твэла, для контроля которого создаётся этот АКК.

СОП может приобрести статус отраслевого стандартного образца (ОСО), если его аттестация будет проводиться отраслевой метрологической службой. СОП является единичным средством измерения, которое должно иметь комплект рабочей конструкторской документации (РКД) и эксплуатационные документы. Изготовление и аттестацию СОП должны проводить квалифицированные специалисты, знающие технологию изготовления твэла, конструкцию измерительного канала АКК и методику измерения контролируемого параметра твэла, а также метрологические нормы и правила.

Рассмотренные нами научно-технические проблемы по созданию АКК твэлов различных реакторов находятся в тесной взаимосвязи друг с другом. Довольно часто приходится модернизировать методику измерения конкретного параметра твэла или даже отказываться от её применения, ввиду отсутствия необходимых специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной, измерительной техники нужной производительности для реализации этой методики в промышленных условиях. В других случаях возникают сложности с аттестацией измерительного комплекса из-за трудностей с изготовлением стандартных образцов с нужными метрологическими характеристиками.

Для успешного создания АКК твэла приоритетным является разработка оптимальной методики контроля соответствующего критического параметра и создание на её базе технических требований к комплексу технических средств для её реализации. На основе полученных технических требований можно проводить разработку специальных первичных преобразователей измерительных каналов,

устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования для данного АКК. Возможности метрологического обеспечения АКК твэла необходимо прорабатывать на этапе выбора методики контроля критического параметра твэла.

Решение рассмотренных проблем индивидуально в каждом конкретном случае и все же есть некоторые общие подходы к их решению. Они во многом определяют направление дальнейших исследований по теме диссертационной работы.

1.4 Обоснование основных направлений диссертационного исследования

По результатам проведённого анализа конструкции твэлов реакторов различного назначения, и технологического процесса их изготовления можно определить цели и задачи исследований.

Основная цель работы заключается в научном обосновании, разработке и создании специальных первичных преобразователей, устройств измерительной, микропроцессорной техники и алгоритмов их функционирования для автоматизированных комплексов контроля ядерного топлива энергетических, исследовательских и промышленных реакторов, отличающихся высокой производительностью и достоверностью контроля, способных работать в составе технологических линий производства твэлов.

Для достижения поставленной цели определены основные задачи исследования:

1. Разработка специальных первичных преобразователей измерительных каналов, устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования для автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов и тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 для осуществления сплошного выходного контроля в технологическом процессе производства ядерного топлива.

2. Разработка алгоритма функционирования системы управления комплексным контролем механических дефектов наружной поверхности твэлов ВВЭР-1000 на основе совместного использования разработанных для этой цели вихретоковых и оптикоэлектронных первичных преобразователей измерительных каналов.

3. Разработка алгоритма функционирования и структурной схемы элементов конструкции автоматизированной системы управления контролем геометрических параметров дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 с использованием дифракционного оптического элемента Дамманна и лазерной измерительной головки.

4. Разработка блока специальных первичных преобразователей с устройством их автоматической регулировки и алгоритма их функционирования в автоматизированной системе управления многоканальным радиометрическим контролем толщины слоев твэлов промышленного реактора.

5. Разработка алгоритма функционирования и структурной схемы элементов конструкции автоматизированной системы управления контролем сплошности топливного столба твэлов реакторов типа ВВЭР с более высокой надёжностью выявления дефектов сплошности топливного столба.

6. Разработка функциональной схемы системы управления комплексным контролем геометрических параметров твэлов ВВЭР-1000 с использованием оптикоэлектронных первичных преобразователей, и алгоритма функционирования системы управления автоматизированным комплексом с введением дополнительных измерительных каналов.

7. На основе внедрения специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования разработка основных принципов построения автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов и тепловыделяющих сборок для их сплошного контроля в составе технологических линий производства ядерного топлива.

В диссертационной работе дано научное обоснование применяемым методикам контроля, специальным первичным преобразователям и алгоритмам

функционирования АКК геометрических размеров, поверхностной плотности и сплошности топливного столба, дефектов внешнего вида оболочки и сварных соединений, давления газа под оболочкой ТВЭЛ, а также контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС ВВЭР-1000.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ

РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ранее были перечислены основные физические методы контроля, которые используются для измерения критических параметров твэлов в технологическом процессе их производства. Теперь целесообразно подробнее рассмотреть физическую сущность и некоторые особенности реализации этих методов для сплошного контроля твэлов. Наиболее распространёнными для выполнения данных задач можно считать радиационные методы контроля.

2.1 Радиационные методы контроля

Радиационные методы основаны на взаимодействии ионизирующего излучения с объектом контроля, в нашем случае с твэлом. Падающий на твэл поток ионизирующего излучения ослабляется при взаимодействии с материалом конструкции твэла, изменяя свою интенсивность и спектральный состав. Регистрируя поток ионизирующего излучения, которое провзаимодействовало с твэлом, можно определить дефекты конструкции твэла, либо различные физические величины (параметры) конструкции твэла.

Радиационные методы различаются по виду применяемого ионизирующего излучения. Наиболее распространенным является применение потока рентгеновского или гамма-излучения. Можно отметить также применение электронного и нейтронного излучения. Далее радиационные методы можно разделить по виду взаимодействия с объектом контроля. Для ряда измерений параметров объекта контроля можно использовать эффект избирательного поглощения излучения, в некоторых случаях эффект обратного рассеяния излучения (альбедо). Довольно часто используется анализ спектрального состава прошедшего через объект внешнего излучения, либо собственного излучения твэла. Встречается на практике применение регистрации вторичного излучения, которое возбуждается первичным

излучением в материале конструкции твэла. Далее рассмотрим более подробно применение радиационных методов для контроля твэлов.

2.1.1 Абсорбционные методы измерения

Абсорбционные методы измерения – это методы, в основе которых использование явления абсорбции (поглощения) слоем материала объекта контроля потоков гамма-излучения, рентгеновского излучения, заряженных частиц и нейтронов. Наибольшее распространение получило применение абсорбции рентгеновского и гамма-излучения, обладающих большой проникающей способностью и широким выбором источников излучений: радиоактивные изотопы, рентгеновские аппараты, ускорители электронов. Кроме того, процессы взаимодействия рентгеновского и гамма-излучения с веществом достаточно хорошо изучены, созданы математические модели этих процессов, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными. Однако в ряде случаев для решения специфических задач с успехом применяют поглощение потока нейтронов, электронов и даже протонов.

В работах [48–51] рассмотрены практические результаты использования гамма и рентгеновского абсорбционного метода для измерения толщины слоев изделий, а также некоторые особенности реализации данного метода в промышленных условиях. Плотность потока излучения, прошедшего через несколько слоев, аналитически связана с толщиной каждого слоя экспоненциальной зависимостью следующего вида:

$$n = n_0 \cdot \Phi(\mu x, E) \exp\left(-\sum_n \mu_i \rho_i x_i\right), \quad (2.1)$$

где:

n – плотность потока квантов, прошедших через слои изделия;

n_0 – плотность потока квантов, падающих на изделие;

μ_i – массовый коэффициент ослабления излучения i -слоем;

ρ_i – плотность i -слоя;

x_i – толщина i -слоя;

$\Phi(\mu x, E)$ – фактор накопления рассеянного излучения, где

μx – характеристика поглощающего излучение слоя;

E – энергия излучения.

Выражение (2.1) справедливо для монохроматического излучения. В случае использования рентгеновского или тормозного излучения необходимо проинтегрировать выражение (2.1) по E :

$$n = n_0 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(\mu x, E) \exp\left(-\sum_n \mu_i \rho_i x_i\right) dE. \quad (2.2)$$

Из выражений (2.1) и (2.2) следует, что определение значения толщины каждого слоя возможно при условии $\rho_i = \text{const}$, либо, когда флуктуации ρ незначительны. Поэтому, флуктуации ρ являются одним из источников методической погрешности измерения толщины слоев изделия данным способом.

На рисунке 2.1 изображена примерная схема абсорбционного измерителя толщины трехслойного изделия, которая поясняет одно условие, необходимое для выполнения выражений (2.1) и (2.2). Оно заключается в том, чтобы расстояние от края коллиматора источника до поверхности изделия R было много больше толщины самого изделия d . В этом случае пучок излучения можно считать по толщине всего изделия плоскопараллельным, тогда местоположением каждого слоя по отношению к источнику излучения можно пренебречь. Это особенно важно в тех случаях, когда необходимо измерять толщину каждого слоя по строго определенной площади.

Входящий в оба выражения множитель Φ , именуемый фактором накопления, показывает вклад в зарегистрированную плотность потока излучения рассеянного в изделии потока квантов. Для геометрии узкого пучка, где каждый рассеянный квант идентифицируется как поглощенный, $\Phi = 1$. В других случаях $\Phi > 1$. Рассеянное излучение также информативно в отношении толщины слоя, однако, в меньшей степени, чем нерассеянное. На практике используется геометрия измерения, которая обеспечивает $1 < \Phi < 1,5$. Определение фактора накопления расчетным путем весьма сложно, особенно для излучения с непрерывным спектром. Существует несколько видов приближений, которые представляют Φ как суперпозицию экспоненциальных функций.

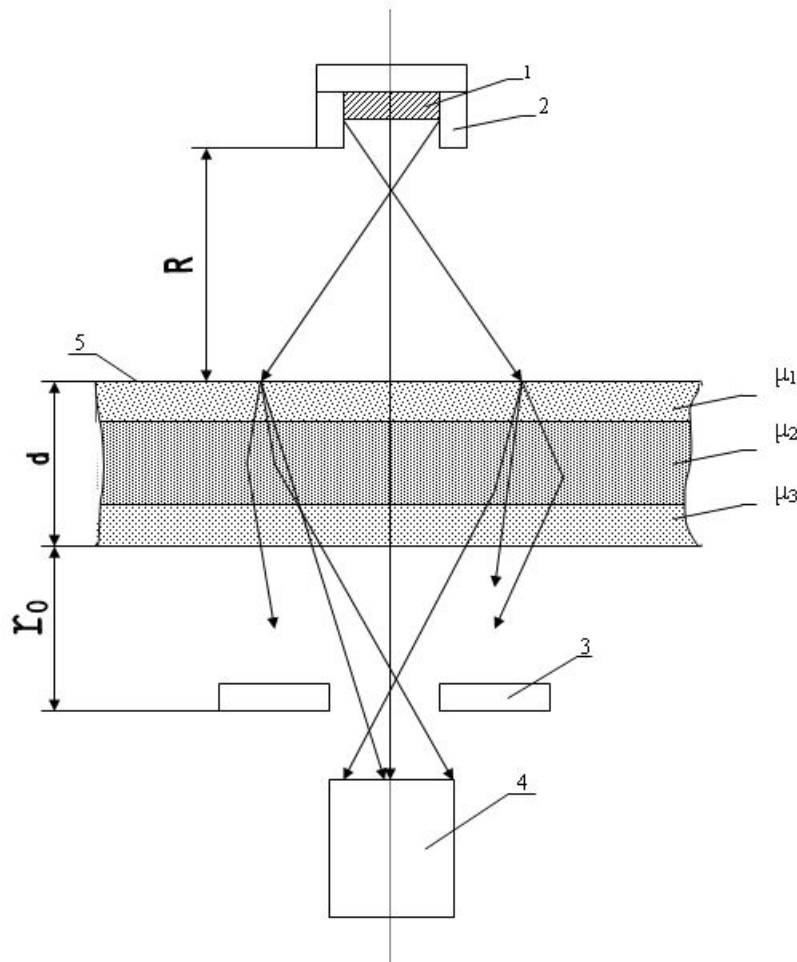


Рисунок 2.1 – Схема абсорбционного радиоизотопного измерения толщины

1. Источник рентгеновского или гамма-излучения.
2. Коллиматор.
3. Входное окно детектора.
4. Детектор.
5. Трехслойное изделие.

Точность этих приближений зависит от конкретных условий и, как правило, невелика, что объясняется сложным и вероятностным характером процесса рассеяния. Чаще всего Φ определяют экспериментальным путем. При использовании монохроматического излучения невозможно определить толщину каждого слоя отдельно, исходя из выражения (2.1). Для решения такой задачи, необходимо использовать несколько потоков квантов с различными энергиями, в данном случае нужно три различных источника. В связи с этим возникает проблема по размещению нескольких радиоизотопных источников в одном месте, в

противном случае необходимо распределить их по длине контролируемого изделия, но в этом случае придется решать дополнительную задачу по привязке каждого измерения к одному участку просвечивания.

Более реальным выглядит вариант с применением источника излучения с непрерывным спектром, например рентгеновского аппарата. Выбирая участки спектра рентгеновского излучения с разными эффективными энергиями квантов, и применяя спектрометрический способ регистрации прошедшего излучения, можно получить нужную систему уравнений для определения толщины каждого слоя отдельно. Физическая чувствительность метода с применением абсорбции рентгеновских или гамма - квантов для измерения толщины слоев композиционного изделия, прежде всего, зависит от соотношения атомных номеров материалов каждого слоя. Если материалы слоев имеют близкие атомные номера, в пределах 2-3, то используя абсорбционный метод измерения, основанный на использовании «скачков» поглощения излучения (избирательного поглощения) материалом каждого слоя, невозможно добиться приемлемого уровня методической погрешности измерения толщины каждого слоя, что показано в работе [48]. В то же время, если атомные номера материалов слоев отличаются более чем на 10, то измерение толщины слоя из материала с малым атомным номером на фоне слоя из материала с высоким атомным номером будет практически невозможно.

Таким образом, перспективы использования рентгеновского или гамма-абсорбционного метода измерения толщины слоев многослойных и композиционных изделий зависит от целого ряда конкретных условий: соотношения атомных номеров материалов каждого слоя, номинальных значений измеряемых толщин, требуемого диапазона измерений, величины площади усреднения однократного измерения и допустимой погрешности измерения толщины.

В наших целях данный метод перспективен для измерения поверхностной плотности топливного слоя твэлов исследовательских и промышленных реакторов с погрешностью не хуже $\pm 5\%$. доверительной вероятностью $P=0,95$ [25, 26]. В дальнейшем в работе оценка погрешности измерения проводится только с доверительной вероятностью 0,95. Кроме этого, возможно применение

абсорбционного метода для измерения дефектов в сварных соединениях и дефектов сплошности топливного столба твэлов энергетических реакторов [52].

2.1.2 Методы измерения с применением обратно рассеянного излучения

Данные методы измерения используют явление обратного рассеяния ионизирующих излучений (альбедо) от материала объекта контроля с последующей регистрацией отражённого потока излучения. Наиболее широкое применение получило использование альбедо рентгеновского излучения, гамма-излучения и потоков электронов.

В работах [48, 53–55] рассмотрены основные положения о применимости альбедо метода для контроля толщины слоев материалов и изделий. Обратное рассеяние гамма-излучения – это частный случай некогерентного рассеяния на большие углы $\theta > 90^\circ$. Дифференциальное сечение такого рассеяния удовлетворительно описывается формулой Клейна-Нишины, а суммарный угол $\theta > 90^\circ$ может быть суммой нескольких углов рассеяния, т.е. нескольких однократных углов рассеяния квантов. Таким образом, в общем альбедном пучке излучения могут находиться как однократно, так и двукратно и более рассеянные кванты. Исходя из этого положения, можно описать процесс рассеяния, используя метод Монте-Карло, где применяется вероятностный подход к описанию характера взаимодействия гамма-излучения с веществом. Информативность однократно и многократно рассеянных квантов различная ввиду того, что многократно рассеянные кванты имеют большую длину пробега. Учитывая, что спектр рассеянного излучения существенно отличается от первичного и зависит от толщины материала рассеивателя, для измерения толщины можно применять не только интегральный метод измерения рассеянного излучения, но также и спектрометрический метод измерения. Кроме этого, большое значение имеет использование особенностей углового распределения рассеянного излучения.

Альбедо рентгеновского и гамма-излучения применяется в основном для измерения толщины однородного изделия, например: толщины стенок труб,

толщины проката, толщины изделий сложной формы. Контроль толщины слоев композиционного изделия из материалов с разными значениями атомного номера (Z) затруднен, т.к. толщины этих слоев, как правило, небольшие и составляют доли миллиметра. Энергию первичного излучения для отражательных γ -толщиномеров выбирают более 150 кэВ, чтобы увеличить вероятность комптоновского рассеяния. Это обусловлено тем, что ниже 150 кэВ сечение фотоэлектрического поглощения достаточно велико даже для легких металлов [56]. Поэтому чувствительность толщинометрии малых слоев по альбедо γ -излучения низка и в области энергий γ -квантов выше 200 кэВ сечение комптоновского рассеяния мало зависит от Z материала.

Широкое использование для измерения толщины многослойных изделий и тонких покрытий получил метод с применением регистрации обратно отраженных электронов [53]. Высокое сечение взаимодействия электронов с атомами вещества по сравнению с γ -излучением позволяет наблюдать обратное отражение их на малых толщинах, кроме того, для электронов характерна ярко выраженная зависимость альбедо от Z материала. Подробно проанализированы механизм альбедо электронов от поверхности материалов и основные его закономерности в работах [39, 53, 54].

Подобно γ -кванту, электрон, взаимодействуя с атомами вещества, может рассеяться на углы $\theta > 90^\circ$ относительно первоначального направления, претерпев при этом однократные, двукратные и более столкновения. С ростом толщины рассеивателя возрастает вклад в общее альбедо многократно рассеянных электронов.

Энергетический спектр отраженных электронов имеет всегда непрерывный вид, даже если падающий поток моноэнергетический. Это вызвано статистическим характером процесса рассеяния, в результате которого происходят потери энергии падающих электронов. На некоторой толщине рассеивателя, называемой толщиной "насыщения" или обратной диффузии, наступает насыщение интенсивности потока отраженных электронов. Для процесса обратного отражения, как γ -квантов, так и для электронов, основной количественной характеристикой его является коэффициент обратного отражения или альбедо.

Альбе́до может быть числовым, энергетическим или угловым, в зависимости от того, к какому параметру производится привязка этого коэффициента: к числу частиц, к энергии потока или к углу рассеяния. Числовое дифференциальное альбе́до можно записать в следующем виде:

$$\eta_g(z, E_0, d, \theta, E', \theta', \varphi') = \frac{n'(Z, E_0, d, \theta, E', \theta', \varphi')}{n_0}, \quad (2.3)$$

где:

Z, d – соответственно атомный номер и толщина материала;

E_0, E' – энергия до и после рассеивания;

$\theta, \theta', \varphi, \varphi'$ – углы падения и отражения электронов;

n' – число электронов, отраженных обратно в интервале телесного угла от Ω' до $\Omega' + \Delta\Omega$ и в интервале энергий от E' до $E' + \Delta E$;

n_0 – начальная плотность потока электронов.

Выражение (2.3) записано для моноэнергетического падающего потока электронов.

Интегральное числовое альбе́до можно записать так:

$$\eta_c(z, E_0, d) = \iint \eta_g dE' d\Omega' \quad (2.4).$$

Энергетическое альбе́до характеризует ту часть первичной падающей энергии потока электронов, которая отразилась в обратном направлении, и его можно представить как:

$$\eta_e(z, E_0, d, \theta, E') = \int \eta_g \cdot d\Omega' \quad (2.5).$$

Аналогичным образом можно представить угловое альбе́до. В случае немонотонного падающего потока электронов необходимо в выражениях (2.3–2.5) учесть функцию распределения спектра энергий падающего потока электронов. В работе [54] подробно рассмотрен процесс согласования теоретически полученных данных по альбе́до электронов с экспериментальными данными, проанализированы результаты исследований Шмидта, Боте, Арчарда и Эверхарта. Наиболее хорошее согласование получил Арчард, объединив приближение

однократного рассеяния и диффузионное приближение. Остановимся на выявлении зависимости обратно рассеянного потока электронов от толщины слоя рассеивателя.

В выражениях (2.3–2.5) отражено то, что величина коэффициентов альбедо зависит от толщины рассеивателя, однако по достижении какой-то толщины d_n , именуемой толщиной «насыщения», наступает максимум в этой зависимости. Принимается, что d_n – это толщина или глубина слоя, на котором происходит уменьшение альбедо на 1%. Однако в работах [53, 54] отмечается, что эмпирические выражения для d_n очень противоречивы, например:

$$d_n = 0,5 \cdot R \quad (2.6)$$

$$d_n = 6\sqrt{R} \quad (2.7)$$

$$d_n = 0,2R, \quad (2.8)$$

где R – пробег электронов для данной среды,

$$d_n = \frac{E_m^{3/2}}{10\rho}, \quad (2.9)$$

где E_m – максимальная энергия спектра падающих электронов, ρ – плотность среды.

В выражении (2.9) присутствует характеристика рассеивателя ρ . Это отличает его от других приближений (2.6–2.8). Поэтому, почти всегда приходится экспериментально определять d_n . В работе [53] отмечается, что с достаточной точностью для практических целей можно использовать следующее соотношение для числового альбедо:

$$\eta(\theta) = (0,0415 \cdot Z^{2/3} - 0,4) \cdot \sin \theta + 0,4, \quad (2.10)$$

где θ – угол, в направлении которого распространяется отраженный поток электронов, Z – атомный номер вещества рассеивателя.

Для атомов с Z от 26 до 30 выражение в скобках близко к нулю, т.е. для них значение практически не зависит от ориентации телесного угла и практически равно 0,4. Необходимо отметить, что обратно отраженный поток электронов при выходе на поверхность материала будет поглощаться в нем с массовым коэффициентом ослабления μ , поэтому зависимость обратно отраженного потока электронов от толщины d будет носить экспоненциальный характер:

$$N(d) = N_{\infty} (1 - e^{-\mu \cdot \rho \cdot d}), \quad (2.11)$$

где ρ – плотность материала, N_{∞} – число отраженных электронов при полубесконечной толщине рассеивателя.

В случае, если на рассеиватель с атомным номером Z_1 будет нанесено тонкое покрытие толщиной $d < d_n$ с атомным номером Z_2 , то на основании выражения (2.13) можно записать:

$$N(d) = (N_{2\infty} - N_{1\infty}) (1 - e^{-\mu_2 \cdot \rho_2 \cdot d}) + N_{1\infty}, \quad (2.12)$$

где $N_{2\infty}$ – число обратно отраженных электронов от полубесконечного рассеивателя с атомным номером Z_2 , $N_{1\infty}$ – число обратно отраженных электронов от полубесконечного рассеивателя с атомным номером Z_1 .

Таким образом, толщину покрытия можно определить однозначно, регистрируя поток обратно отраженных электронов в случае, если покрытие нанесено на подложку, толщина которой $d_0 > d_n$ для энергии падающих электронов, применяемых в этом случае. Если же покрытий несколько, то определить отдельно толщину каждого из них можно, используя несколько источников излучения электронов с разными энергиями E_m . Этот вопрос рассмотрен в работе [59], где были проанализированы погрешности раздельного измерения толщины двухслойных покрытий с помощью двух радиоактивных изотопов Tl^{204} , Pm^{147} .

На рисунке 2.2 изображена схема измерения толщины двухслойных покрытий. В работах [57, 58] приведен ряд соотношений, полезных для практического использования:

$$d_n = \frac{\ln 100}{(\mu + \lambda) \cdot \rho}, \quad (2.13)$$

где:

d_n – толщина насыщения;

μ – массовый коэффициент ослабления электронного потока в веществе;

ρ – плотность среды;

$$\lambda = \mu \cdot \frac{225}{106 + Z} - \text{постоянный коэффициент.} \quad (2.14)$$

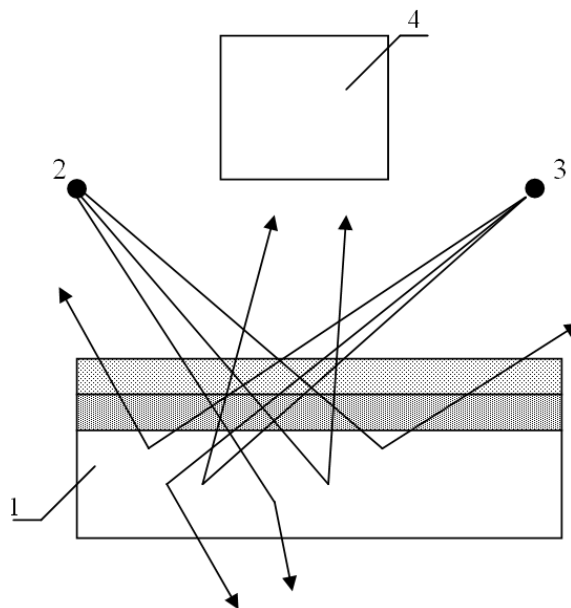


Рисунок 2.2 – Схема измерения толщины двухслойного изделия

1. Изделие с двухслойным покрытием. 2. Источник электронов с энергией E_{m1} .
3. Источник электронов с энергией E_{m2} . 4. Детектор отраженных электронов.

Применение альbedo электронного потока для измерения толщины алюминиевых оболочек твэлов исследовательских и промышленных реакторов дало хорошие результаты в виде создания целого ряда автоматизированных комплексов контроля [25 – 27]. Величина погрешности измерения толщины алюминиевых оболочек для этих твэлов не более $\pm 0,05$ мм в диапазоне толщин от 0,2 до 0,9 мм.

2.1.3 Спектрометрические методы измерения

Спектрометрические методы измерения потоков ионизирующего излучения основаны на регистрации энергии квантов или элементарных частиц специальными детекторами с дальнейшим преобразованием и обработкой сигнала анализатором импульсов. В результате измерений получается спектр с различными пиками, которым соответствуют различные энергии квантов или частиц. Чем больше амплитуда пика тем больше было зарегистрировано квантов или частиц с определённой энергией, соответствующей этому пику. По характеру спектра излучения можно точно определить количественный и качественный состав

вещества, который его излучает. Особенно большое распространение получила гамма-спектрометрия.

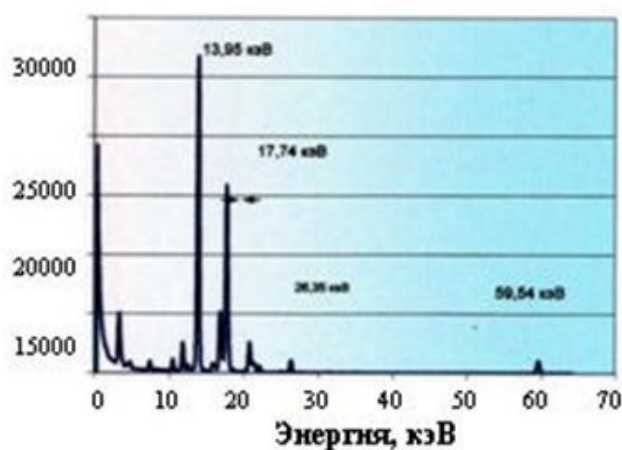
Это обусловлено тем, что гамма-излучение и связанное с ним характеристическое излучение, присуще практически всем делящимся веществам. Если вначале спектрометрия гамма-излучения в основном использовалась для научных исследований в атомной и ядерной физике, то с шестидесятых годов прошлого века успешно применяется в прикладных целях в разных отраслях промышленности и в том числе для контроля ядерных материалов [60, 61].

Природа характеристического и гамма-излучения и их дискретный спектр энергий объясняется тем, что атом или ядро, находясь в возбуждённом состоянии, снимает своё возбуждение за счёт испускания квантов характеристического или гамма-излучения. Уровни состояния ядра и атома дискретны, поэтому энергия перехода из одного уровня к другому и будет характеризовать энергию квантов излучения.

В результате радиоактивного распада ядро из возбуждённого состояния может переходить последовательно через несколько уровней, при этом испускается несколько разных квантов с различной энергией. На рисунке 2.3 представлены спектры некоторых источников излучений, полученные с помощью первичных преобразователей на основе полупроводникового кремниевого детектора.

Для регистрации гамма-излучения используются также первичные преобразователи на основе сцинтилляционных и газонаполненных детекторов. Наилучшим разрешением отличаются полупроводниковые детекторы (ППД). Энергетическое разрешение детектора определяется шириной фотопика на половине его высоты. Каждый пик спектра соответствует квантам определённой энергии, часто пик спектра называют фотопиком, т.к. он соответствует полному поглощению гамма-квантов данной линии за счёт фотоэлектрического эффекта. Равномерная часть спектра характеризует ту часть λ -излучения, которая претерпела комптоновское рассеяние.

а) Спектр Am-241



б) Спектр Cd-109

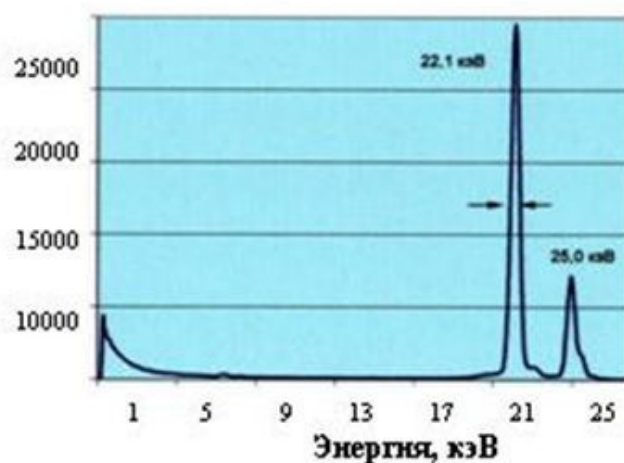


Рисунок 2.3 – Спектры источников гамма-излучения

Изотопы урана являются естественными источниками альфа-излучения, распад которых сопровождается испусканием гамма-излучения характерного спектра. Изучая спектры сопутствующего гамма-излучения, можно судить об изотопном составе урана.

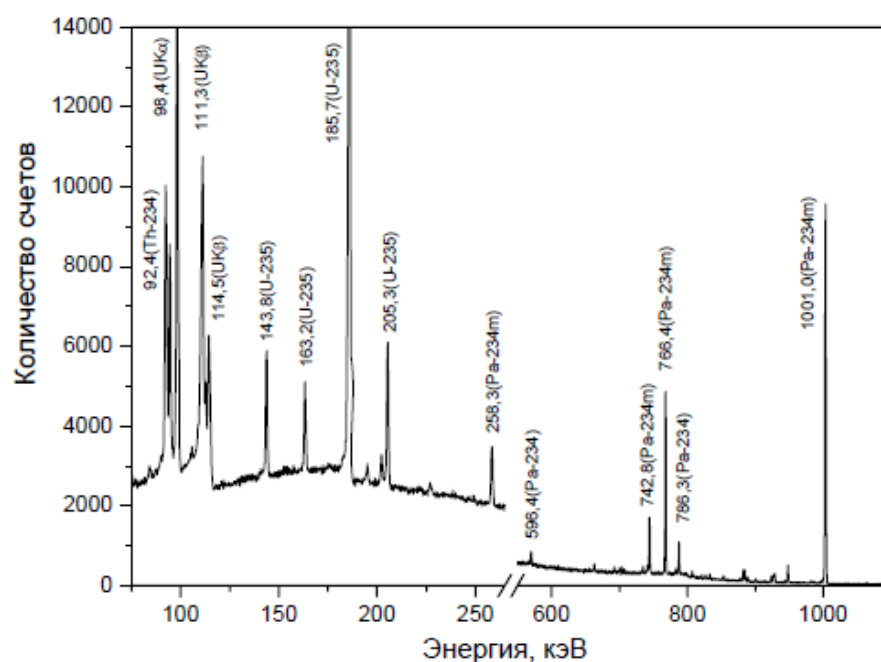


Рисунок 2.4 – Гамма-спектр урана обогащением 4,46% по урану-235

На рисунке 2.4 показан спектр гамма-излучения от урана с обогащением 4,46%, полученный с помощью Ge(Li) полупроводникового детектора, где хорошо видны основные линии от изотопов урана. Основной вклад вносят линии, связанные с ураном-238 и ураном-235: 92,4 кэВ, 98,4 и 111,3 кэВ характеристического

излучения, 185,7 кэВ гамма-излучения. Для измерения обогащения урана особенно интересна линия 185,7 кэВ.

В работах [31, 32] подробно описаны методики контроля обогащения урана на разных стадиях производства ядерного топлива с помощью измерения вклада линии 185,7 кэВ в общую активность гамма-излучения уранового материала. Для определения массовой доли изотопа урана-235 необходимо оценить площадь фотопика линии 185,7 кэВ по отношению к общей площади спектра гамма-излучения от контролируемого уранового материала или к площади линии другого изотопа, например урана-238. Площадь фотопика $S(E_i^j)$ i - линии спектра гамма-излучения изотопа j с энергией E_i можно оценить как

$$S(E_i^j) = \lambda_j N_j R_i^j \varepsilon(E_i), \quad (2.15)$$

где:

λ_j – постоянная распада изотопа j , $\lambda_j = \ln 2 / T_j$;

T_j – период полураспада изотопа j ;

N_j – количество атомов изотопа j ;

R_i^j – значение ветвления гамма-излучения (квантов на распад);

$\varepsilon(E_i)$ – полная эффективность регистрации линии с энергией E_i .

Пусть N_m – число атомов изотопа m . Тогда отношение $\frac{N_j}{N_m}$ будет характеризовать долю изотопа j по отношению к изотопу m . Изотоп m излучает гамма-линию k с энергией E_k . Тогда с учётом выражения 2.15 можно будет записать:

$$\frac{N_j}{N_m} = \frac{S(E_i)}{S(E_k)} \frac{T_j}{T_m} \frac{R_k}{R_i} \frac{\varepsilon(E_k)}{\varepsilon(E_i)}, \quad (2.16)$$

где $S(E_i)$, $S(E_k)$ – площади фотопиков гамма-линий i и k ;

T_j , T_m – периоды полураспада изотопов j и m ;

R_i , R_k – значения ветвления распада;

$\varepsilon(E_i)$, $\varepsilon(E_k)$ – эффективность регистрации гамма-квантов.

В выражении (2.16) для определения доли изотопа j все основные величины могут быть определены: площади фотопиков можно измерить, константы T и R

носят справочный характер, а отношение эффективностей регистрации можно установить экспериментально, причем в этом случае геометрические условия измерения не будут влиять на результат.

Главный инструмент в реализации пассивного контроля обогащения урана-235 в ядерном топливе – это гамма-спектрометр на основе сцинтилляционного или полупроводникового первичного преобразователя в зависимости от цели контроля. Для технологического контроля обогащения топливного столба энергетических твэлов, где важна производительность контроля, используются спектрометры на базе сцинтилляционных первичных преобразователей. Для обеспечения необходимой производительности твэлов с топливным столбом до 4 метров используют многоканальные спектрометры, имеющие до 32 каналов. Это весьма дорогостоящие автоматизированные комплексы контроля. В работе [33] рассмотрена установка пассивного контроля урана-235 на фирме ENUSA в Испании.

На ПАО «НЗХК» при производстве твэлов типа ВВЭР применяется по технологической схеме показанной на рисунке 1.7, установки ПАС или МАКС, которые состоят из спектрометров фирмы ГРИНСТАР типа SBS и детекторов на базе сцинтиллятора ортогерманата висмута (BGO) [16]. Предел абсолютной погрешности измерения массовой доли урана-235 в топливном столбе твэла ВВЭР-1000 составляет величину не более $\pm 0,14\%$. Сцинтилляционный кристалл BGO имеет более высокую эффективность регистрации гамма-излучения в сравнении с традиционным сцинтиллятором NaJ(Tl), хотя имеет несколько худший световыход, но для данной задачи он оптимален, т.к. он имеет более низкую чувствительность к нейтронному излучению.

Для аналитического контроля обогащения урана применяют гамма-спектрометры на базе полупроводниковых охлаждаемых Ge(Li) детекторов, которые выпускают такие фирмы как Canberra или Ortec. Для анализа спектров используют программное обеспечение, которое входит в состав поставляемых спектрометров или может быть разработано с помощью прикладного программного обеспечения специально для конкретной цели. Основным условием для измерения обогащения урана по собственному гамма-излучению является равновесное состояние изотопов

урана, что иногда может не выполняться в случае смешивания части свежего необлучённого урана с регенированным ураном после облучения в реакторе. В этом случае необходимо учесть вклад в гамма-линию 185,7 кэВ квантов от изотопа урана-232, а также других изотопов урана, которых в свежем топливе нет. Для решения этой задачи необходимо учесть возраст и происхождение всех составляющих смеси уранового материала, что значительно усложняет проведение измерения обогащения урана в ядерном топливе.

В настоящее время метод пассивного контроля обогащения урана в ядерном топливе в технологическом процессе изготовления ядерного топлива для энергетических реакторов является основным у всех его производителей. Такое положение связано с тем, что в урановую таблетку для ядерного топлива последних поколений стали добавлять так называемые «выгорающие» поглотители на основе оксида гадолиния. Гадолиний имеет высокое сечение захвата тепловых нейтронов, поэтому, применяя таблетки с оксидом гадолиния, можно получить профилированные твэлы, что помогает выравнивать нейтронный поток в активной зоне реактора для получения лучшего выгорания ядерного топлива. В этом случае применение активного метода измерения потоков запаздывающих гамма-квантов для измерения изотопного состава урана недопустимо.

Таким образом, для контроля обогащения урана с оксидом гадолиния невозможно использовать ранее широко применяемый нейтронно-активационный метод измерения обогащения урана [31, 32].

2.1.4 Томографические методы измерения

Метод радиационной вычислительной томографии получил своё применение в промышленности сравнительно недавно и его прогресс во многом связан с бурным развитием средств вычислительной техники. Самое широкое распространение получила рентгеновская вычислительная томография (РВТ).

В работе [62] рассмотрено применение РВТ для промышленного контроля качества твэлов в процессе производственного цикла. Любое рентгеновское теневое изображение является плоской проекцией трехмерного объекта. В наиболее простом

случае можно описать его, как изображение, полученное в параллельных рентгеновских лучах. В данном приближении, каждая точка теневого изображения содержит суммарную информацию по абсорбции конкретного рентгеновского пучка на всем объеме трехмерного объекта. Для параллельной геометрии рентгеновских пучков реконструкция объемного изображения образца из двумерной теневой проекции реализуется с помощью реконструкций серии двумерных срезов образца вдоль одномерных теневых линий.

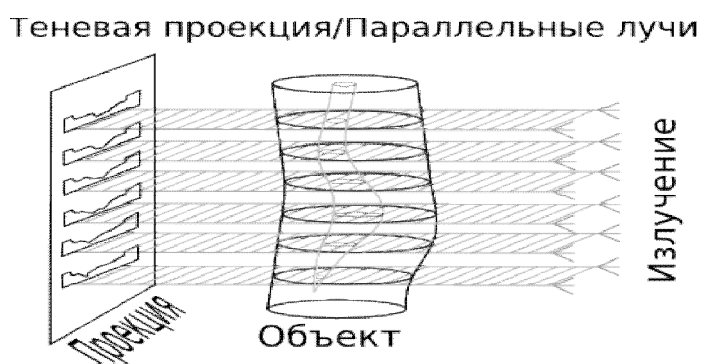


Рисунок 2.5 - Геометрия параллельных пучков

В РВТ применяются следующие общие алгоритмы построения объемных реконструкций:

- проекция максимальной интенсивности;
- реконструкция с затененной наружной поверхностью;
- объемное представление.

Проекция максимальной интенсивности (Maximum Intensity Projection, MIP) состоит из вокселей, которые имеют максимальную плотность. В этом методе на выбранную базовую плоскость по ходу распространения луча зрения проецируются сигналы со всего набора двумерных изображений исследуемой зоны. Таким образом, получаемая проекция всегда представляет комбинацию вокселей внутри отображаемого объема, которые имеют максимальную интенсивность. Альтернативой MIP-изображениям является отображение пикселей, имеющих минимальную интенсивность (MinIP), с помощью которых можно отображать такие структуры, как пустоты.

При реконструкции с затененной наружной поверхностью выбирается некоторое пороговое значение диапазона отображаемых элементов. Все воксели, превышающие пороговое значение, вносят вклад в итоговое изображение, при этом поверхность 3D реконструкции формируется первыми вокселями, чьи интенсивности превышают выбранный порог, находящимися на выбранном луче зрения. Эффект затенения усиливает ощущение глубины, однако теряется исходная информация о плотности. Также необходимо учитывать, что получаемое изображение зависит от выбранного порога, поэтому такие изображения скрывают часть информации.

Метод объемного представления (Volume Rendering) является сочетанием первых двух методов и позволяет реконструировать 3D модель из набора срезов. Получаемые реконструкции не имеют ограничения максимальной интенсивности, и все значения плотности элементов вдоль виртуального луча вносят вклад в итоговое изображение в соответствии с их весом. Каждому элементу приписывается определенная яркость, цвет и прозрачность, что позволяет одновременно выделить из исходного набора данных множество структур, имеющих различную плотность.

Для решения некоторых задач могут быть разработаны специальные алгоритмы реконструирования изображений, которые могут взаимодействовать друг с другом. Некоторые алгоритмы, рассмотренные выше, были использованы для разработки рентгеновского вычислительного томографа контроля сварных швов твэлов реактора ВВЭР-1000 совместно с другими алгоритмами, которые были специально разработаны для решения этой задачи. Рентгеновский томограф предназначен для контроля сварных швов, изготовленных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС). Целью данного контроля является выявление пор в теле сварного шва размером более 150 мкм в автоматизированном режиме. Ранее твэлы подвергались рентгенографическому контролю, поэтому было невозможно осуществлять сплошной контроль, выборочный контроль был в объеме не более 10% от партии твэлов.

Основные результаты по внедрению рентгеновского вычислительного томографа для контроля сварных швов твэлов ВВЭР-1000 приведены в работах [52,

63]. На рисунке 2.6 схематически изображена заглушка твэла соединенная с циркониевой трубкой, заполненной топливными таблетками.

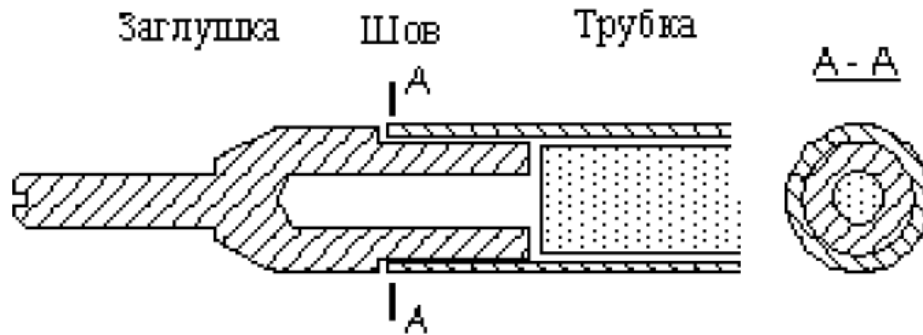


Рисунок 2.6 – Вид сварного шва твэла ВВЭР

Заглушка твэла специально сделана с поднутрением для получения лучшего контраста рентгеновского изображения. Наружный диаметр трубы $r_2 = 9,1$ мм, а внутренний диаметр $r_1 = 4,5$ мм. Толщина стенки примерно 0,7 мм и высота шва около 2,5 мм. Ослабление рентгеновского излучения при прохождении твэла в зоне сварного шва можно описать как

$$I = I_0 \exp[-p(s, z, \varphi)], \quad (2.17)$$

где I , I_0 – интенсивности падающего на твэл и прошедшего его потока рентгеновского излучения, $p(s, z, \varphi) = \int_0^L \mu_{\text{ц}} dL$ – двумерная проекция, полученная вдоль линии L под углом φ , $\mu_{\text{ц}}$ – линейный коэффициент ослабления излучения в цирконии; s и z – координаты.

Используя выражение 2.17 можно произвести оценку динамического диапазона детектора и разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Динамический диапазон детектора оценивается как разница между максимальной I_{MX} и минимальной I_{MN} интенсивностями излучения, зарегистрированными детектором. $I_{MX} = I_0$, когда отсутствует контролируемый твэл.

$$I_{MN} = I_0 \exp\left(-2\mu_{\text{ц}} \sqrt{r_2^2 - r_1^2}\right),$$

когда излучение проходит по лучу, касательному поднутрению заглушки $s = r_1$. Минимальное изменение интенсивности излучения, вызванное наличием дефекта типа пустотелой поры, размером $d \ll r_1$ по лучу $s = r_1$, будет равно

$$\Delta I_d = I_0 \mu_{\text{ц}} d \exp \left(-2\mu_{\text{ц}} \sqrt{r_2^2 - r_1^2} \right). \quad (2.18)$$

Динамический диапазон $D_d = (I_{MX} - I_{MN}) \Delta I_d$, приведённый к размеру дефекта, определяет число уровней квантования. Оценка сигнала проекций и разрядности АЦП для различных напряжений на рентгеновской трубке приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Динамический диапазон сигнала и разрядность АЦП

Напряжение, кВ	150	175	200	225	250
Коэффициент ослабления $\mu_{\text{ц}}$	6,1	4,31	3,34	2,72	2,33
Диапазон сигнала I_0 / I_{MN}	126	30	14	8,6	6,3
Диапазон проекций $\ln(I_0 / I_{MN})$	4,88	3,45	2,67	2,18	1,86
Приведенный диапазон D_d	2030	699	419	315	270
Число уровней квантования N_Q	4060	1398	828	630	540
Разрядность АЦП $N_{\text{АЦП}}$	12	11	10	10	10

Рентгеновская трубка при токе I_a испускает за время t $N_0 = I_a t \eta g^{-1}$ рентгеновских фотонов (η -коэффициент лучевой отдачи трубки, g – заряд электрона). На площадь детектора S , расположенного на расстоянии R от фокуса трубки, будет падать N_s рентгеновских фотонов:

$$N_s = N_0 \frac{S}{4\pi R^2} = \eta \frac{I_a t}{q} \cdot \frac{S}{4\pi R^2}. \quad (2.19)$$

С учётом поглощения в материале объекта толщиной $L_{\text{ц}}$ детектором будет зарегистрировано N_{OK} рентгеновских фотонов:

$$N_{0K} = \eta \frac{I_a t}{q} \cdot \frac{S}{4\pi R^2} \exp(-\mu_{\text{ц}} L_{\text{ц}}) \quad (2.20).$$

С учётом выражений (2.19), (2.20) проведена оценка сигнала рентгеновского детектора при анодном напряжении на трубке 160 кВ в поперечном сечении твэла (рисунок 2.7).

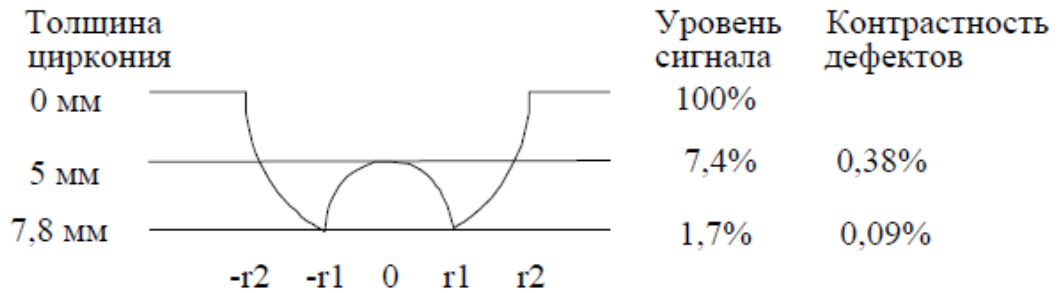


Рисунок 2.7 – Оценка сигнала в поперечном сечении твэла

Кроме того, проведена оценка характеристик проекций, связанных с квантовой природой рентгеновского излучения, данные сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 Характеристики шума и сигнала в проекционных данных

Напря- жение (кВ)	ЛКО $\mu_{\text{ц}}$ (см^{-1})	Число фотонов N_s	Число фотонов N_{0K}	Шум σ	ΔI_d $d=100$	ΔI_d $d=200$	$\frac{\Delta I_d}{\sigma}$
160	5,23	149000	10900	104,4	566	1133	5,4
195	3,5	149000	25890	106,9	1346	2693	8,36
220	2,81	149000	36560	191,2	1901	3802	9,94

Изменение сигнала ΔI_d , который обусловлен появлениями дефектов в сварном шве размерами $d = 100$ мкм и $d = 200$ мкм, приведены в соответствующих столбцах таблицы 2.2. Для надёжного обнаружения дефектов соотношение полезного сигнала к шуму, который обусловлен статистическими флуктуациями потока рентгеновского излучения, должно быть не менее 2:1 [64, 65]. В нашем случае это условие соблюдается.

Однако, не только статистические флуктуации рентгеновского излучения влияют на чувствительность томографа к дефектам. Значительный вклад вносит аппаратурная погрешность всех составляющих системы регистрации (СР) томографа. Были рассмотрены основные элементы системы регистрации томографа и их вклад в результирующую функцию рассеяния точки (ФРТ). В таблице 2.3 приведены данные по оценке ФРТ элементов системы регистрации томографа.

Таблица 2.3. Вклад в размер ФРТ (мкм), вносимый элементами СР

Фокус трубки	Сцинтиллятор	Рентген. рассеяние	Объектив	ЭОП	Размер пикселя
100	120	28	5	50	16

Далее были исследованы зависимости обнаружительных способностей томографа от параметров объекта и режимов регистрации. На рисунке 2.7 показана зависимость предельной чувствительности к дефектам от времени регистрации (экспозиции) для разных значений толщины просвечивания.

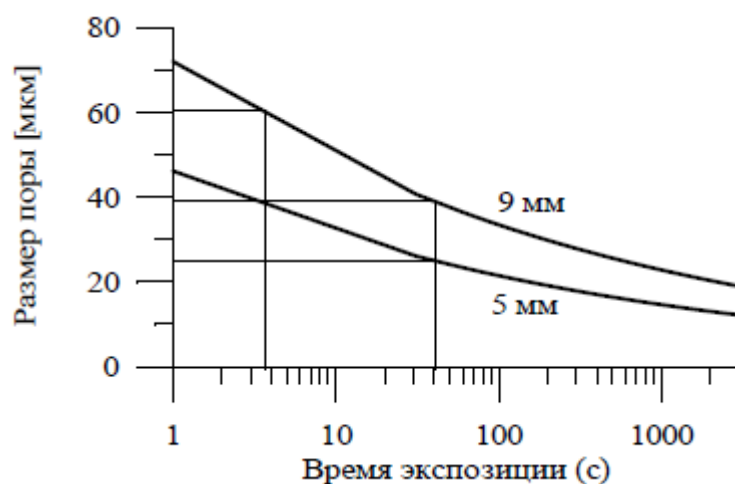


Рисунок 2.7 – Зависимость чувствительности к порам от экспозиции

Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что предел чувствительности томографа к порам в сварном шве твэла составляет 30-40 мкм в соответствии с технологическими требованиями на их контроль. Погрешность измерения поры размером 200 мкм не превышает 10%. Для реализации рентгеновского

томографического контроля предлагается получение многослойных панорамных снимков со скоростью 1 изделие за 60 сек. Для анализа и реконструкции панорамных сечений предлагается исследовать, разработать и применить ряд специальных алгоритмов. В таблице 2.4 представлен перечень алгоритмов, использующихся в работе томографа.

Таблица 2.4. Алгоритмы реконструкции сечений и панорам

№	Наименование алгоритма	Комментарий
1	Преобразование Фурье в полярных координатах	сечение
2	БПФ с преобразованием в декартову сетку	сечение
3	Метод свертки и обратной проекции	сечение, панорама
4	Обратная проекция с последующей фильтрацией	сечение, панорама
5	Обратная проекция с фильтрацией в Фурье области	сечение
6	Обратная проекция без фильтрации	панорама
7	Накопление со сдвигом (классическая томография)	панорама
8	Алгоритм взвешенных проекций	панорама

Разработанный томограф был успешно внедрен в промышленное производство, выдержал государственные испытания и внесён реестр средств измерений РФ.

2.2 Ультразвуковые методы контроля

Ультразвуковые методы входят в группу акустических методов контроля. Для контроля используется физический процесс возбуждения в контролируемом объекте упругих механических колебаний разной частоты. Упругие механические колебания распространяются в теле объекта в виде продольных или поперечных волн. Скорость распространения этих волн зависит от вида и состояния материала

объекта, от наличия в нём пустот и включений других веществ. Для разработки методик ультразвукового контроля используют такие особенности распространения ультразвуковых волн в среде как отражение от границы двух сред за счет разницы в скорости распространения в них ультразвуковых колебаний, ослабления их интенсивности из-за наличия в среде различных дефектов типа пустот и включений, появления резонансных явлений.

В зависимости от этого можно определить такие методики ультразвукового контроля: эхо-импульсная, теневая, резонансная. Первые две методики широко применяются для контроля качества сварных швов.

2.2.1 Эхо-импульсный метод ультразвукового контроля

Эхо-импульсный метод ультразвуковой дефектоскопии является самым распространённым методом для контроля металлов и изделий машиностроения. Особенно часто его используют для контроля различных сварных соединений при изготовлении изделий машиностроения.

Физическая сущность эхо-импульсного метода ультразвуковой дефектоскопии заключается во введении в контролируемое изделие коротких импульсов ультразвуковых колебаний (УЗК) и дальнейшей регистрации интенсивности и времени прихода сигналов отражённых от дефектов или границы изделия [66].

Применение этого метода для контроля сварных соединений твэла типа ВВЭР-1000 осложнено тем, что циркониевая оболочка твэла тонкостенная (0,67 мм) и недопустимые дефекты весьма малы: непровар в корне шва высотой более 0,1 мм и поры более 0,2 мм. Кроме того, скорость распространения УЗК в цирконии значительно ниже, чем в стали. Исследованиям применения эхо-импульсного метода для контроля сварных швов твэла ВВЭР-1000, полученных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС), посвящены работы [67, 68].

Для надёжной регистрации малых дефектов в тонкостенном цирконии предлагается применение ультразвуковых колебаний высокой частоты в диапазоне 15-50 МГц. В этих условиях применяется иммерсионный метод контроля, т.е. измеряемый твэл помещается в водную среду для проведения контроля. В ходе

проведённых на ПАО «НЗХК» исследованиях с использованием экспертной системы «SONIX» была определена оптимальная геометрия измерения дефектов в сварных швах твэла ВВЭР-1000 [68].

Для этого предложено использовать режим наклонного зондирования, пояснение которого представлено на рисунке 2.8. Продольная ось совмещённого пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), находясь в одной плоскости с осью контролируемого твэла, составляет угол α с нормалью к цилиндрической поверхности твэла. Наклонное зондирование имеет существенные преимущества перед нормальным зондированием, когда $\alpha = 0$.

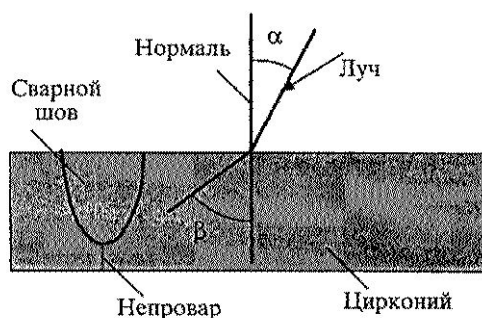


Рисунок 2.8 - Наклонное зондирование

При нормальном зондировании как наружная, так и внутренняя граница цилиндрической оболочки являются источниками отражённых сигналов, поступающих в процессе приёма на ПЭП, совмещающего функции излучателя и приёмника УЗК. Интенсивности этих сигналов значительно превышают интенсивность сигналов, обусловленных дефектами, расположенными вблизи наружной границы. При наклонном зондировании уровень сигнала, отражённого от цилиндрических поверхностей, резко уменьшается из-за превалирующего характера зеркальных отражений, при которых определяющая доля отражённой энергии на ПЭП не попадает.

Преобразователь формирует в воде продольную волну, которая на границе раздела «вода – циркониевая труба» при наклонном падении под углом α , лежащим между первым и вторым критическими значениями [66], трансформируется в

поперечную (сдвиговую) волну. Для обеспечения этой трансформации ввод УЗК при наклонном зондировании проводится под углом $\alpha = 30^\circ$. При нормальном зондировании основной волной, распространяющейся в цирконии, остаётся продольная волна. Поскольку скорости продольной и поперечной волн в цирконии отличаются более, чем в два раза (4650 м/с и 2250 м/с соответственно), то и длины волн имеют такое же соотношение 0,155 мм и 0,075 мм. Этим обусловлено дополнительное преимущество наклонного зондирования – существенно более высокое пространственное разрешение, а также бóльшая интенсивность отражений от дефектов поперечных волн.

Исследования проводились с совмещённым ПЭП фирмы Panametrics со средней частотой 30 МГц, расстояние ПЭП от поверхности твэла составляло 18,7 мм. Кроме того, при наклонном зондировании, существенно выше, чем при нормальном зондировании эффективная отражающая поверхность непровара, представляющего собой плоскостной дефект, ориентированный перпендикулярно оси твэла. Это способствует увеличению интенсивности отражённого сигнала и повышению вероятности его обнаружения. При контроле сварного шва твэл сканируется по двум направлениям.

Первое направление соответствует движению ПЭП вдоль образующей цилиндрической поверхности твэла. Это направление можно считать осью X вводимой декартовой системы координат. Второе направление сканирования соответствует повороту твэла вокруг своей оси между циклами сканирования по оси X и можно считать осью Y . Таким образом, реализуется строчная развёртка цилиндрической поверхности твэла. Расстояние между соседними строками составляет 20 мкм. При перемещении ПЭП вдоль образующей осуществляется импульсное зондирование УЗК.

Период следования импульсов и скорость перемещения ПЭП выбраны так, что расстояние вдоль оси X между соседними зондированиями также составляет 20 мкм. В результате сканирования с использованием временной дискретизации принятых колебаний с шагом $T_d = 2$ нс формируется трехмерный массив цифровых данных $d(k, m, n)$, отображающий интенсивность принимаемого сигнала как скалярную

функцию $s(x,y,z)$ двух непрерывных пространственных переменных, определяемых выражениями

$$x = k \Delta_x ; y = m \Delta_y , \quad (2.21)$$

где $\Delta_x = \Delta_y = 20$ мкм, также непрерывной временной переменной $z = n T_d$ – задержка сигнала.

Весь полученный массив данных $d(k, m, n)$ для визуального наблюдения и цифровой обработки может быть представлен в виде совокупности двумерных массивов двух типов. Совокупность данных $d(k, m, n = \text{const})$, соответствующей равной задержке называется слоем, а совокупность точек $d(k, m = \text{const}, n)$ с равными значениями координаты y – сечением. Можно отметить, что сечение соответствует развёртке типа В как представлено в работе [69]. Методика наклонного зондирования УЗК для контроля сварных швов, выполненных электронно-лучевой сваркой, успешно реализована в автоматизированных комплексах типа АКС – 7 для контроля твэлов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 на ПАО «НЗХК» г. Новосибирск. Непровар в корне сварного шва размером 150 мкм выявляется с доверительной вероятностью 0,95. Время измерения 30 с.

2.2.2 Теневой метод ультразвукового контроля

Теневой метод ультразвукового контроля применяется для дефектоскопии сварных соединений различных объектов машиностроения, транспорта и строительства. Для осуществления контроля теневым методом ультразвуковой дефектоскопии необходимо иметь двусторонний доступ к контролируемому объекту. Излучающий ультразвуковые волны ПЭП и ПЭП, принимающий ультразвуковой сигнал после прохождения его через контролируемое изделие, располагаются соосно на противоположных поверхностях изделия. При теневом методе ультразвуковой дефектоскопии о наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды ультразвуковых колебаний, прошедших через контролируемое изделие. К положительным сторонам теневого метода можно отнести высокую помехоустойчивость и отсутствие высоких требований к состоянию шероховатости поверхности контролируемого изделия.

На основе теневого метода была разработана методика ультразвукового контроля качества сварных швов твэлов ВВЭР-1000, изготовленных с помощью контактно-стыковой сварки (КСС). Измеряемым параметром этого контроля является ширина зоны проплавления циркония после КСС оболочки твэла с его заглушкой, которая не должна быть менее требуемых значений. На рисунке 2.9 представлена схема контроля сварных швов КСС твэла ВВЭР-1000.

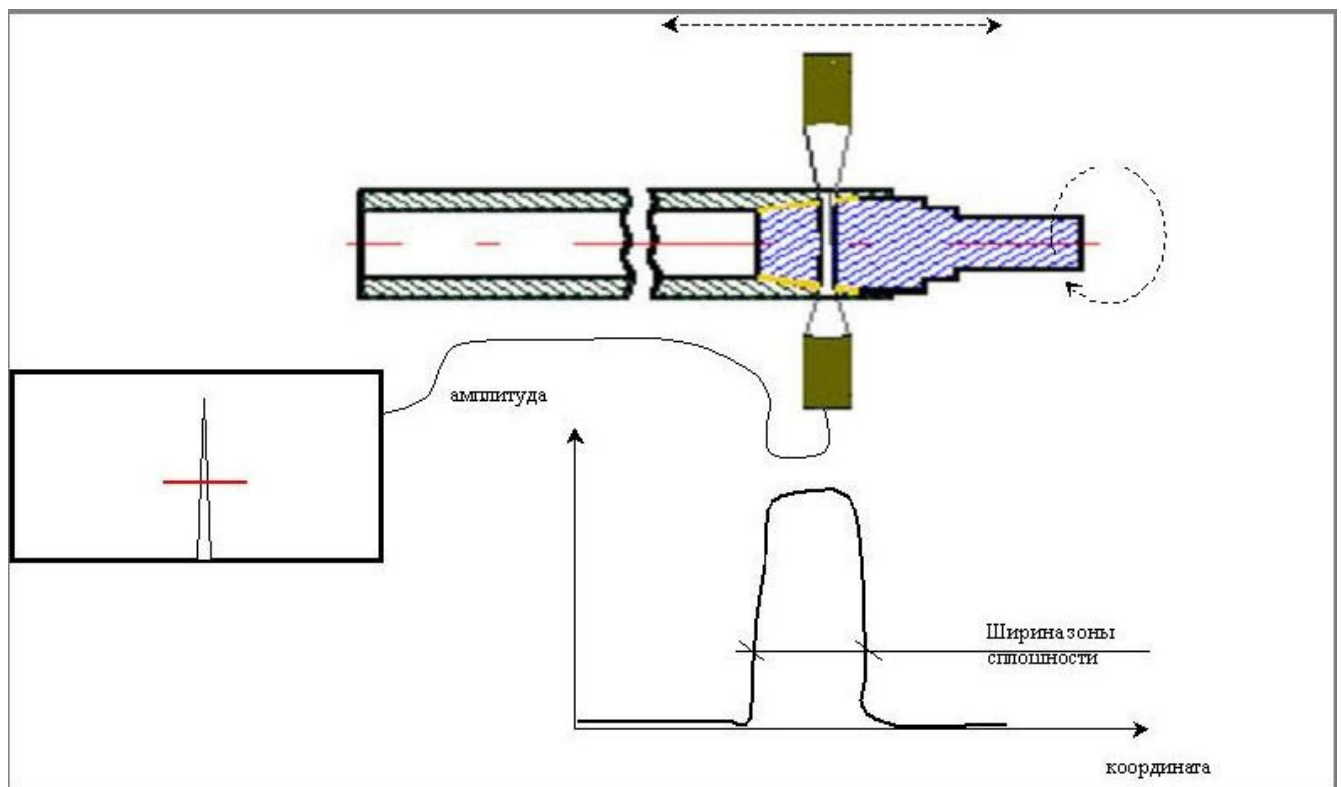


Рисунок 2.9 – Схема ультразвукового контроля сварного шва КСС твэла ВВЭР-1000

На схеме видно, что твэл сканируется в двух направлениях: вдоль оси твэла возвратно-поступательно и вращательно вокруг своей оси. В результате происходит развёртка цилиндрической поверхности твэла в области сварного шва. Максимальный сигнал на принимающий ПЭП поступает в тот момент, когда ультразвуковые импульсы проходят область сварного шва, где поверхности оболочки и заглушки образуют общую проплавленную зону за счёт контактно-стыковой сварки шва. Там же, где поверхности непроварены, происходит ослабление амплитуды ультразвукового сигнала за счёт рассеяния его на границе

двух поверхностей. По ширине участка сигнала с высокой амплитудой можно судить о протяжённости зоны проплавления сварного шва КСС твэла.

Погрешность измерения ширины зоны проплавления составляет не более $\pm 0,1$ мм в диапазоне 1,5-3,0 мм. Данная методика была успешно реализована при разработке автоматизированного комплекса АКС-8, внедрённого на ОАО «НЗХК», для контроля твэлов ВВЭР-1000.

2.2.3 Резонансный метод ультразвукового контроля

Резонансный метод ультразвукового контроля основан на детектировании изменения резонансной частоты УЗК или уменьшении энергии резонансной частоты вследствие наличия дефектов. Исходно определяемая резонансная частота зависит от состава материала и толщины контролируемого изделия.

Данный метод контроля давления гелия в компенсационном объёме твэла ВВЭР-1000 (рисунок 1.2) был использован при разработке автоматизированного комплекса контроля давления гелия в составе технологической линии производства твэлов типа ВВЭР (рисунок 1.8). Возможности ультразвукового резонансного метода измерения давления газа в компенсационном объёме твэла типа ВВЭР были рассмотрены в работах [70, 71]. Величина давления гелия внутри твэла является одним из его основных критических параметров, который определяет ресурс работы твэла в активной зоне реактора и влияет на эксплуатационные характеристики твэла.

Использование прямого измерения давления методом прокола оболочки твэла является разрушающим контролем и имеет выборочный характер, а также большие затраты на его проведение. В связи с увеличением срока эксплуатации твэлов до 5 лет появилась необходимость сплошного контроля гелия внутри твэла, что может быть реализовано только с помощью неразрушающего контроля.

Данный метод измерения давления гелия в твэле ВВЭР-1000 основан на регистрации параметров окружных резонансных колебаний оболочки в области топливного столба. В качестве информативного параметра используется добротность Q_n . Основным принципом данной методики измерения давления служит тот факт, что увеличение давления гелия в твэле приводит к улучшению

акустического согласования между таблетками и оболочкой и к уменьшению добротности последней. Анализ основных особенностей окружных мод показывает, что для наших целей целесообразно использовать нижние гармоники, поскольку они с одной стороны хорошо демпфируются, а с другой - слабо чувствительны к изменению толщины стенки оболочки. Для таких волн в цилиндрической оболочке с тонкими стенками, уравнение резонансных частот f_n имеет вид [71]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E(n^2 + 1) \left[1 + \left(\frac{1}{2Q_n} \right)^2 \right]}{\rho(1 - \nu^2)}} \text{ Гц}, \quad (2.22)$$

где:

R - радиус срединной линии оболочки, м;

n – номер гармоники;

ρ - плотность материала оболочки, кг/м³ ;

ν - коэффициент Пуассона циркония ;

Q_n – добротность резонансной системы.

Добротность Q_n характеризует диссипативные свойства колебательной системы (в нашем случае - участка трубы) при колебании на n -й гармонике:

$$Q_n = \frac{W_n}{2\pi\Delta W_n} \quad (2.23),$$

где W_n – запасенная в трубе колебательная энергия, Н·м, ΔW_n – потери энергии за один период, которые носят аддитивный характер и в нашем случае могут быть представлены в виде

$$\Delta W_n = \Delta W_{1,n} + \Delta W_{2,n} , \quad (2.24)$$

где $\Delta W_{2,n}$ – потери энергии на излучение в таблетки через газовый зазор;

$\Delta W_{1,n}$ – остальные потери, включающие внутреннее трение в оболочке, излучение вдоль образующей трубы, влияние демпферов и т.п., которые с паразитными.

Для оценки Q_n воспользуемся первой системой электромеханических аналогий.

На рисунке 2.10 показана эквивалентная электрическая схема механической колебательной системы «оболочка – зазор – столб таблеток» вблизи резонансной частоты оболочки.

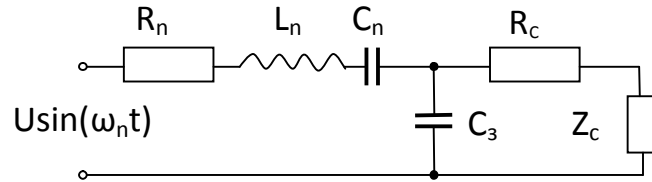


Рисунок 2.10 – Эквивалентная электрическая схема (механической колебательной системы «оболочка – зазор – столб таблеток») вблизи резонансной частоты оболочки.

С помощью пьезопреобразователя в оболочке возбуждаются гармонические колебания, что отражено входным напряжением $U \sin(\omega_n t)$. Резонансные свойства оболочки на n -й гармонике ω_n можно описать колебательным контуром, состоящим из активного сопротивления R_n , индуктивности L_n и емкости C_n , причем $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}}$, а добротность контура (добротность оболочки без таблеток) $Q_n = \frac{\omega_n L_n}{R_n}$. Жесткость зазора характеризуется шунтирующей емкостью C_3 . Акустические свойства топливного столба представим в виде суммы активного R_c и реактивного сопротивлений Z_c . Особенностью схемы является то, что контур, характеризующий оболочку, слабо связан с топливным столбом, т.е. модуль акустического сопротивления зазора

$$|Z_3| = \frac{1}{\omega_n C_3} \sim R_n \ll \omega_n L_n.$$

Тогда влияние топливного столба на резонансные свойства оболочки можно оценить вносимым активным сопротивлением

$$R_B = \frac{Z_c^2 R_c}{(R_c + |Z_c|)^2}, \quad (2.25)$$

а добротность оболочки с таблетками станет выражается как

$$Q_n = \frac{\omega_n L_n}{R_n + R_B} \quad (2.26)$$

или окончательно для величины, обратной добротности:

$$Q_n^{-1} = \frac{R_n}{\omega_n L_n} + \frac{Z_C^2 R_C}{(R_C + |Z_C|)^2} \cdot \quad (2.27)$$

При этом резонансная частота оболочки практически не изменяется и описывается формулой (2.22). Таким образом, увеличение давления в твэле изменяет импеданс зазора Z_z , что согласно формуле (2.27) приводит к уменьшению добротности оболочки Q_n . Акустическое сопротивление зазора Z_z можно представить в виде

$$Z_z = \frac{Pf(d_o, d_T, HV_o, \varepsilon)}{j\omega_n},$$

где P – давление газа, а функция f зависит от диаметров оболочки d_o и таблетки d_T , а также твердости оболочки HV_o и состава газа ε . Тогда формулу (2.27) можно представить в виде

$$Q_n^{-1} = \frac{R_n}{\omega_n L_n} + \frac{P^2 f^2 R_C}{(R_C + |Z_C|)^2 \omega_n^2} = Q_{1,n}^{-1} + Q_{2,n}^{-1} \quad (2.28)$$

Первое слагаемое в (2.28) характеризует относительные потери колебательной энергии в оболочке без таблеток (2.24). Второе слагаемое описывает относительные потери через газовый зазор в топливный столб. Из (2.28) следует, что при малых давлениях ($Q_{1,n} > Q_{2,n}$) основную роль играют паразитные потери. В области давлений, где $Q_{1,n} < Q_{2,n}$ потери будут пропорциональны P^2 .

Методика ультразвукового резонансного метода реализована в разработке автоматизированного комплекса типа УЗКД для контроля твэлов ВВЭР-1000 и внедренного в эксплуатацию на ПАО «НЗХК» для сплошного контроля в технологической линии производства твэлов ВВЭР-1000. Погрешность измерения гелия под оболочкой твэла ВВЭР-1000 не более $\pm 0,05$ МПа в диапазоне 1,5-2,5 МПа.

2.3 Оптические методы контроля

Оптические методы контроля основаны на взаимодействии оптического излучения с материалом объекта контроля, в результате которого изменяются пространственно-временные распределения амплитуды, фазы, поляризации и степени когерентности электромагнитной волны. Эти изменения проявляются в виде интерференции, отражения, рассеяния, поглощения, дифракции или дисперсии волн. По методу регистрации излучения оптические методы контроля можно разделить на две группы: визуально-измерительные и электронно-измерительные.

Первая группа в качестве детектора светового потока использует человеческий глаз. Вторая группа использует различные электронные системы от простейших фотоэлементов до сложных фоточувствительных матриц. Электронно-оптические системы получили название систем технического зрения и в последнее время переживают период бурного развития за счёт появления высокочувствительных оптических матриц большого разрешения и компьютеров с высокой скоростью обработки цифровой информации и большой оперативной и постоянной памятью.

Этот фактор определил возможность применения оптических методик для сплошного контроля некоторых критических параметров твэлов и ТВС для замены выборочного визуально-измерительного и механического контактного контроля этих параметров. Вопросам применения электронно-оптических систем для контроля геометрических параметров твэлов и ТВС посвящены работы [19, 29, 72]. Наиболее актуальным является высокопроизводительный контроль геометрических размеров твэлов и элементов ТВС реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, в технологических линиях производства этих твэлов, который можно осуществить только с помощью систем технического зрения. Большое значение имеет возможность осуществления автоматизированного контроля дефектов наружной поверхности твэла ВВЭР-1000. Рассмотрим применение различных оптических методов для измерения критических параметров твэлов типа ВВЭР.

2.3.1 Теневой и дифракционный оптические методы

Наиболее распространённым оптическим методом для измерения геометрических размеров объекта является теневой метод, который основан на поглощении светового излучения контролируемым изделием и получении его теневого изображения на детекторе излучения. Тепловыделяющие элементы реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 имеют вид труб (диаметром 9 мм и длиной от 2,5 до 4 м), заполненных топливными таблетками из диоксида урана, с заглушками на концах труб (рисунок 1.2). Геометрические размеры твэла, которые подлежат сплошному контролю, влияют на собираемость топливной сборки и на эксплуатационные характеристики топливной сборки в реакторе, влияющие на безопасность его работы. К ним относятся диаметр твэла, длина твэла, прогиб твэла на длине 250 мм и несоосность оболочки с заглушкой. Все эти параметры можно измерить с помощью теневого оптического метода. Для этой цели была разработана конструкция трёх видов первичных преобразователей (теневого датчиков), на основе которых создан автоматизированный комплекс «РАЗМЕР», который успешно решает задачу комплексного контроля геометрических размеров твэлов реакторов типа ВВЭР на ПАО «НЗХК» [73]. Также успешно применяется теневой оптический метод для сплошного контроля геометрических размеров твэлов промышленных реакторов, которые имеют цилиндрическую форму. Разработаны и внедрены в эксплуатацию автоматизированные комплексы типа «БЛИК» и «БЛОК», работающие в составе технологических линий производства твэлов на ПАО «НЗХК» [19, 29].

Дифракционный оптический метод контроля основан на анализе дифракционной картины, получаемой при взаимодействии когерентного оптического излучения с объектом контроля. Этот метод взят за основу для разработки бесконтактного контроля дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000. Для измерения всех геометрических параметров дистанционирующей решетки необходимо провести более 2000 измерений. Методы контактного контроля этих параметров не позволяют обеспечить сплошной контроль

дистанционирующих решёток в технологическом процессе их изготовления ввиду их низкой производительности измерения.

Применение дифракционно-оптических элементов (ДОЭ) на основе решёток Дамманна и алгоритма многоточечного структурного освещения объекта позволило разработать автоматизированный комплекс контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток типа «РЕШЁТКА». На рисунке 2.11 представлена схема дифракционно-оптического метода измерения геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000.

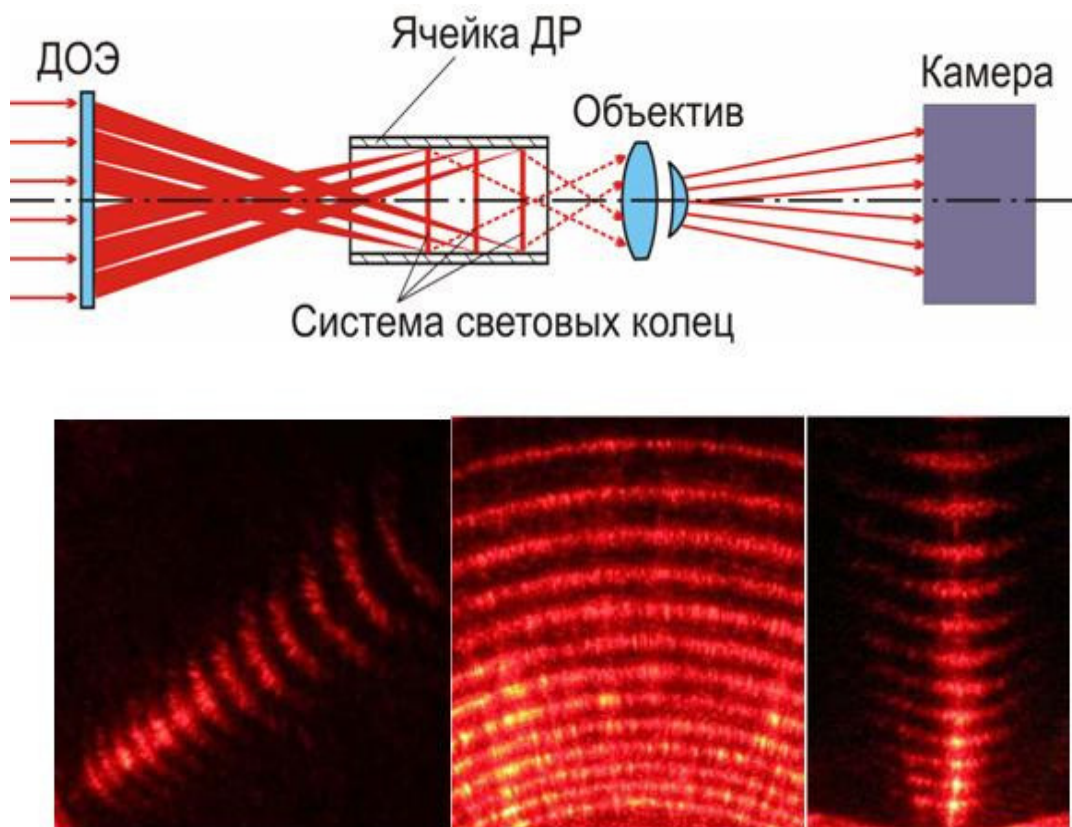


Рисунок 2.11 – Схема дифракционно-оптического метода контроля геометрических размеров ячеек дистанционирующих решёток

Автоматизированные комплексы типа «РЕШЕТКА» успешно внедрены в эксплуатацию в технологическом процессе производства дистанционирующих решеток для ТВС ВВЭР-1000 на ПАО «НЗХК». Более подробно алгоритмы

функционирования и конструкция вышеупомянутых комплексов будут представлены в следующих главах.

2.3 2 Интерференционный оптический метод

Интерференционный оптический метод применяется для высокоточных, прецизионных измерений размеров объектов различного вида. Особенно он эффективен для измерения малых поверхностных дефектов или микронеровностей поверхности (шероховатости). В работе [37] авторами предлагается метод полизональной интерференции для контроля глубины механических дефектов наружной поверхности твэла ВВЭР-1000. Использование этого метода позволяет проводить оценку глубины дефекта на основе одной дифференциальной интерферограммы и не проводить сканирование по всей глубине для восстановления полного профиля дефекта. Для проведения измерения используется оптическая схема интерферометра Майкельсона, реализованная в измерительном блоке, изображенном на рисунке 2.12.

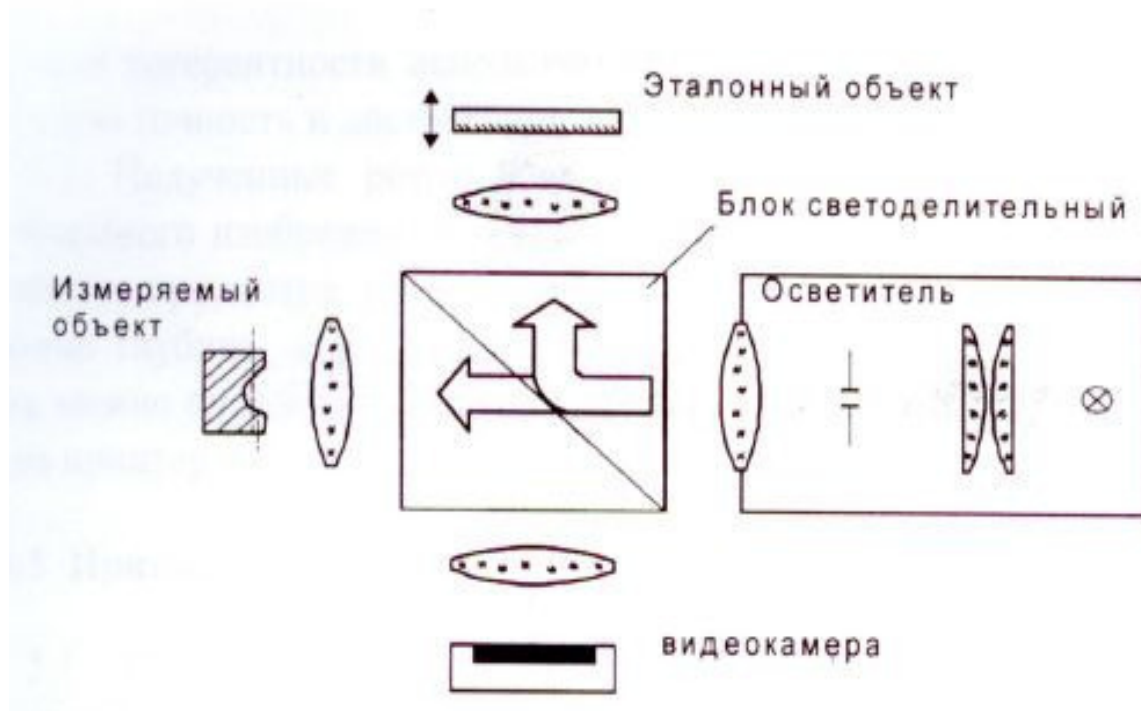


Рисунок 2.12 - Схема оптическая функциональная измерительного блока

Контролируемое изделие помещается в измерительное плечо интерферометра. Сколлимированный пучок частично когерентного света, выходящий из осветителя, с помощью светоделителя делится на две части. Одна часть попадает на опорное плечо интерферометра и освещает эталонный объект (опорное зеркало). Профиль фазы световой волны, отражённой этим объектом, определяется профилем его поверхности. Поверхность контролируемого изделия освещается другой частью светового пучка. В этом случае профиль фазы световой волны, отражённой от поверхности измеряемого изделия, определяется формой этой поверхности.

Волны света, отражённые от эталонного объекта и контролируемой поверхности, интерферируют в плоскости видеокамеры. Интерференция частично-когерентных (по времени) световых волн наблюдается при разности фаз, не превышающей длины когерентности. Таким образом, условию существования когерентности удовлетворяет слой в зоне измерения, толщина которого приблизительно равна длине когерентности. Для полихроматического излучения длина когерентности находится по формуле

$$L_k = \frac{\lambda_c^2}{2\Delta\lambda}, \quad (2.29)$$

где L_k - длина когерентности, $\Delta\lambda$ - ширина спектра источника, λ_c - средняя длина волны. Очевидно, что чем меньше длина когерентности, тем точнее можно локализовать зоны интерференции. Из формулы (2.29) видно, что предпочтительней тепловой источник света, имеющей широкий спектр излучения. Так для лампы накаливания расчет длины когерентности даёт значение близкое к 3 мкм. Это означает, что зона интерференции вдоль оси Z будет локализована в слое $\Delta Z = 3$ мкм. Погрешность измерения профиля будет определяться погрешностью фиксации зон интерференции.

Средняя часть слоя совпадает с проекцией эталонной поверхности в зоне измерения и показана на рисунке 2.13 штрих-пунктирной линией. Её положение определяется равенством длин оптических путей опорного и измерительного плечей интерферометра. Для непрозрачных, металлических объектов положение и поперечная конфигурация зоны интерференции на ПЗС-матрице видеокамеры будет

определяться пересечением проекции поверхности эталонного объекта (в зоне измерения) с поверхностью измеряемого дефекта в соответствии с рисунком 2.13.

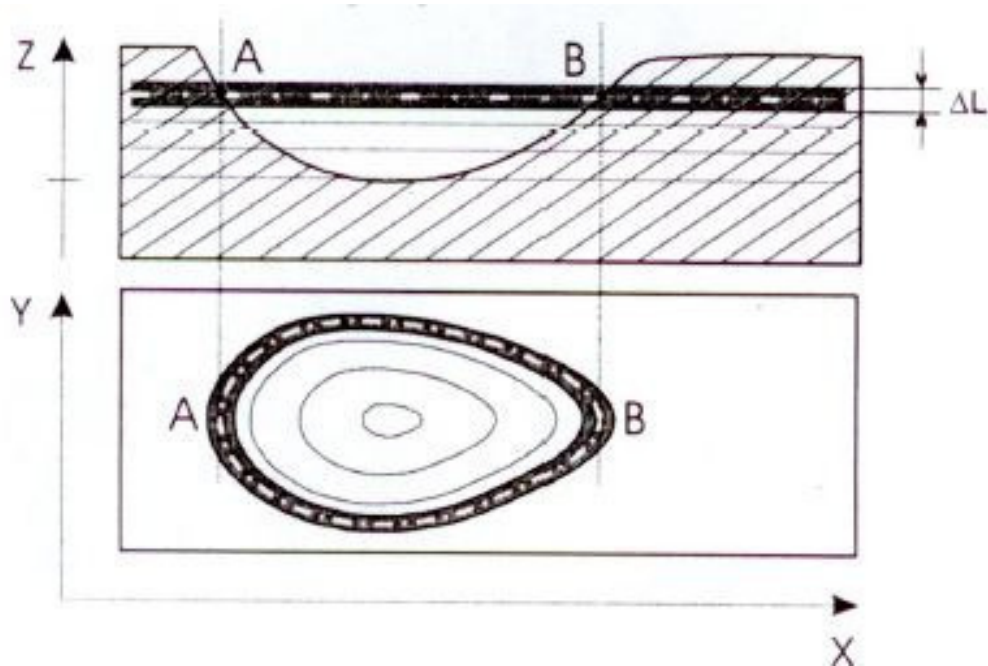


Рисунок 2.13 – Пересечение эталонной поверхности с поверхностью измеряемого дефекта в зоне измерения

Это пересечение и определяет изолинию дефекта, соответствующую данной глубине вдоль оси Z , т.е. в направлении падающего на дефект светового пучка. Регистрация интерференции видеокамерой позволяет восстановить соответствующую изолинию. Для восстановления профиля всей поверхности, находящейся в зоне контроля, необходимо с определённым шагом изменять взаимное расположение измеряемой поверхности дефекта с блоком интерферометра, выделяя при этом изолинию глубины для каждого шага. Имея набор изолиний (по одной для каждого шага), можно программным путём восстановить объёмное изображение измеряемой поверхности и отобразить его на экране монитора. Последняя изолиния определяет максимальную глубину рельефа или дефекта поверхности, находящейся в зоне контроля.

Данный метод измерения глубины дефекта поверхности твёрдого тела является прямым методом измерения, при котором регистрируются непосредственно координаты

точек поверхности, находящейся в зоне измерения. Малая длина когерентности применяемого источника света позволяет получить высокую точность измерения глубины дефектов наружной поверхности твэла. Кроме трехмерной модели дефекта, на экран монитора можно выводить карту изолиний глубины дефекта, а также профиль выбранного сечения поверхности дефекта, по которому можно определить его геометрические размеры. Значение погрешности измерения глубины дефекта не превышает значения ± 3 мкм.

Рассмотренная методика низкокогерентного интерференционного оптического измерения дефектов наружной поверхности твэла типа ВВЭР реализована в автоматизированном комплексе «ПРОФИЛЬ», который внедрен в эксплуатацию на ПАО «НЗХК». В работах [21, 74] рассмотрены вопросы применения АКК «ПРОФИЛЬ» в технологическом процессе производства для сплошного контроля внешнего вида наружной поверхности твэлов типа ВВЭР.

2.4 Электромагнитные методы контроля

Электромагнитный метод контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте [75]. Плотность вихревых токов в материале объекта зависит от его геометрических и электромагнитных параметров, а также от взаимного расположения измерительного вихретокового преобразователя (ВТП) и объекта.

В качестве преобразователя используют индуктивные катушки (одну или несколько). Обычно конструкция ВТП содержит возбуждающую катушку и одну или несколько измерительных катушек. Синусоидальный или импульсный ток, действующий в катушках ВТП, создаёт электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем материале. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки индуктивности преобразователя, наводя в них ЭДС или меняя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на выходе измерительных катушек или их

сопротивление, можно получить информацию о свойствах объекта или расположении ВТП относительно контролируемого объекта. ЭДС или сопротивление преобразователя зависят от многих параметров объекта контроля. Это является достоинством и одновременно создаёт трудности для реализации вихретокового метода контроля.

Вихретоковый метод обладает возможностью осуществления бесконтактного контроля материалов и изделий. Данный метод даёт возможность реализации высокой скорости проведения контроля объекта, что позволяет разработать на его основе высокопроизводительные автоматизированные комплексы.

Другими положительными свойствами вихретокового метода контроля являются его высокая устойчивость к изменению условий эксплуатации: влажности, давления, радиационного фона, а также простота конструкции ВТП. В связи с этим вихретоковый метод контроля получил распространение для измерения различных поверхностных и подповерхностных дефектов материалов, различных изделий, а также для измерения толщины покрытий на электропроводящих изделиях. Известно применение вихретокового метода для обследования твэлов и ТВС после реакторных испытаний, для дефектоскопии циркониевых труб во время их производства. Мы рассмотрим применение вихретокового метода контроля для обнаружения дефектов наружной поверхности твэлов типа ВВЭР и контроля содержания оксида гадолиния в таблетках снаряженного твэла ВВЭР-1000.

2.4.1 Контроль дефектов внешнего вида поверхности твэла

Одним из самых опасных событий при эксплуатации ТВС в реакторе является разгерметизация твэлов, которая может произойти вследствие некачественных сварных соединений, либо из-за нарушения целостности оболочки. Учитывая, что толщина оболочки твэла ВВЭР-1000 не превышает 0,67 мм, а длительность его эксплуатации может достигать 5 лет, очень важным является фактическое состояние поверхности циркониевой оболочки, ввиду того, что в течение эксплуатации может происходить её утонение за счёт коррозии и

износа, связанного с контактом теплоносителя с наружной поверхностью твэла. С целью выявления дефектов наружной оболочки твэла в ТУ предусмотрен штатный визуальный контроль снаряжённых твэлов операторами технического контроля. Контроль производится выборочно и вручную с помощью специальных осветителей и оптических принадлежностей. Данная операция контроля очень трудоёмка и носит субъективный характер. Помимо того, она вредна для здоровья персонала, т.к. постоянное напряжение глаз оператора ОТК в течение всей смены может привести к преждевременному ухудшению зрения.

В этой связи, задача внедрения сплошного автоматизированного контроля дефектов наружной поверхности оболочки твэла является актуальной как для достижения высокого качества твэлов и их эксплуатационной надёжности, так и для улучшения условий труда технологического персонала. Далее рассмотрим технические требования для проведения автоматизированного контроля механических дефектов поверхности оболочки твэлов ВВЭР-1000.

В ТУ на твэл определены следующие требования к контролю дефектов:

- вероятность выявления дефектов глубиной 0,05 мм не менее 0,95 для риски поперечной и продольной протяжённостью 3 мм с углом раскрытия 60° и сферической вмятины радиусом 10 мм;
- производительность (скорость перемещения твэла) контроля не менее 180 мм/с.

Таким образом, дефекты в виде сдиров, царапин выявляются как различные комбинации рисков поперечных и продольных, что позволяет изготовить и аттестовать стандартные образцы этих рисков нужной глубины. Столь высокую производительность контроля при его необходимой точности можно достичь с помощью вихретоковой методики обнаружения механических дефектов наружной поверхности оболочки твэла.

Возможности вихретокового метода контроля механических дефектов твэлов типа ВВЭР были исследованы в работе [46]. Основной проблемой является разработка измерительного блока вихретоковых преобразователей, который сможет обеспечить необходимую точность и производительность контроля. Для этого необходимо определить нужный диапазон частоты электромагнитного излучения

катушек возбуждения. Известно, что чем выше частота возбуждения, тем на меньшую глубину проникает электромагнитное излучение, создавая вихревые токи электропроводящем слое. Глубину проникновения вихревых токов можно выразить следующим соотношением:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma\mu_0}}, \quad (2.30)$$

где:

μ - относительная магнитная проницаемость циркония;

μ_0 - магнитная постоянная;

ω - круговая частота переменного тока;

σ - удельная электрическая проводимость циркония.

На графике (рисунок 2.14) изображена зависимость глубины проникновения вихревых токов в материал циркония от частоты.

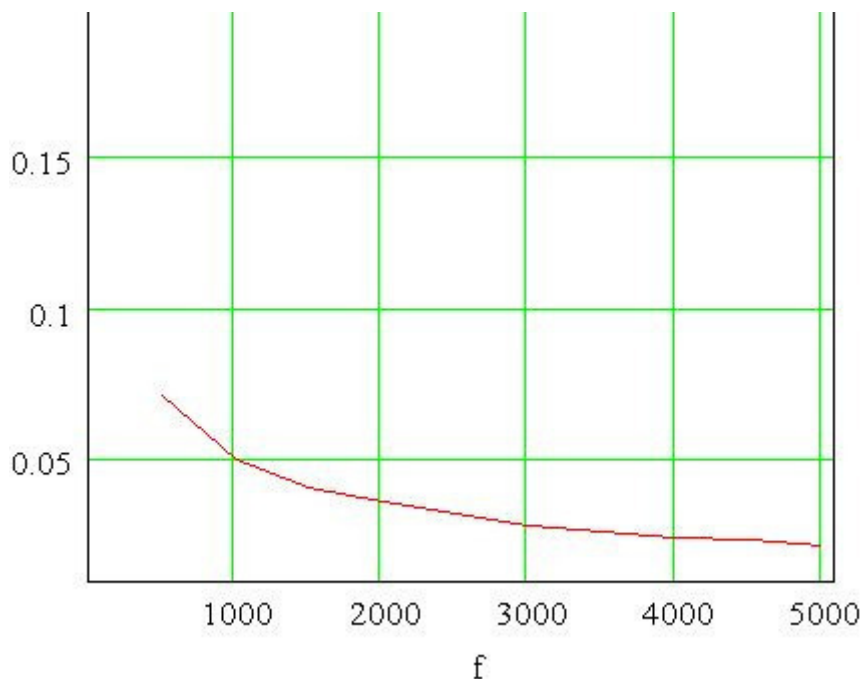


Рисунок 2.14 – Зависимость глубины (мм) проникновения в цирконий вихревых токов от частоты (Гц) электромагнитного излучения

Из графика видно, что на частоте примерно 1 кГц глубина проникновения вихревых токов в цирконий составляет около 50 мкм, эта величина является браковочным

значением для механических дефектов наружной поверхности твэла. Конструкция блока первичных преобразователей для контроля внешнего вида твэлов ВВЭР-1000 была разработана специалистами фирмы ИНТРОН-ПЛЮС [47]. Блок состоит из двух накладных первичных преобразователей, которые вращаются вокруг оси твэла во время его поступательного движения. На основе этого измерительного блока был разработан автоматизированный комплекс контроля внешнего вида твэлов ВВЭР-1000 типа «ВИТОК». На рисунке 2.15 представлена общая функциональная схема АКК «ВИТОК». АКК «ВИТОК» внедрен для сплошного контроля механических дефектов наружной оболочки твэлов ВВЭР-1000 в технологической линии типа СТ-60 на ПАО «НЗХК».

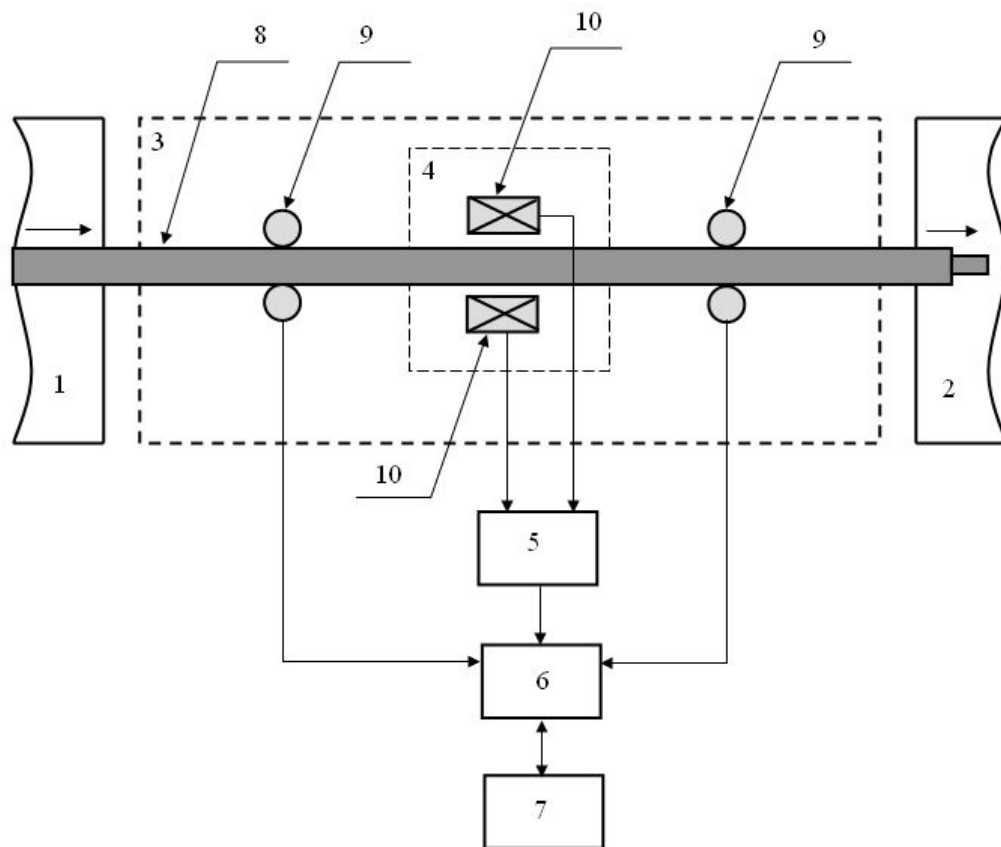


Рисунок 2.15 – Функциональная схема АКК «ВИТОК»

1, 2 – входной и выходной транспортные модули АКК, 3 – механический блок, 4 – вихретоковый контрольный блок, 5 – блок предварительной обработки, 6 – система обработки и управления, 7 – шкаф управления линией контроля, 8 – контролируемый твэл, 9 – преобразователь угловых перемещений, 10 – вихретоковые преобразователи.

2.4.2 Контроль содержания оксида гадолиния в твэле

Одним из перспективных направлений в области совершенствования современного ядерного топлива являются работы по широкому применению в составе топливной таблетки так называемых «выгорающих поглотителей». Одним из них является оксид гадолиния (Gd_2O_3), который имеет сечение резонансного захвата тепловых нейтронов. Вопросы применения оксида гадолиния в легководных реакторах рассмотрены в работе [42]. Твэлы с таблетками, содержащими оксид гадолиния располагаются в активной зоне реактора наряду с твэлами без оксида гадолиния, их количество может быть различно в зависимости от конструкции тепловыделяющей кассеты.

Также может производиться профилирование твэла по высоте таблетками разного обогащения по гадолинию. Присутствие в активной зоне реактора твэлов с урановыми таблетками, имеющими в своём составе оксид гадолиния, положительно сказывается на работе реактора. Прежде всего, происходит более равномерное «выгорание» ядерного топлива, несмотря на неравномерное распределение нейтронного потока в активной зоне, следовательно, происходит более равномерное тепловыделение по периметру и высоте активной зоны. Это во многом обеспечивает безопасность работы реактора и более полное выгорание ядерного топлива. В связи с этим улучшаются технико-экономические показатели работы ТВС. Применяемое обогащение по гадолинию варьируется в диапазоне от 0 – 8 % массовых долей.

Очень важно, чтобы при снаряжении твэла таблетки с нужным обогащением находились в правильном положении внутри топливного столба, и не было таблеток с обогащением оксида гадолиния внутри топливного столба не в соответствии ТУ. Отсюда вытекает задача о необходимости контроля обогащения оксидом гадолиния топливных таблеток в снаряжённом твэле. Поставленную задачу можно решить с использованием методов неразрушающего контроля. Подробный обзор возможных методов контроля для реализации данной цели проведен в работе [43]. Наиболее перспективным методом контроля оксида гадолиния в твэле для сплошного контроля в технологическом процессе признан вихретоковый метод.

Для его реализации необходимо иметь в топливных таблетках низкое содержание ферромагнитных включений, либо исключить их влияние на процесс измерения. В работах [33, 44] рассмотрены результаты использования комплекса вихретокового контроля оксида гадолиния в твэлах на испанском заводе ENUSA (Испания). В применяемом комплексе вихретокового контроля используется дифференциальная методика измерения: один канал измерительный, через который сканируется контролируемый твэл, а второй опорный и в его катушке располагается пустая циркониевая оболочка. Для подавления помех, которые создают ферромагнитные примеси в таблетке, измерительный канал помещается в сильное постоянное магнитное поле. Постоянное магнитное поле приводит ферромагнитные примеси в состояние гистерезиса или «насыщения» и они уже не влияют на изменение полезного сигнала. Технические данные комплекса: производительность контроля 1м/мин., погрешность измерения содержания оксида гадолиния составляет $\pm 1\%$ массовых долей с доверительной вероятностью 0,95.

Технические требования по контролю содержания оксида гадолиния в топливных таблетках в твэлах для реактора ВВЭР-1000 даны в технических условиях, где определена погрешность определения содержания оксида гадолиния в таблетке снаряжённого твэла не хуже $\pm 0,4\%$ с доверительной вероятностью 0,95.

Столь жесткое требование определяется тем, что предполагаемый ряд используемых обогащений гадолиния весьма плотный, в настоящее время применяются обогащения 8% , 5% и предполагается 3,35%. Конструкция твэла (рисунок 1.2) представляет собой циркониевую трубку диаметром 9,1 мм, длиной от 3,8 м до 3,9 м, заполненную топливными таблетками. Нижняя и верхняя заглушка приварена контактно-стыковой сваркой, причём если к нижней заглушке таблетка установлена вплотную, то к верхней заглушке подходит пружинный фиксатор, который упирается в последнюю таблетку, образуя тем самым компенсационный объём, который перед сваркой заполняют гелием давлением 18- 23 кг/см².

Для реализации метода вихретокового контроля содержания гадолиния в твэлах ВВЭР-1000 необходимо существенно снизить влияние на результаты измерения пружинного фиксатора, примыкающего к топливному столбу, чтобы добиться

приемлемой точности измерения. Были проведены исследования и разработаны экспериментальные образцы установок контроля специалистами Всероссийского научно-исследовательского института неорганических материалов (ВНИИНМ) и Томского института неразрушающего контроля (ИНК). Анализ результатов испытаний представлен в работе [45]. На рисунке 2.16 представлена функциональная схема установки для контроля содержания оксида гадолиния в топливном столбе твэла. Магнитная система, в которой находится измерительная катушка, изготовлена из магнитов на основе сплава 30Д8Р на основе редкоземельных элементов (неодим-диспрозий-бор). Напряженность магнитного поля выбирается в диапазоне 1200-1400 кА/м., а частота возбуждающего электромагнитного излучения – в диапазоне 9-12 кГц.

На рисунке 2.17 изображена конструкция проходного первичного преобразователя измерительного блока.

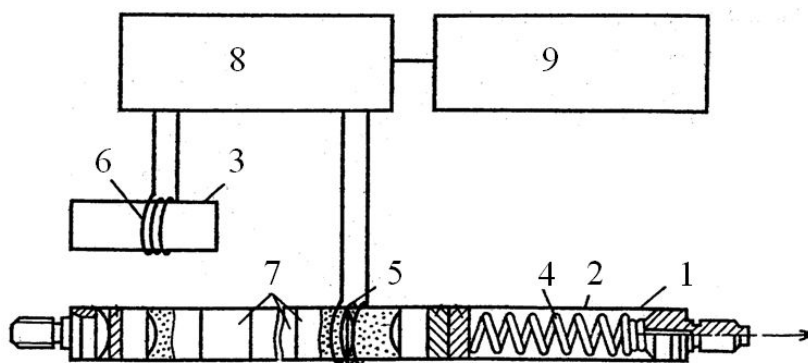


Рисунок 2.16 – Функциональная схема измерительной позиции
1 – твэл; 2 – циркониевая оболочка; 3 – фрагмент оболочки; 4 – пружинный фиксатор; 5 – измерительная катушка; 6 – компенсационная катушка; 7 – топливные таблетки; 8 – вихретоковый дефектоскоп; 9 – компьютер.

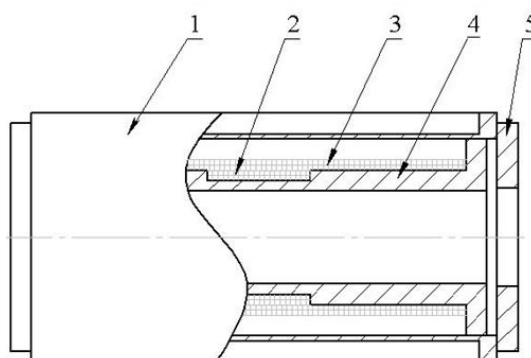


Рисунок 2.17 – Конструкция первичного преобразователя измерительного блока

1 – корпус; 2 – вторичная обмотка; 3 – первичная обмотка; 4 – каркас измерительных обмоток; 5 – крышка преобразователя.

На рисунке 2.18 представлен вид выходного сигнала при контроле твэла с урановыми таблетками, содержащими 5% оксида гадолиния. Падение уровня сигнала связано с зазором между таблетками, а крайний пик слева обусловлен влиянием пружинного фиксатора.

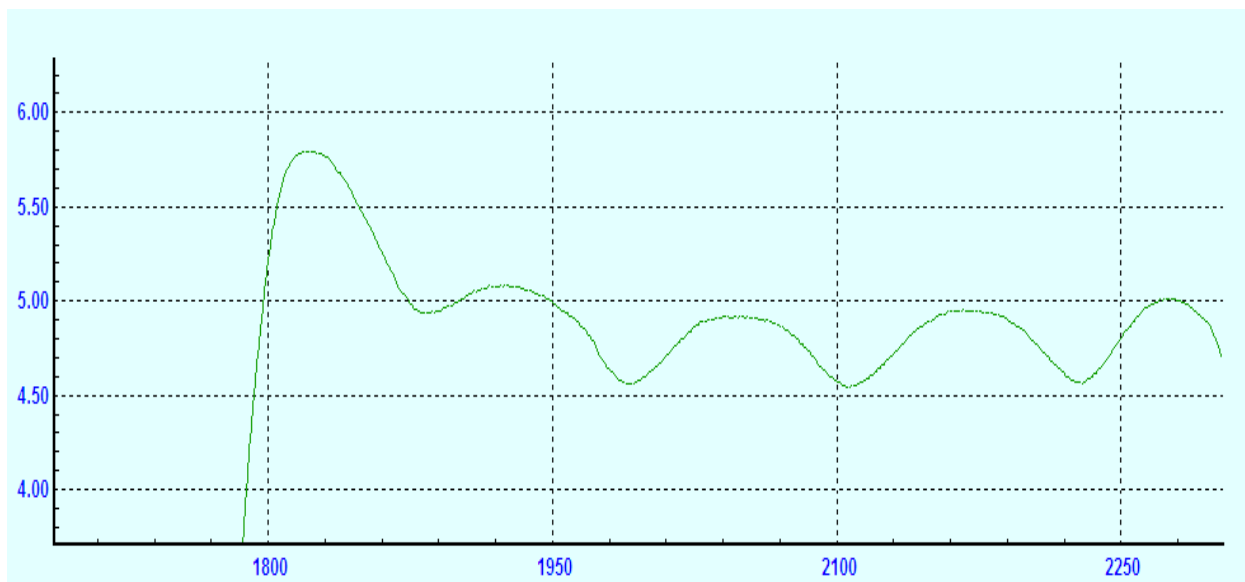


Рисунок 2.18 - Выходной сигнал с вихретоковой измерительной позиции при контроле твэла с таблетками с 5% содержанием оксида гадолиния

Экспериментальные образцы для контроля содержания гадолиния в таблетках твэла ВВЭР-1000, рассмотренные в работе [45], были использованы для отработки технологического процесса производства твэлов ВВЭР-1000 на ПАО «НЗХК».

2.5 Тепловые методы контроля

Тепловой метод контроля основан на регистрации и анализе температурного рельефа объекта контроля. В случае создания в объекте контроля теплового потока за счёт внешнего источника, температурный рельеф будет отражать внутреннюю структуру объекта контроля. Этот принцип заложен в основу тепловой дефектоскопии и контроля неоднородности теплофизических параметров [76]. Для возникновения теплового потока необходимо наличие температурного градиента, определяемого первой производной температуры по нормали к изотермической поверхности. Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$q_n = -\lambda^t \cdot \text{grad}T, \quad (2.31)$$

где q_n - плотность теплового потока, λ^t - коэффициент теплопроводности, $\text{grad}T$ выражается через градиент внутренней энергии тела W_t как

$$\text{grad}T = (c_B \cdot \gamma_B)^{-1} \text{grad}W_t, \quad (2.32)$$

где c_B - удельная теплоемкость объекта контроля; γ_B - плотность объекта.

Параметры λ^t, c_B, γ_B определяют теплофизические свойства объектов, их способность аккумулировать и передавать тепловую энергию. Изменение этих параметров в локальной области объёма объекта контроля может характеризовать наличие дефекта или изменение физико-механических свойств объекта контроля. Температурный отклик на тепловое воздействие регистрируется термочувствительными датчиками, которые могут быть установлены внутри объекта контроля, либо на его поверхности. Возможности теплового метода были использованы для разработки методики контроля давления гелия внутри твэла типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-440.

В разделе 2.2.3 мы рассмотрели резонансную методику ультразвукового контроля давления гелия в твэлах этого типа. Рассмотрим подробнее тепловую методику контроля этого критического параметра. Примерно в одно и то же время в институтах ВНИИНМ и ВНИИТФА, которые входят в структуру Росатома, были разработаны методики теплового контроля давления гелия внутри твэла типа ВВЭР. Эти методики принципиально не отличались друг от друга, основное

отличие заключалось в применении различных термочувствительных датчиков и в алгоритме обработки информации.

Основные положения методики теплового контроля давления гелия внутри твэла изложены в работах [38 – 39, 41]. Современные требования, предъявляемые к данному контролю, можно сформулировать кратко следующим образом:

- диапазон измеряемых давлений составляет 1,8 – 2,3 МПа;
- погрешность измерения не хуже $\pm 0,1$ МПа с доверительной вероятностью 0,95;
- вид контроля - сплошной, т.е. 100% выпускаемых твэлов.

Производительность зависит от конкретного исполнения и конструкции измерительного устройства, но не должна быть ниже 60 твэлов в час. На рисунке 2.19 приведена схема измерения давления в твэле.

В локальной области газосборника твэла создаётся нормированное тепловое возмущение оболочки, которое приводит к возникновению в замкнутом газовом объёме твэла естественной конвекции и сопутствующих ей термодинамических процессов. Теплообмен нагретой оболочки с газом и окружающей средой зависит от вида газа, его свойств и давления. Регистрируя поле температур оболочки по длине и по времени можно получить информацию об измеряемом параметре.

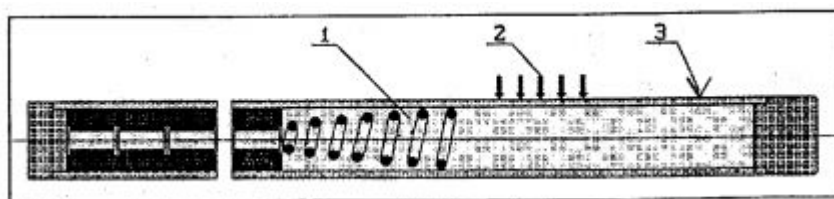


Рисунок 2.19 – Схема измерения давления в твэле

1- компенсационный объём или газосборник; 2- область нормированного теплового возмущения; 3- место измерения прироста температуры оболочки.

Для измерения температуры окружающей среды, а также температуры оболочки до и после воздействия теплового возмущения, используются термочувствительные датчики: терморезисторы или термопары. Источником теплового возмущения служит индукционный нагреватель. Рассмотрим процесс измерения давления гелия

в твэле на примере АКК ДГТ-1. Разность температур регистрируется двумя встречно включенными термопарами. В процессе цикла измерения формируются несколько импульсов нагрева оболочки твэла и выполняется ряд поворотов твэла совместно с термопарами. Измерение температуры проводится в начале и конце интервалов времени (выдержек) после нагрева и поворота. Структурная схема АКК ДГТ-1 представлена на рисунке 2.20.

АКК ДГТ-1 включает в себя четыре функционально и конструктивно законченных устройства: устройство пневматическое распределительное УПР-2, первичный преобразователь ПП-1, генератор индукционного нагрева ГИН-2 и модуль обработки и управления МОУ-1.

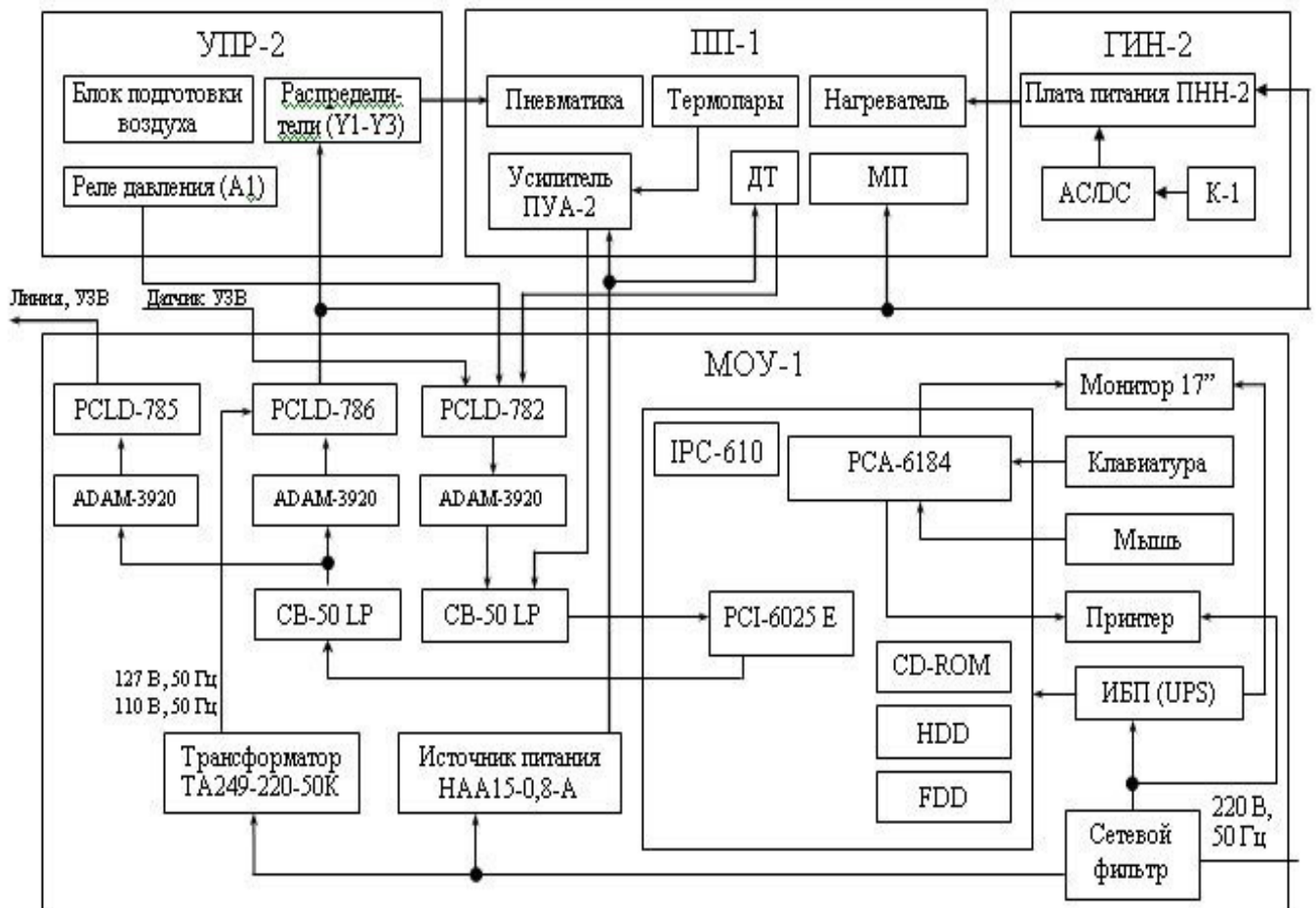


Рисунок 2.20 – Структурная схема автоматизированного комплекса контроля давления в твэле типа ДГТ-1

Устройство пневматическое УПР-2 обеспечивает работу пневматических исполнительных узлов ПП-1 и УЗВ. Оно включает в себя блок подготовки воздуха, три распределителя с электромагнитными катушками (Y1-Y3) и реле давления (A1). Первичный преобразователь ПП-1 осуществляет локальный импульсный нагрев твэла в области компенсационного объема, регистрацию изменений температуры участков оболочки твэла, поворот твэла совместно с термопарами на 180°. ПП-1 включает в себя следующие основные функциональные узлы и устройства: модуль измерения (две термодары, нагреватель, пневматические узлы, цанговый механизм, механизм подъема термодар, узел обдува термодар), усилитель ПУА-2, датчик наличия твэла в ПП-1 (ДТ), механизм поворота (МП).

Генератор индукционного нагрева ГИН-2 формирует высокочастотные высоковольтные импульсы тока для нагрева оболочки твэла. Модуль обработки и управления МОУ-1 осуществляет обработку информации, поступающей с датчиков ПП-1, управление работой АКК ДГТ-1 во всех режимах и связь с технологической линией изготовления твэлов. Градуировочная кривая комплекса представляет собой логарифмическую функцию вида:

$$P = 0,1 [A \ln (V_{др} (C/V_T)^{0,5}) - B], \text{ МПа}, \quad (2.33)$$

где $V_{др}$, мВ – значение напряжения, которое образуется за счёт конвективных потоков газа в компенсационном объёме твэла в;

V_T , мВ – значение напряжения, пропорциональное общему количеству тепла, переданного оболочке твэла генератором в зоне нагрева и дошедшего до точки контроля в мВ;

A, B, C – градуировочные коэффициенты.

Введение параметра $(C/V_T)^{0,5}$ обеспечивает компенсацию интегрального влияния всех факторов, влияющих на теплофизические процессы. Проведённые испытания комплекса на ПАО «НЗХК» в производственных условиях по оценке стабильности измерений во времени, влиянию температуры окружающей среды, положения пружинного фиксатора в твэле подтвердили погрешность измерения давления гелия под оболочкой в твэле ВВЭВ-1000 не хуже $\pm 0,09$ МПа.

В работе [77] проведён сравнительный анализ технических характеристик автоматизированных комплексов контроля давления гелия в твэлах реакторов типа ВВЭР термоиндукционного ДГТ-1 и ультразвукового УЗКД.

2.6 Выводы по второй главе

1. Рассмотрены методы и средства для сплошного контроля основных критических параметров твэлов и ТВС для реакторов различного назначения.

2. Для контроля каждого критического параметра разработаны методики контроля, которые могут обеспечить необходимую точность измерения данного параметра и требуемую производительность контроля.

3. Для контроля некоторых критических параметров используется комплекс различных методик контроля, чтобы обеспечить необходимую достоверность и производительность контроля:

- для контроля недопустимых пор в сварном шве твэла ВВЭР более 200 мкм применяется рентгеновская томография;

- для контроля непровара в корне сварного шва твэла ВВЭР используется ультразвуковая эхо-импульсная методика контроля;

- для обеспечения высокопроизводительного сплошного контроля дефектов внешнего вида твэла ВВЭР применяется вихретоковая методика, которая обеспечивает предварительную разбраковку готовых твэлов, а окончательное измерение отбракованных твэлов проводят с помощью оптической интерференционной методики.

4. Отмечается применение многоканальной структуры АКК для обеспечения необходимой производительности контроля критических параметров твэлов, либо для их комплексного контроля в следующих случаях:

- при радиометрическом контроле толщины слоёв твэлов промышленного реактора;

- при радиометрическом контроле сплошности топливного столба твэлов реакторов ВВЭР;

- при радиометрическом контроле обогащения топливного столба твэлов реакторов ВВЭР;

- при оптическо-электронном контроле геометрических параметров твэлов реакторов ВВЭР.

5. Отмечается преимущество методик, обеспечивающих бесконтактный контроль критических параметров твэлов и ТВС, за счёт их универсальности и высокой производительности контроля.

ГЛАВА 3

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЭЛОВ

В предыдущей главе были рассмотрены основные методы контроля критических параметров твэлов реакторов различного назначения, на основе которых разработаны методики контроля твэлов. Как правило, разработка методики контроля критических параметров твэлов является результатом НИР, в которой должны быть исследованы основные методические вопросы измерения критического параметра твэла в соответствии с требованиями технических условий. В результате выполнения НИР создаётся экспериментальный образец, способный проводить контроль соответствующего параметра твэла в лабораторных условиях или в опытном производстве. Для проведения штатного контроля критических параметров твэла в технологическом процессе производства необходимо создание опытного образца АКК. Для выполнения этой задачи проводится ОКР. В этой главе предлагается рассмотреть основные принципы построения и разработки АКК критических параметров твэлов.

3.1 Требования к контролю критических параметров твэлов

Исходная информация для формулирования требований к контролю критических параметров твэлов находится в разделе технические требования технических условий (ТУ) на твэл. При разработке этого раздела ТУ конструктор-технолог внимательно изучает современное состояние технических средств контроля, которые можно использовать в технологическом процессе производства твэла для контроля его критических параметров. Особое внимание уделяется метрологическим характеристикам технических средств контроля и их

производительности. Как правило, стандартные средства измерения и методики, которые можно использовать для этой цели, не подходят по следующим причинам.

1. Средство измерения способно осуществить контроль критического параметра твэла в нужном диапазоне измерений с требуемой точностью, но с помощью разрушающих методик контроля. В связи с этим, невозможно с помощью таких технических средств осуществить сплошной (100%) контроль выпускаемых твэлов. Возможен выборочный контроль твэлов от всей выпускаемой партии. В основном эти средства и методики измерений относятся к аналитическому контролю. Методики аналитического измерения и контроля относятся к прямым измерениям и их часто используют в качестве арбитражного вида контроля, а самое распространённое применение они получили в процессе изготовления стандартных образцов для автоматизированных комплексов неразрушающего контроля. Можно в качестве примера привести измерение давления гелия внутри твэла методом прокола оболочки с последующим измерением давления газа образцовым манометром, а также измерение пор и непроваров в сварном шве с помощью металлографии полученных шлифов сварного соединения.

2. Средство измерения способно выполнить контроль критического параметра твэла с нужными метрологическими характеристиками, но не может обеспечить необходимую производительность и оперативность измерительного процесса. К таким техническим средствам можно отнести мерительный инструмент (штангенциркули, калибры, индикаторные головки, нутромеры, концевые меры и т.д.), а также средства визуального измерения. Главной особенностью мерительного инструмента является необходимость обеспечения контакта с поверхностью измеряемого объекта. Особенность визуального контроля состоит в том, что чувствительным элементом, обеспечивающим процесс измерения, является человеческий глаз. Контактный способ измерения не способен обеспечить высокую производительность контроля из-за ограничения быстродействия мерительного инструмента, который часто используется вручную. Кроме того, процесс измерения с помощью стандартного мерительного инструмента плохо поддается автоматизации. Визуальный контроль ограничен инерционностью человеческого

зрения, его усталостью, субъективным восприятием процесса измерения, и его также невозможно подвергнуть автоматизации. В качестве примера можно привести различные измерения геометрических параметров твэла (длина, диаметр, прогиб и т.д.). Визуальный контроль применяется для выборочного контроля дефектов внешнего вида наружной поверхности твэла.

Таким образом, для обеспечения сплошного контроля критических параметров твэла необходима разработка и создание АКК, которые будут являться специализированными единичными средствами измерения (СИ). В работе [78] отмечаются основные критические параметры твэла, влияющие на безопасность работы ядерного реактора. Среди них особо выделяются состояние сварных швов и топливного столба твэла, утонение толщины герметизирующих оболочек твэла.

Основные задачи и требования, предъявляемые к АКК критических параметров твэлов можно сформулировать следующим образом:

- осуществление сплошного контроля критических параметров твэла в технологическом процессе на всех стадиях его изготовления;
- согласованность производительности контроля параметров с технологическим циклом изготовления твэла;
- автоматизированный режим контроля параметров и возможность встраивания АКК в АСУКП твэлов, при необходимости в общую АСУТП производства твэлов;
- обеспечение необходимой точности и достоверности измерения критических параметров твэлов;
- обеспечение эксплуатационной надёжности работы комплекса и его ремонтпригодности.

Для успешной реализации этих требований предлагается руководствоваться следующими основными принципами построения АКК критических параметров твэлов.

3.2 Основные принципы построения автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов

АКК критических параметров твэла можно рассматривать как сложную систему, состоящую из группы взаимосвязанных элементов, которые действуют совместно с целью выполнения поставленной задачи. Сложная система характеризуется либо большим количеством составных элементов, либо большим количеством получаемой и перерабатываемой информации [79]. Основные элементы сложной системы можно рассматривать как подсистемы. Подсистемы характеризуются следующими особенностями:

1. Подсистемы могут являться функционально независимыми от самой системы, они связаны с другими подсистемами и обмениваются с ними информацией, а иногда энергией.
2. Подсистемы могут иметь функции и свойства, которые не совпадают со свойствами всей системы.
3. Каждая подсистема может быть подвергнута дальнейшему делению.

Система характеризуется своей структурой, которая определяет внутренние связи между подсистемами или элементами. Здесь следует отметить понятие инфраструктуры, которое описывает взаимосвязь системы с внешним окружением (средой). Существует понятие открытой системы, которая допускает своё расширение и развитие на аппаратном или информационном уровне. Система как объект должна иметь упорядоченный целостный характер. В этой связи становится очевидным, что для исследования и создания сложной системы необходимо руководствоваться системным подходом. Рассмотрим сущность системного подхода более подробно.

3.2.1 Принцип системного подхода

Системный подход отличается от индуктивного (классического) подхода тем, что последний рассматривает систему путём перехода от частного к общему и синтезирует её компоненты, которые разработаны отдельно друг от друга. Системный подход предполагает последовательный переход от общего к частному и

в основе этого процесса лежит конкретная цель. В работах [80–82] рассматривается развитие положений системного подхода для исследования и создания сложных систем в науке и технике. Большое значение он приобрел при разработке различных АСУ производством или АСУТП. Ранее мы отмечали, что АКК параметров твэла можно рассматривать как локальную подсистему (базовый элемент) АСУКП твэлов, которая входит в общую АСУТП производства твэлов [4–5].

Системный подход предусматривает проведение декомпозиции системы (объекта проектирования) на ключевые подсистемы и дальнейшего его исследования их свойств и связей в зависимости от поставленной цели перед объектом. Системный подход требует рассмотрения большого количества разнообразных связей, не только внутренних, между подсистемами, но и внешних, с окружающей средой (инфраструктурой). Применяя системный подход к проектированию и разработке АСУКП твэлов, рекомендуется руководствоваться следующими положениями.

1. Положение о максимуме эффективности. Критерием эффективности является технико-экономический эффект, достигаемый в результате функционирования системы в технологическом процессе в сравнении с затратами на создание системы. Методики расчёта могут быть различны в зависимости от вида технологического процесса.

2. Положение о согласовании частных критериев эффективности. Сущность этого положения заключается в том, что для оптимального функционирования системы в целом не требуется оптимизация работы каждой из её подсистем. Улучшение работы одной из подсистем, не согласованное в общесистемном плане, может привести к снижению эффективности системы в целом.

3. Положение об оптимуме автоматизации. Данное положение регламентирует то, что не все задачи, стоящие перед системой, особенно для частных случаев, должны решаться автоматически. Уровень автоматизации задач обосновывается исходя из критериев эффективности системы.

4. Положение о централизации информации. Сущность этого положения заключается в том, что управление системой и принятие решений эффективно

только в случае, когда информация собирается, обрабатывается и хранится на основе единых массивов, единого банка данных, который может быть децентрализован.

Рассмотрим методологию системного подхода применительно к исследованию и разработке АКК критических параметров твэла. На первом этапе необходимо как можно точно и однозначно сформулировать цель работы и предназначение объекта разработки. Нами ранее были определены основные требования и задачи по исследованию и созданию АКК параметров твэла. Основная цель – достижение высокопроизводительного сплошного контроля критических параметров твэла с необходимой точностью измерения. Предназначением АКК критических параметров твэлов является работа в составе технологических линий производства твэлов. На следующем этапе устанавливаются границы АКК и первичное структурирование. Совокупность объектов и процессов, которые могут влиять на достижение поставленной цели, разбивают на две группы.

Первая группа – это сам АКК, а вторая группа представляет собой внешнюю среду или инфраструктуру. Если влияние объектов и процессов внешней среды существенным образом ограничено, то систему можно считать замкнутой. Если же влияние внешней среды является существенным, то такую систему можно считать открытой. В нашем случае АКК параметров твэла представляет собой открытую систему, которая входит в АСУКП твэлов. В результате процесса структуризации можно выделить основные подсистемы АКК, которые осуществляют его ключевые функции. К ним можно отнести следующие подсистемы:

- измерительный тракт;
- механизм сканирования твэла;
- подсистема сбора, обработки информации и управления;
- контроллерный блок управления электроприводом.

Измерительный тракт (ИТ) состоит из одного или нескольких измерительных каналов, производящих преобразование энергии поля, которое воздействует на контролируемый твэл, в нормированный электрический сигнал. Основным элементом измерительного тракта являются специализированные первичные

преобразователи (детекторы) Механизм сканирования твэла (МСТ) производит передвижение твэла в зоне контроля по заданной траектории с необходимой скоростью, а также разбраковку твэлов по результатам контроля. Подсистема сбора, обработки информации и управления (ПСОИУ) включает в себя компьютер с различными платами, микропроцессорные устройства, интерфейсные модули связи и программное обеспечение. Контроллерный блок управления электроприводом (КБУЭ) обеспечивает управление электроприводом механизма сканирования твэла в соответствии с алгоритмом функционирования автоматизированного комплекса. Каждая подсистема АКК содержит достаточно много элементов и модулей, которые при дальнейшей декомпозиции комплекса подлежат исследованию по оптимизации их функций необходимых для достижения основной цели.

Дальнейший анализ функций и задач каждой подсистемы АКК позволяет разработать основной алгоритм функционирования комплекса, в некоторых случаях возможно создание математической модели комплекса. Одним из важных этапов является установление иерархии подсистем, в этом процессе уточняется первоначальная структура и параметры комплекса и окончательно определяются его цели и критерии. АКК параметров твэла можно представить как двухуровневую систему. На рисунке 3.1 изображена двухуровневая система, характеризующая работу АКК параметров твэла. Двухуровневые системы наиболее распространены и изучены. В нашем случае для подсистем ИТ, МСТ и КБУЭ необходима подсистема более высокого уровня для связи и координации этих подсистем при реализации общего алгоритма функционирования комплекса.

Роль подсистемы верхнего уровня выполняет ПСОИУ, которая на основе программных и технических средств, входящих в её состав, выполняет вычислительные и управляющие функции всего комплекса. С помощью ПСОИУ осуществляется связь АКК с третьим уровнем, а именно с АСУКП твэлов посредством сервера верхнего уровня СВУ. АСУКП осуществляет на основании переданной ему информации ПСОИУ комплекса координацию его работы в соответствии с алгоритмом функционирования технологической линии производства твэлов и формирование паспорта по результатам контроля твэла.

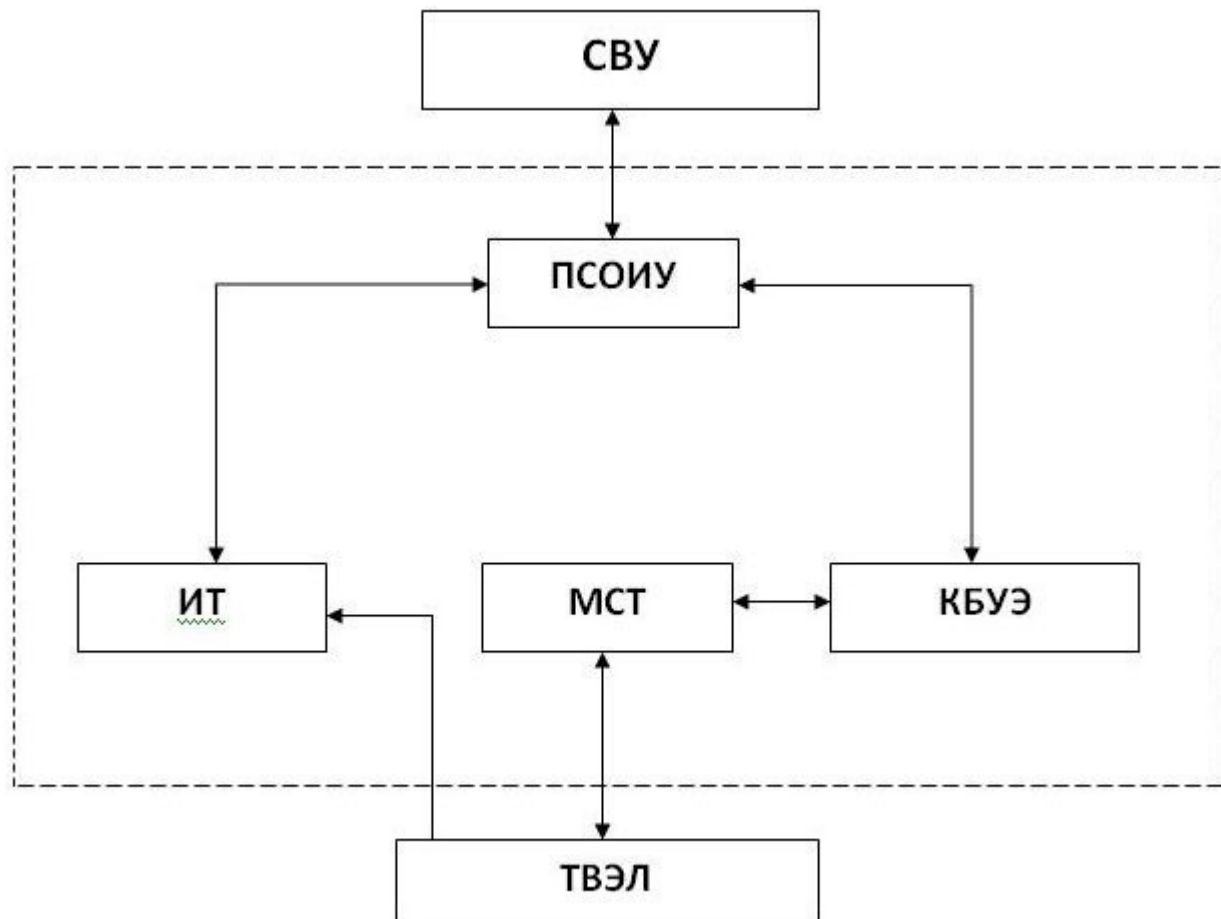


Рисунок 3.1 – Двухуровневая структурная схема АКК параметров ТВЭЛ

При организации работы ПСОИУ комплекса важно обеспечить оценку взаимодействия между подсистемами и согласование взаимодействия между подсистемами. В двухуровневых системах обычно используют линейную процедуру координации подсистем. При линейной процедуре координации управляющие сигналы подаются дискретно в некоторые последовательные моменты времени. В каждом цикле координации локальные управляющие элементы (микропроцессоры) осуществляют выбранное ими управление. Цикл координации определяет требования к производительности микропроцессоров и временные соотношения процессов обмена информацией между ними.

Таким образом, с помощью системного подхода можно разработать оптимальную структуру АКК параметров ТВЭЛ. Принцип системного подхода в нашем случае реализуется путем совмещения функций измерения контролируемого

параметра ядерного топлива и функций сбора и обработки результатов измерений этого параметра и управления процессом контроля в одном алгоритме функционирования. Параллельное осуществление функций измерения и обработки информации является важным резервом для повышения производительности контроля параметров ТВЭЛ. Обычно процессы измерения контролируемого параметра и дальнейшая обработка результатов измерений происходят в последовательном режиме. Параллельное выполнение функции измерения и обработки результатов измерений возможно реализовать в результате выработки критериев сбора результатов измерений и анализа их влияния на окончательные результаты контроля параметра ядерного топлива. Рассмотрим далее использование принципа обратной связи для построения АКК критических параметров ТВЭЛ.

3.2.2 Принцип обратной связи

Обратная связь между подсистемами и элементами присуща практически всем сложным открытым системам. Необходимость существования обратной связи для обеспечения жизнедеятельности сложных систем отмечается Л. Берталанфи, одним из основоположников системного подхода в научных исследованиях [83]. Обратная связь является важнейшим принципом в регулировании и управлении сложных систем. Сущность обратной связи состоит в воздействии результатов работы какой-либо системы на её дальнейшее функционирование.

Применение обратной связи при создании сложных технических устройств и систем весьма распространено. Хорошо известно использование обратной связи в электронной технике. В данной области принцип обратной связи трактуется как передача части выходного сигнала обратно на вход устройства. Различается несколько основных видов обратной связи, среди которых основное место занимают отрицательная и положительная обратные связи [84]. Отрицательная обратная связь (ООС) уменьшает входной сигнал в соответствии с некой передаточной функцией и позволяет достичь выходного сигнала с высокой точностью и обеспечивает хорошую стабильность работы устройства. Таким образом, ООС стремится к

снижению разницы между заданным параметром выходного сигнала и его фактическим значением. Положительная обратная связь (ПОС) увеличивает входной сигнал в соответствии с заданной передаточной функцией. На основе применения обратной связи между каналами измерения и управления работают автоматические регуляторы и системы управления различными технологическими процессами.

Технологический и выходной контроль параметров твэлов являются частью общего технологического производства твэлов и оптимальное управление этим процессом является актуальной задачей. Часть потока информации с выхода измерительных каналов АКК параметров твэлов может поступать на вход системы управления технологическим процессом изготовления твэла для его корректировки с целью принятия оптимального решения по дальнейшему выполнению технологических операций по изготовлению твэла. В рассмотренных выше примерах применение обратной связи направлено на достижение удержания заданного параметра в нужном диапазоне (коэффициент усиления, температура, давление т.д.). В нашем случае такими параметрами являются достоверность результатов измерения и производительность контроля. Достоверность результатов измерения в основном определяется погрешностью измерения, случайная составляющая которой установлена с доверительной вероятностью 0,95. Таким образом, в 5% случаев погрешность может выходить за свои установленные пределы. Это может не влиять на окончательные результаты контроля в том случае, когда величина измеряемого параметра существенно отличается от величины браковочного уровня данного параметра.

В случае, когда величина измеряемого параметра приближается к величине своего браковочного уровня, возникает большая вероятность в неопределенности результата контроля. В этом случае актуально идентифицировать сбои измерительного канала за счёт разных помех, возникающих во время контроля твэла, и не учитывать их влияние на результаты контроля. В связи с этим возникает необходимость проведения повторного контроля твэла, чтобы исключить неопределённость в результатах ранее проведённого контроля.

Необходимость повторного контроля продиктована высокой стоимостью ядерного топлива и большими издержками по его изготовлению. Большой объём повторного контроля ТВЭЛОВ снижает общую производительность контроля и эффективность работы всей технологической линии производства. Решить данную задачу в некоторых случаях помогает использование принципа обратной связи.

Предлагается использовать обратную связь между процессом измерения контролируемого параметра ТВЭЛА и режимом сканирования ТВЭЛА, что придаст АКК необходимую оперативность и рациональность. Структурная схема АКК, изображенная на рисунке 3.1, позволяет реализовать обратную связь между ИТ и МСТ посредством ПСОИУ, которая как подсистема верхнего уровня объединяет функции обработки информации и управления комплексом.

Целесообразность введения обратной связи обусловлена необходимостью своевременной реакции автоматизированного комплекса на появление сигнала измерительного канала об отклонении величины контролируемого параметра от допустимых значений или о появлении дефектного участка ТВЭЛА. Это позволяет сократить время на переконтроль предполагаемого дефектного участка, что особенно важно в случае применения многоканальной структуры измерительного тракта АКК. Для многоканального автоматизированного комплекса контроля появление дефектного участка ТВЭЛА или наличие сбоя измерительной аппаратуры по любому из каналов измерения вызывает необходимость оперативной проверки достоверности этого результата, в противном случае, издержки на переконтроль ТВЭЛА резко снижают общую эффективность контроля. Оперативная проверка достоверности результатов измерения в многоканальном автоматизированном комплексе в процессе контроля изделия возможна в результате разработки соответствующего алгоритма функционирования комплекса. Использование обратной связи между процессом измерения контролируемого параметра ТВЭЛА и режимом его перемещения или сканирования в зоне контроля позволяет осуществить режим активного контроля параметров ТВЭЛА.

Активный контроль возможен не для всех контролируемых параметров ТВЭЛА. Сложно применить активный контроль для параметров ТВЭЛОВ, которые

оцениваются в результате расчёта всего массива измеренных значений этих параметров. Активным контролем можно назвать такой контроль какого-либо параметра детали или изделия, когда результаты контроля могут повлиять на изменение параметров технологического процесса изготовления этой детали или изделия в реальном масштабе времени.

Известно использование активного контроля в процессе автоматизированного изготовления различных сварных и паяных соединений при их ультразвуковом или акустико-эмиссионном контроле [85]. По результатам контроля сварного соединения можно откорректировать режимы сварки и вернуться к месту с возможными дефектами шва для его дополнительной проработки. Применяются тепловые методики контроля для реализации активного метода контроля различных композиционных изделий [86].

В работах [25, 26] представлена работа АКК промышленных твэлов, где реализован активный контроль толщины внутренней и наружной оболочки твэла. Рассмотрим основные этапы активного контроля толщины оболочки твэла промышленного реактора:

- анализ результатов измерений толщины оболочки твэла с привязкой к его местоположению в зоне контроля;
- выработка микро-ЭВМ сигнала о появлении дефектного участка оболочки и выдача управляющих команд на остановку и реверс контролируемого твэла на расстояние, соответствующее двум тактам измерения;
- проверка исправности работы измерительного канала;
- повторный контроль предполагаемого дефектного участка изделия на пониженной скорости сканирования равной половине рабочей скорости контроля;
- анализ результатов повторного контроля и выдача команд микро-ЭВМ на продолжение контроля, либо на его прекращение.

Во время повторного контроля сбор данных проводится лишь по тому измерительному каналу, где произошла фиксация предполагаемого дефектного участка оболочки, а по остальным каналам информация в микро-ЭВМ не поступает, а ранее полученные данные хранятся в оперативно-запоминающем устройстве ЭВМ.

Длина реверса твэла L , соответствующая двум тактам измерения определяется следующим соотношением:

$$L = 2 \cdot t \cdot V_p, \quad (3.1)$$

где t – время одного такта измерения, V_p – рабочая скорость сканирования твэла.

Этап проверки исправности измерительного канала проводится в следующем порядке:

- проведение анализа и сравнение результатов измерения толщины оболочки в месте, соответствующем конечной точке реверса твэла, полученных при первоначальном и повторном контролях.
- измерительный канал считается исправным, если результаты измерения толщины оболочки при первоначальном и повторном контроле совпадут в пределах допустимой погрешности;
- измерительный канал нуждается в настройке и регулировке в случае, если результаты измерения толщины оболочки первоначального и повторного контроля отличаются друг от друга на величину, превышающую допустимый разброс, процесс контроля прекращается.

В случае исправности измерительного канала начинается повторный контроль ранее измеренного участка оболочки на пониженной скорости сканирования $0.5 V_p$. В случае подтверждения первоначального результата измерения толщины оболочки твэла в месте обнаружения дефектного участка, твэл предположительно признается бракованным. Окончательное решение о годности твэла принимается по окончании контроля всей грани. Если же результат первоначального измерения не подтверждается при повторном контроле, то считается, что он был ранее обусловлен сбоем в работе измерительного канала. После окончания повторного контроля возобновляется контроль твэла по всем каналам комплекса на рабочей скорости сканирования V_p .

Целесообразность проведения повторного контроля предполагаемого дефектного участка оболочки на пониженной скорости состоит в том, что в этом случае происходит уменьшение площади усреднения однократного измерения

толщины оболочки, что улучшает возможность выявления дефектного участка оболочки. Таким образом, сравнивая результаты измерения толщины оболочки в одном и том же месте в разное время, можно судить о метрологической исправности измерительного канала.

Кроме того, у твэла на краях есть небольшие участки, где отсутствует топливный слой, поэтому сигнал от этого участка используется как начало диапазона измерения толщины оболочки твэла и хорошо фиксируется уровень шума измерительного канала, при превышении которого также вырабатывается сигнал о дополнительной калибровке. Таким образом, достигается оперативное подтверждение достоверности результатов измерений толщины предполагаемого дефектного участка оболочки твэла, не подвергая его отдельному переконтролю.

Проверка исправности измерительного канала производится без применения специальных калибровочных мер контролируемого параметра с использованием для этой цели характерных мест в конструкции самого контролируемого твэла. При реализации такого алгоритма контроля толщины оболочек твэла производительность контроля практически не зависит от количества брака по данному параметру при высокой достоверности результатов измерения. Далее рассмотрим следующий принцип построения АКК критических параметров твэлов.

3.2.3 Принцип многоканальности

Принцип многоканальности построения АКК критических параметров твэла является важным инструментом для достижения высокопроизводительного контроля. Принцип многоканальности измерения контролируемого параметра твэлов является наиболее эффективным средством, позволяющим повысить плотность потока информации о контролируемом объекте, что является основной предпосылкой для повышения производительности контроля данного параметра.

Повышение производительности контроля только за счет увеличения скорости сканирования твэла в зоне контроля – это путь, сопряженный с возрастанием статистической и динамической погрешности измерения данного параметра, который требует применения более быстродействующей измерительной аппаратуры

и мощных источников излучения, что не всегда возможно в рамках конкретной методики измерения. Существует и другая положительная сторона многоканального принципа контроля параметра, которая заключается в том, что становится возможным осуществление одновременного измерения однотипных параметров ядерного топлива, используя разные методики измерения.

Таким образом, с помощью многоканальной структуры можно добиться многофункциональности АКК параметров твэла. Для технической реализации многоканального принципа построения АКК необходима разработка специальных малогабаритных первичных преобразователей в зависимости от применяемой методики измерения параметров твэла, а также оптимальной конструкции механизма сканирования твэла. Прогресс в развитии многоканальных измерительных систем в ядерном приборостроении связан с разработкой способа магистральной передачи данных для ядерных исследований и комплекса технических средств КАМАК [87]. В СССР был разработан аналог системы КАМАК – система ВЕКТОР [88]. Разница была лишь в том, что конструктивы нашей системы были разработаны в метрической системе, а конструктивы КАМАК в дюймовой. Идеология систем была единой и состояла в том, что данные с измерительных каналов передавались на единую магистраль.

Измерительные блоки комплектовались сначала в каркасы (крейты) и данные собирались на магистраль каркаса, каркасы формировались в стойки, на магистраль которой собирались данные с каркасов. Контроллеры каркасов и стоек обеспечивали необходимый порядок сбора данных и передачу их на ЭВМ. С развитием цифровых измерительных технологий и вычислительной техники в настоящее время передача данных с измерительных каналов в цифровом виде сразу поступает с помощью различных интерфейсов на шину данных микро-ЭВМ или сервера базы данных.

В работах [26, 89] рассмотрена разработка многоканальных автоматизированных комплексов контроля толщины слоёв твэлов исследовательских и промышленных реакторов на базе ядерно-физических блоков ВЕКТОР и микро-ЭВМ. В работах [33, 90] представлены работы по контролю содержания урана-235 в твэлах энергетических реакторов с помощью

многоканальных гамма-спектрометрических комплексов, которые могут иметь от 24 до 32 каналов измерения. Применение большого количества каналов измерения связано с необходимостью увеличить поток регистрируемого конверсионного гамма-излучения атомов урана-235, чтобы достичь необходимой производительности и достоверности контроля. В качестве гамма-спектрометров используются спектрометры фирм Canberra, Ortec, GreenStar.

В работе [73] представлены результаты разработки многоканального автоматизированного комплекса типа «РАЗМЕР» для контроля геометрических параметров твэлов типа ВВЭР оптикоэлектронным методом. Применение многоканальной структуры измерительного тракта в данном комплексе позволяет проводить контроль четырех критических параметров твэла одновременно.

Из приведённых выше примеров следует, что принцип многоканальности в построении АКК параметров твэлов позволяет достичь необходимого эффекта: повышения производительности контроля или комплексного контроля разных параметров твэла. Необходимо отметить факторы, которые нужно учитывать при проектировании многоканальной структуры АКК параметров твэла.

Главным фактором для успешного проектирования многоканального измерительного тракта можно считать наличие компактных источников излучения нужной активности или мощности и малогабаритных первичных преобразователей (детекторов) излучений достаточной эффективности. Механизм сканирования твэла, где источники и детекторы излучения образуют зону измерения параметров твэла, может быть ограничен в габаритах. Но основное ограничение связано с размерами контролируемого твэла и методикой измерения его параметров. В связи с этим, в некоторых случаях нужно проводить специальную разработку и изготовление источников и детекторов излучения требуемых технических характеристик.

Следующим фактором является независимость измерительных каналов друг друга. Другими словами, необходимо добиться того, чтобы влияние каналов измерения друг на друга было минимальным, а ещё лучше совсем исключено. Для этого необходимо провести разработку конструкции механизма сканирования, которая предусматривает защиту или экранирование влияния источников излучения

измерительного канала на соседние каналы. Необходимо исследовать влияние электромагнитных наводок на измерительные каналы для избегания сбоев в их работе.

Большое значение имеет надёжность применяемых технических средств. В силу того, что вероятность отказа автоматизированного комплекса увеличивается пропорционально количеству его измерительных каналов, возникает необходимость использования технических средств с высокими показателями надёжности. Для этого рекомендуется проводить отдельные исследовательские испытания на надёжность и по их результатам отбирать технические средства для дальнейшего применения. В заключение следует отметить, что многоканальные АКК значительно дороже одноканальных установок контроля, поэтому необходимо объективно провести расчёт технико-экономической эффективности их использования в технологическом процессе производства твэлов в соответствии с положением о максимуме эффективности. В дальнейшем рассмотрим следующий принцип построения АКК параметров твэлов, который тесно связан с принципом многоканальности.

3.2.4 Принцип многофункциональности

Многофункциональность системы – это её способность выполнять несколько различных функций или задач. Многофункциональность АКК – это способность осуществлять измерение нескольких различных параметров объекта контроля. Таким образом, принцип многофункциональности для АКК заключается в использовании в АКК нескольких различных видов излучения и их детекторов, либо одного вида проникающего излучения и различных детекторов для контроля разных параметров контролируемого твэла.

Необходимость сочетания или совмещения методик измерения, применяющих различные виды излучения, для контроля параметров ядерного топлива связано с возможностью эффективно использовать лучшие свойства каждой из методик измерения для достижения поставленной цели. Наиболее известные

многофункциональные измерительные приборы связаны с измерением физических величин, характеризующих различные поля или физико-механические свойства среды – это электроизмерительные тестеры, измерители температуры, давления, влажности. Эти измерительные приборы представляют собой набор различных детекторов (чувствительных сенсоров) или комбинации различных включений одного детектора.

АКК параметров твэлов значительно более сложные системы и включают в себя источники проникающих излучений с нормированными характеристиками, которые обеспечивают процесс измерения параметра объекта за счёт взаимодействия потоков излучения с веществом его материала. В настоящее время известны различные многофункциональные системы контроля: рентгеновские, ультразвуковые, вихретоковые и термометрические комплексы различного назначения.

Многофункциональные системы контроля имеют заметное преимущество в сравнении с обычными системами за счёт эффективности их использования в производстве и научных исследованиях. Это качество таких систем является основанием для того, чтобы рассматривать принцип многофункциональности при разработке АКК параметров твэлов как перспективный инструмент проектирования уникальных систем контроля.

Принцип многофункциональности невозможно осуществить без применения многоканальной структуры АКК параметров твэла. В связи с этим принцип многофункциональности прямо связан с рассмотренным выше принципом многоканальности и развивает его преимущества в создании высокопроизводительных АКК параметров твэлов. Этот подход был учтен в ряде разработок с участием автора настоящей диссертации.

Применение вихретокового метода выявления дефектов наружной поверхности твэла позволяет достичь высокой производительности контроля, а использование в комплексе с ним оптикоэлектронного метода позволяет реализовать прецизионное измерение величины обнаруженных механических дефектов, что в целом решает задачу сплошного контроля внешнего вида твэлов ВВЭР-1000 [21, 74].

Применение радиометрического гамма-абсорбционного метода для контроля сплошности топливного столба ТВЭЛ позволяет создать АКК, который способен проводить измерение одновременно нескольких критических параметров ТВЭЛ ВВЭР-1000: длину топливного столба, зазоры между таблетками, длину компенсационного объёма, крошку в компенсационном объёме и длину пружинного фиксатора [13, 15]. Также можно отметить применение оптикоэлектронного метода в АКК для контроля геометрических параметров размеров ТВЭЛ и АКК контроля дистанционирующих решёток ТВС ВВЭР-1000 [19].

Эти АКК позволяют измерить все критические параметры контролируемого объекта за один проход в зоне контроля, такие как диаметр, длина, прогиб, а также несоосность заглушки для ТВЭЛ и размер под ключ, расстояние между ячейками, диаметры вписанной и описанной окружности для ячейки для дистанционирующей решётки [73, 90, 91].

Положительный опыт применения принципа многофункциональности для создания АКК параметров ТВЭЛ и ТВС особенно хорошо зарекомендовал себя в задачах по созданию единичных и уникальных средств контроля. Следующий важный принцип построения АКК параметров ТВЭЛ – это принцип адаптивности.

3.2.5 Принцип адаптивности

Термин «адаптация» происходит от латинского слова (*adapto*), что означает приспособление. Вначале этот термин употреблялся только применительно к биологическим системам. Позже этот термин стал применяться в социальных науках, где речь шла об адаптации людей. Сравнительно недавно термин «адаптация» стал использоваться в технической литературе при описании различных технических систем и процессов. Под адаптацией понимается процесс изменения параметров или структуры системы на основе текущей информации с целью достижения оптимального состояния системы при начальной неопределённости и изменяющихся условий работы системы. Для этой цели разрабатывается адаптивное управление системой.

Адаптивное управление системой – это совокупность методов управления, позволяющих изменять параметры или структуру регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений, действующих на объект управления. В работах [92–94] рассмотрены вопросы адаптивного контроля и управления в технических системах. Особенно хорошо задачи адаптивного управления разработаны и изучены в робототехнике при создании роботов различного направления. Адаптивное управление в робототехнике предусматривает автоматическое регулирование действий объекта управления под воздействием изменений внешних условий и положения объекта в пространстве. Это происходит за счёт работы различных сенсоров, которыми оснащается робот, и обратной связи их с модулями управления движением робота.

Для АКК параметров твэлов такой подход к адаптивному управлению неактуален. Причина состоит в том, что технологический процесс контроля твэлов строго детерминирован и в его выполнении отсутствуют неопределённости и возмущающие изменения внешней среды. В связи с этим, при проведении контроля в партии твэлов, проходящих контроль, невозможно присутствие твэлов разных конструкций.

Принцип адаптивности для АКК параметров твэлов заключается в способности автоматизированного комплекса контроля подстраиваться под новые условия проведения измерения контролируемого параметра твэла за счёт настройки и регулировки элементов измерительного канала и механизма сканирования или за счёт корректировки программного обеспечения автоматизированного комплекса. Это имеет большое значение в связи с тем, что ведётся постоянное совершенствование ядерного топлива, что неизбежно связано с изменениями в конструкции твэла или ТВС, либо с изменениями технических требований к критическим параметрам в новых технических условиях на твэл или ТВС.

Если спроектировать жесткую конструкцию измерительной станции автоматизированного комплекса, то любое изменение геометрических размеров твэла будет неизбежно связано с разработкой новых первичных преобразователей измерительного канала или нового механизма сканирования твэла, что практически

требует разработки новой конструкции всего автоматизированного комплекса. Как правило, это свойственно средствам контроля, которые используют контактные методики измерения, когда измерительный преобразователь или датчик непосредственно вступает в физический контакт с контролируемым изделием. Необходимость физического контакта датчика, с поверхностью контролируемого твэла связана с вводом и регистрацией потоков проникающего излучения при измерении параметров конструкции твэла. Такая ситуация часто встречается при использовании ультразвуковых, вихретоковых и тепловых методик измерения. Преимущество в этом плане имеют радиационные и оптикоэлектронные методы, которые позволяют осуществить бесконтактный контроль твэлов.

Изменение технических требований к контролю критических параметров ядерного топлива идёт в сторону ужесточения точностных характеристик контроля, поэтому, если методика измерения параметра реализована на пределе своих точностных характеристик, то, скорее всего она может оказаться непригодной для новых условий. Необходимо иметь некоторый запас «прочности» в метрологических характеристиках автоматизированного комплекса для успешной работы в пределах его сроков службы.

Таким образом, принцип адаптивности в создании АКК критических параметров твэлов закладывается в технических требованиях на конструкцию автоматизированного комплекса. Разработчики АКК совместно с конструкторами и технологами твэла при формировании технических требований на контроль критических параметров твэла должны максимально учесть эволюцию развития конструкции твэла и ТВС, а также возможности технических средств и методик контроля. В этом случае заложенные в конструкцию и программное обеспечение автоматизированного комплекса потенциальные возможности адаптации его к изменению конструкции и номенклатуры твэлов, а также метрологических характеристик по контролю критических параметров, позволяют в дальнейшем использовать данный автоматизированный комплекс без существенных доработок и модернизаций.

Перечислим основные аспекты, которые являются важными для реализации принципа адаптивности при создании АКК параметров твэлов:

- разработка универсального механизма сканирования твэла;
- разработка специализированных измерительных первичных преобразователей для бесконтактных методик контроля;
- разработка «гибкого» программного обеспечения для управления функционированием автоматизированного комплекса;
- применение стандартизованных средств измерительной техники;
- создание метрологического запаса в измерении критического параметра по погрешности и диапазону измерения.

Таким образом, принимая во внимание все перечисленные аспекты при проектировании АКК параметров твэлов, можно с успехом реализовать принцип адаптивности в конструкции будущего автоматизированного комплекса. Далее рассмотрим принцип метрологической устойчивости.

3.2.6 Принцип метрологической устойчивости

Метрологическая устойчивость – это свойство средства измерения или измерительной системы противостоять метрологическим отказам. Метрологический отказ – это выход метрологических характеристик измерительной системы за пределы установленных допускаемых границ. Метрологические отказы можно разделить на отказы внезапные и постепенные.

Внезапный метрологический отказ характеризуется скачкообразным изменением одной или нескольких метрологических характеристик измерительной системы. Внезапный метрологический отказ в силу своего случайного характера невозможно спрогнозировать. Последствия внезапного метрологического отказа (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) достаточно хорошо поддаются анализу и дальнейшему выявлению.

Постепенный метрологический отказ характеризуется монотонным изменением метрологических характеристик измерительной системы. По своему характеру

постепенные метрологические отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только в результате периодического метрологического контроля. Для более оперативного выявления таких отказов необходимо исследовать закономерность изменения метрологических характеристик системы, что не всегда удаётся выполнить.

В работе [95] рассматривается моделирование метрологических характеристик измерительных систем, в рамках которого возможно исследовать характер изменения метрологических характеристик измерительных систем в процессе их эксплуатации.

Очень часто используется такое понятие как стабильность измерительной системы. Стабильность измерительной системы является качественной характеристикой, отражающей неизменность метрологических характеристик во времени, и, в основном, она связана с постепенными метрологическими отказами. Природа внезапных метрологических отказов связана, в основном, с внешним воздействием на измерительную систему. Это может быть обусловлено электромагнитными наводками или помехами, либо сбоями в системе электроснабжения, повышенной вибрацией и т.д. В любом из этих случаев возможно скачкообразное изменение выходного сигнала с измерительного канала.

Причина постепенных метрологических отказов в основном связана с внутренним состоянием измерительного канала, прежде всего, с естественным старением компонентов измерительной системы, либо с её интенсивной эксплуатацией и снижением ресурса элементов измерительной системы. Следовательно, основным фактором, влияющим на метрологическую устойчивость АКК параметров ТВЭЛов в течение цикла контроля ТВЭЛА, являются внезапные метрологические отказы. Выявить последствия этих отказов можно после анализа результатов контроля ТВЭЛА, но это снижает эффективность и производительность контроля параметров ТВЭЛА.

Принцип метрологической устойчивости заключается в создании условий для сохранения метрологических характеристик измерительного процесса параметров ТВЭЛА в течение всего цикла контроля параметров ТВЭЛА. На рисунке 3.2

представлена совокупность методов и средств, которые способны поддержать метрологические характеристики измерительной системы в нужном диапазоне, что является базисом её метрологической устойчивости.



Рисунок 3.2 – Обеспечение метрологической устойчивости системы

Для этого необходимо разработать алгоритмы идентификации сбоев работы измерительного канала в течение цикла контроля твэла. С этой целью проводится разработка программ оперативной калибровки измерительного канала в процессе проведения контроля твэла. Для решения этой задачи можно использовать характерные особенности конструкции контролируемого твэла. При разработке методики контроля критического параметра твэла можно выявить некоторые характерные зоны конструкции твэла, которые в рамках данной методики создают стабильный отклик выходного сигнала измерительного канала. Данная характерная область конструкции твэла при прохождении зоны измерения генерирует известный реперный сигнал, который можно использовать для анализа состояния метрологической исправности измерительного канала и при необходимости провести его оперативную корректировку.

Для исключения сбоев сигнала измерительного канала лучше всего подходит метод сравнения уровня данного сигнала с уровнем сигнала от реального изменения значения измеряемого параметра твэла. С этой целью разрабатываются критерии оценки уровней сигнала измерительного канала при максимальных и минимальных изменениях величины контролируемого параметра твэла.

Такой алгоритм для реализации метрологической устойчивости был внедрен в АКК толщин оболочек и поверхностной плотности топливного слоя твэлов промышленного реактора типа МПК [23]. Одновременно с этим алгоритмом применяется калибровка измерительных каналов комплекса по стандартным образцам при необходимости проведения процедуры по переконтролю твэла. Таким образом, чтобы реализовать принцип метрологической устойчивости АКК критических параметров твэлов необходимо разработать процедуры тестирования работы измерительного канала комплекса в режиме контроля твэла и калибровки его по стандартным образцам с различной периодичностью в зависимости от принятого регламента контроля и обслуживания комплекса.

Метрологическая устойчивость также зависит от своевременного выполнения регламентных работ по обслуживанию за техническими средствами АКК параметров твэлов и замены изношенных средств измерений, входящих в состав измерительных каналов.

В итоге можно сказать, что выполнение тестирования работы измерительного канала в течение цикла контроля, его периодической калибровки и регламентных работ по обслуживанию технических средств, входящих в его состав обеспечивает реализацию принципа метрологической устойчивости АКК параметров твэлов. Завершая рассмотрение основных принципов построения АКК параметров твэлов, представим схему взаимодействия принципов построения АКК параметров твэлов, как показано на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Схема взаимодействия принципов построения АКК твэлов

Отметим, что основополагающий принцип системного подхода взаимодействует со всеми остальными принципами построения, некоторые из которых возможно реализовать только посредством использования принципа системного подхода к построению автоматизированного комплекса.

Применяя основные принципы построения АКК параметров твэлов, можно разработать структуру и конструкцию АКК параметров твэлов, который способен выполнить основные требования по высокопроизводительному сплошному контролю критических параметров твэлов с необходимой достоверностью результатов измерений.

3.3 Выводы по главе 3

1. Принцип системного подхода при построении и разработке АКК параметров твэлов является основополагающим и определяет взаимодействие с остальными принципами построения.

2. Принцип обратной связи позволяет реализовать возможности активного контроля параметров твэлов и тестирования измерительных каналов в процессе проведения контроля.

3. Принцип многофункциональности совместно с принципом многоканальности являются основой для разработки структуры АКК параметров твэлов с высокой производительностью контроля.

4. Принцип адаптивности закладывает основу для универсальности АКК параметров твэлов и развития области его применения.

5. Принцип метрологической устойчивости определяет уровень надежности и достоверности результатов контроля, повышает оперативность работы АКК параметров твэлов.

ГЛАВА 4

АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ КОНТРОЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЭЛОВ

Понятие алгоритм происходит от латинской формы написания имени великого математика 9 века Аль-Хорезми (algorithmi), который первым предложил последовательность четырёх арифметических действий. В связи с этим термин алгоритм в, основном, использовали в математике для описания последовательности выполнения вычислительных действий. Со временем понятие алгоритм расширилось и стало широко применяться в технических и естественных науках в случаях, где необходимо было представить любую последовательность действий с целью достижения необходимого результата.

Основные свойства алгоритмов, которые отражают их сущность, представляют собой следующие особенности:

- дискретность (описываемый процесс разбивается на последовательность отдельных шагов или этапов);
- понятность (ориентирование на конкретного исполнителя);
- детерминированность (не содержит предписаний, которые могут истолковываться неоднозначно);
- результативность (по выполнению конечной последовательности шагов достигается необходимый результат).

Предметом нашего рассмотрения являются АКК критических параметров твэлов.

Алгоритм функционирования – это совокупность правил, предписаний или математических зависимостей, определяющих правильность выполнения технологического процесса [96]. Алгоритм функционирования системы определяется её структурной схемой и функциональными связями между элементами системы. В предыдущей главе рассмотрены основные принципы построения автоматизированных комплексов контроля параметров твэлов, которые

в основном определяют структуру и функциональные связи комплекса в зависимости от цели и задач, стоящих перед ним.

Алгоритм функционирования АКК параметров твэлов представляет собой обобщенный алгоритм, который объединяет частные алгоритмы разных задач, такие как: алгоритм сбора и обработки информации измерительных каналов, алгоритм управления перемещением контролируемого твэла, алгоритм тестирования измерительных каналов и алгоритм метрологической аттестации и калибровки измерительных каналов. В настоящей главе рассмотрим ряд алгоритмов функционирования АКК параметров твэлов, которые были разработаны с целью достижения высокопроизводительного сплошного контроля в технологических линиях производства твэлов различного назначения.

4.1 Алгоритм функционирования автоматизированного комплекса контроля толщины оболочек и неравномерности топливного слоя твэлов промышленного реактора

Объектом данного контроля являются твэлы для ТВС промышленного реактора. На рисунке 1.7 изображен общий вид такого твэла. ТВС состоит из четырёх твэлов, длина которых составляет 1010 мм, а топливный слой – не менее 890 мм. Каждый твэл представляет собой шестигранную трехслойную трубу, топливный слой которой окружён алюминиевыми оболочками. Размер под «ключ» S твэла находится в пределах от 85,2 мм до 121,2 мм. Общая толщина стенки твэла составляет 2,5 мм.

Целью контроля является измерение толщины внутренней и наружной алюминиевых оболочек и определение неравномерности распределения топливного слоя по длине твэла. Эта задача осложнена тем, что требования к этим критическим параметрам зависят от линейной зоны твэла. Рассмотрим вначале требования к топливному слою твэла.

Измеряемый параметр B – поверхностная плотность топливного слоя имеет физический смысл так называемой весовой толщины, т.е. количества массы материала на единицу площади поверхности контролируемого слоя. Поэтому размерность этой величины выражается как г/см^2 . На отдельных участках поверхности твэла могут наблюдаться существенные отклонения значений поверхностной плотности от номинального значения B_n .

Таким образом, степень или уровень отклонений поверхностной плотности каждого i -го участка от B_n будет характеризовать неравномерность распределения поверхностной плотности топливного слоя твэла.

Для оценки этого параметра и вводится расчетный коэффициент неравномерности K_T , который равен отношению фактической поверхностной плотности к номинальной поверхностной плотности. Максимально допустимый уровень $K_T = 1,3$, а минимально допустимый уровень $K_T = 0,8$. Локальные отклонения участков поверхностной плотности от номинального уровня могут быть вызваны в основном двумя причинами: изменениями линейной толщины топливного слоя и локальными отклонениями соотношения компонентов материала топливного слоя.

Действия этих причин, как правило, является одновременным, но доминирующим является изменение линейных размеров толщины топливного слоя, что подтверждается поперечными и продольными металлографическими разрезами топливного слоя твэла.

В этой связи, весьма удобно при рассмотрении процесса измерения поверхностной плотности оперировать линейными размерами толщины слоев, которые связаны с поверхностной плотностью следующим соотношением

$$B = \rho \cdot d , \quad (4.1)$$

где: B – поверхностная плотность; ρ – плотность материала, d – линейная толщина слоя.

Требования к неравномерности топливного слоя приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Требования к K_T по зонам твэла

Зона (мм)	K_T
0 – 120	не более 1,3
120– 820	от 0,8 до 1,1 для 1-го типоразмера от 0,8 до 1,15 для (2- 4)-го типоразмера
820– K	не более 1,3

В таблице 4.1 K означает конец топливного слоя твэла, а 0 – начало топливного слоя твэла. Положения 0, K определяются в ходе контроля твэла по характерным критериям: погрешность измерения K_T не хуже $\pm 5\%$ с доверительной вероятностью $P=0,95$ и площадь усреднения однократного измерения не более 50 мм^2 .

Для измерения поверхностной плотности топливного слоя наиболее подходящим методом контроля является радиометрический гамма-абсорбционный метод. В разделе 2.1.1. дана краткая оценка данного метода применительно к контролю толщины слоёв трехслойных твэлов. Рассмотрим более подробно применение данного метода для нашего случая.

Для реализации абсорбционного метода измерения толщины обычно используется прямая схема измерения, когда источник ионизирующего излучения и его детектор находятся на одной оси по разные стороны относительно плоскости контролируемого изделия. Схема такой геометрии измерения изображена на рисунке 4.1.

Из рисунка 4.1 видно, что герметизирующие топливный слой твэла алюминиевые слои B_1 и B_3 экранируют топливный слой от воздействия на него потока гамма-излучения. Площадь топливного слоя и масса исходного уранового сердечника, из которого изготавливается топливный слой, рассчитаны так, что среднее значение поверхностной плотности (номинальное значение B_n) примерно одинаково для твэлов всех типоразмеров. Номинальную поверхностную плотность топливного слоя можно определить, зная геометрические размеры твэла и массу сердечника твэла.

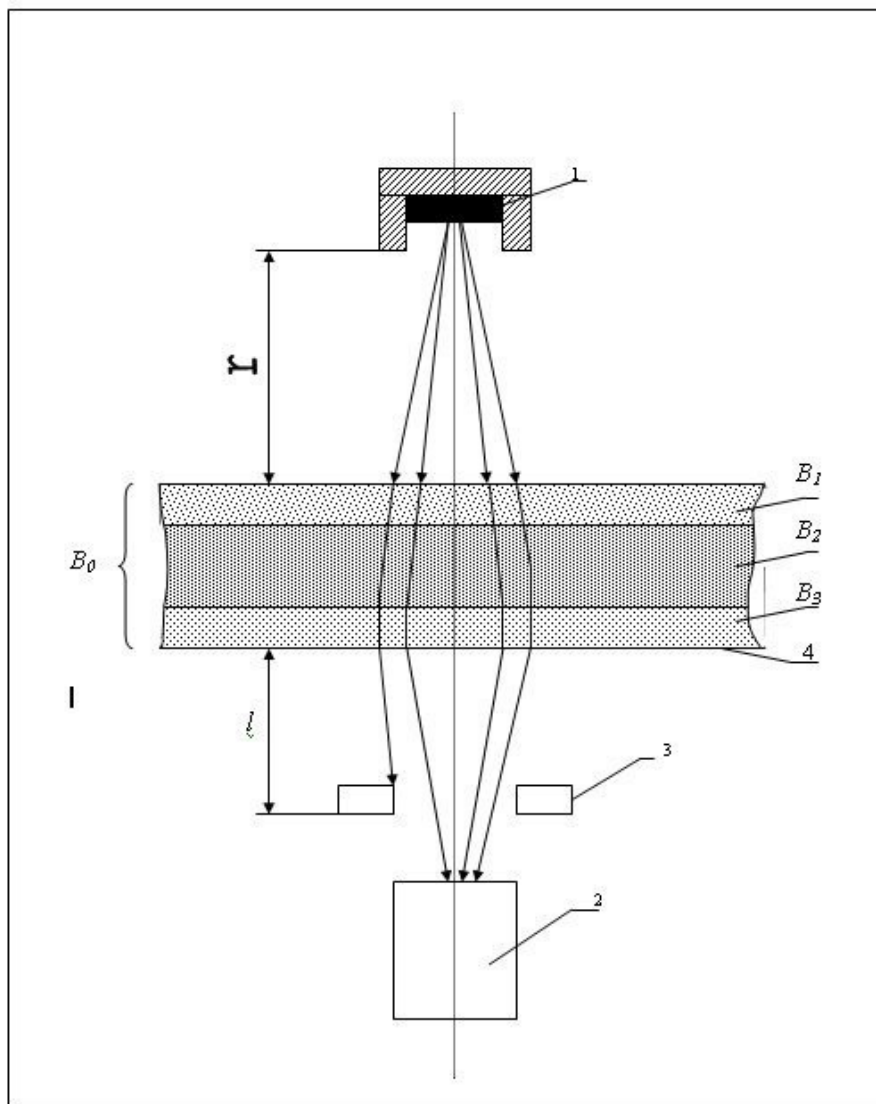


Рисунок 4.1 – Схема измерения поверхностной плотности топливного слоя промышленного ТВЭЛ

- 1 – коллимированный источник гамма-излучения
- 2. – сцинтилляционный детектор
- 3 – диафрагма входного окна детектора
- 4 – стенка ТВЭЛ.

Флуктуации толщины алюминиевых оболочек в рамках данной методики абсорбционного измерения можно идентифицировать как изменение поверхностной плотности соответствующего участка топливного слоя. Это является основным источником методической погрешности гамма-абсорбционного измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛ. Рассмотрим

рисунок 4.1, где показано, как сколлимированный пучок квантов излучения проходит через стенку твэла. В этом случае можно записать следующее выражение:

$$n(\rho d) = n_0 \exp[-\mu_2 \rho_2 d_2 - \mu_1 \rho_1 (d_1 + d_3)] \cdot \Phi(E, \mu \rho d), \quad (4.2)$$

где:

n_0 – плотность потока квантов излучения, падающая на детектор;

$n(\rho d)$ – плотность потока квантов излучения, падающая на детектор, перекрытый контролируемым изделием;

μ_1 – массовый коэффициент ослабления излучения алюминием;

μ_2 – массовый коэффициент ослабления излучения топливным слоем;

ρ_2, d_2 – соответственно плотность и толщина топливного слоя;

ρ_1, d_1, d_3 – плотность и толщины алюминиевых оболочек;

$\Phi(E, \mu \rho d)$ – фактор накопления.

С учётом того, что толщина стенки твэла $d_0 = d_1 + d_2 + d_3$, выражение (4.2) можно записать

$$n(\rho d) = n_0 \exp[-\mu_2 \rho_2 d_2 - \mu_1 \rho_1 (d_0 - d_2)] \cdot \Phi(E, \mu \rho d), \quad (4.3)$$

где: d_0 – общая толщина стенки твэла.

После некоторых преобразований выражение (4.3) примет такой вид:

$$n(\rho d) = n_0 \exp\left[-\left(\mu_2 - \mu_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \rho_2 d_2 + \mu_1 \rho_1 d_0\right] \cdot \Phi(E, \mu \rho d). \quad (4.4)$$

Выражение (4.4) характеризует функцию взаимодействия гамма-излучения с материалом объекта контроля. Согласно работам [64, 97] можно записать выражение для физической чувствительности данной методики измерения поверхностной плотности топливного слоя как

$$S_{.м} = \frac{1}{n(\rho d)} \frac{\partial n(\rho d)}{\partial (\rho_2 d_2)}. \quad (4.5)$$

Подставляя вместо $n(\rho d)$ выражение (4.4) и считая, что фактор накопления в нашем случае не зависит от соотношения толщин слоев, получим выражение для $S_{.м}$:

$$S_{\text{м}} = - \left(\mu_2 - \mu_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (4.6)$$

Слагаемое $\mu_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}$ показывает, какой вклад в снижение чувствительности измерения поверхностной плотности топливного слоя вносят алюминиевые оболочки. Выражение (4.2) можно представить в виде:

$$n(B) = n_0 e^{-(\mu_2 B_2 + \mu_1 B_{\Sigma})} \cdot \Phi(E, \mu \rho d) \quad (4.7)$$

где B_2 – поверхностная плотность топливного слоя, а B_{Σ} – суммарная поверхностная плотность алюминиевых оболочек твэла. Исходя из выражения (4.7), справедливо соотношение (4.8) для оценки влияния флуктуации толщины оболочек на измерение поверхностной плотности топливного слоя.

$$\Delta B_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2} \Delta B_{\Sigma} \quad , \quad (4.8)$$

где:

ΔB_2 – приращение величины поверхностной плотности топливного слоя, ΔB_{Σ} – приращение величины поверхностной плотности оболочек.

Выражение (4.8) удобнее использовать в таком виде:

$$\Delta B_2 = \frac{\mu_1 \rho_1}{\mu_2} \Delta(d_{\Sigma}) \quad , \quad (4.9)$$

где: ρ_1 – плотность алюминия, d_{Σ} – суммарная толщина алюминиевых оболочек.

Выражение (4.9) можно использовать для определения величины методической погрешности измерения за счет флуктуаций толщины оболочек как

$$\delta_{\text{м}} = \frac{\Delta B_2}{B_{\text{н}}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\rho_1}{B_{\text{н}}} \cdot \Delta(d_{\Sigma}) \quad , \quad (4.10)$$

где: $B_{\text{н}}$ – номинальная величина поверхностной плотности топливного слоя, которая определяется расчетным путем и подтверждается экспериментальными данными. Полагается, что $B_{\text{н}} = 0,8 \text{ г / см}^2$.

Как видно из выражений (4.6) и (4.10) методическая погрешность $\delta_{\text{м}}$ и физическая чувствительность $S_{\text{м}}$ гамма-абсорбционного метода измерения

неравномерности поверхностной плотности топливного слоя зависят от соотношения величин μ_1 и μ_2 . Таким образом, все зависит от энергии квантов источника излучения, которая обусловлена выбором конкретного типа источника гамма-излучения. Изотопы Co^{57} и Am^{241} являются наиболее подходящими для решения нашей задачи. Источники рентгеновского излучения не имеют перспектив для наших целей, ввиду либо малых энергий доступных изотопов рентгеновского излучения, либо из-за громоздкости рентгеновских аппаратов. Характеристика и технические данные этих изотопов приведены в работе [98].

Для изотопов Co^{57} и Am^{241} определим значения δ_m и S_m , используя для этого выражения (4.6) и (4.10). Для нахождения μ_1 и μ_2 используем данные работы [56]. Значение μ_2 находим как для смеси веществ, из которых состоит материал топливного слоя по выражению (4.11)

$$\mu_2 = \sum_{i=1}^n \mu_{2i} b_i, \quad (4.11)$$

где:

μ_{2i} – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения i -компоненты; b_i – весовая доля i -компоненты, $\mu_2(\text{Co}^{57}) = 0,75 \text{ см}^2/\text{г}$, $\mu_2(\text{Am}^{241}) = 1,32 \text{ см}^2/\text{г}$.

Плотность топливного слоя ρ_2 определяют также как для смеси веществ:

$$\rho_2 = \sum_{i=1}^n \rho_{2i} b_i, \quad (4.12)$$

где:

ρ_{2i} – плотность i -компоненты материала топливного слоя, b_i – весовая доля i -компоненты в материале топливного слоя.

В нашем случае $\rho_2 = 4,6 \text{ г/см}^3$. Подставляя полученные величины ρ_2 и μ_2 в выражение (3.7), получим S_m для Am^{241} и Co^{57} – $S_m(\text{Co}^{57}) = 0,7 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_m(\text{Am}^{241}) = 1,18 \text{ см}^2/\text{г}$.

Таким образом, физическая чувствительность S_m для гамма-абсорбционного метода измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя выше в случае использования для этой цели изотопа Am^{241} . Чтобы окончательно решить вопрос о выборе источника гамма-излучения, определим относительную методическую погрешность δ_m , используя выражение (4.10). Если оценить $\Delta(d_\Sigma)$ как

предельное отклонение суммарной толщины оболочек, то этому значению будет соответствовать предельное значение δ_m . Учитывая то, что распределение измеряемых значений толщины слоев изделия подчиняется нормальному закону распределения, предельному значению δ_m будет соответствовать вполне определенное относительное среднеквадратическое отклонение σ_m .

При номинальной толщине стенки твэла предельное отклонение суммарной толщины оболочек $\Delta(d_\Sigma)$ может быть не более 0,6 мм, так как минимальное значение d_Σ может быть не менее 1,2 мм, а максимальное значение d_Σ не превышает 1,8 мм. Таким образом, подставляя $\Delta(d_\Sigma) = 0,06$ см в выражение (4.10), получим значения δ_m для обоих изотопов. Ввиду того, что мы использовали в выражении (4.10) предельное значение $\Delta(d_\Sigma)$, полученные значения δ_m будут также предельными: $(\delta_m)_{\text{пр}} [\text{Co}^{57}] = 2,7 \%$, $(\delta_m)_{\text{пр}} [\text{Am}^{241}] = 3,36 \%$.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что использование изотопа Co^{57} предпочтительней, так как в этом случае методическая погрешность измерения поверхностной плотности δ_m за счет флуктуации толщины оболочек будет ниже, чем в случае использования изотопа Am^{241} . При этом нужно учесть, что для диапазона измеряемых поверхностных плотностей (0,6 – 1,2) г/см² использование аналитической линии Co^{57} с $E_\gamma = 123$ кэВ более выгодно, чем использование линии Am^{241} с $E_\gamma = 59,9$ кэВ, ввиду значительно меньшего коэффициента μ_2 , что позволяет применять источники меньшей активности для обеспечения одинакового уровня статистической погрешности измерения.

Перейдём к рассмотрению контроля толщины алюминиевых герметизирующих слоёв твэла промышленного реактора. В разделе 2.1.2 было отмечено, что хорошие результаты по измерению толщины покрытия (оболочки) могут быть достигнуты с применением обратно рассеянного электронного излучения. Особенно это перспективно, когда атомные номера покрытия и основания существенно отличаются, что наблюдается в нашем случае $Z_{\text{Al}} = 13$, и $Z_{\text{U}} = 92$. Далее необходимо подобрать источник излучения, детектор излучения и выбрать схему измерения.

Рассмотрим тип источника электронов, который наиболее подходит для измерения толщины алюминиевых оболочек твэла. Выбран источник электронов

типа БИС, состоящий из смеси изотопов $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$, у которого максимальная энергия излучаемого спектра электронов $E_m = 2,18$ МэВ. Необходимо обосновать данный выбор подробнее. В работах [54, 99] показано, что коэффициент альбедо очень слабо зависит от первоначальной энергии падающих на рассеиватель электронов в диапазоне энергий (0,1 – 2) МэВ. Поэтому, с этой точки зрения, радиоактивные изотопы Pm^{147} , Tl^{204} , Kr^{85} , максимальная энергия спектра которых $E_m < 1$ МэВ, равнозначны с изотопом $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$. Наиболее важным значением для окончательного выбора изотопа для измерения толщины алюминиевых слоев является величина толщины «насыщения» d_n для каждого изотопа по алюминию. При этом необходимо учесть, что диапазон измеряемых толщин находится в пределах 0,4–0,9 мм. Следовательно, толщина насыщения для используемого изотопа должна быть не менее 0,9 мм по алюминию.

По приведенным в работе [57] данным, толщина насыщения в алюминии для электронов $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$ составила 0,983 мм, для $\text{Pm}^{147} - 0,071$ мм, для $\text{Tl}^{204} - 0,249$ мм.

Если использовать эмпирическую формулу $d_n = \frac{E_m^{3/2}}{10\rho}$, то толщина для d_n для $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$ составит 1,2 мм, однако известно, что эта эмпирическая формула дает завышенные результаты.

По экспериментальным данным, полученными нами, d_n в алюминии для $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$ составила 1,1 мм. На рисунке 4.2 приведена зависимость плотности потока отраженных электронов от пластин алюминия разной толщины. Требованию $d_n > 0,9$ мм удовлетворяет изотоп $\text{Ce}^{144} - \text{Pr}^{144}$, у которого $E_m = 2,98$ МэВ, то есть d_n в алюминии будет около 1,2 мм, но его применение крайне затруднительно из-за малого периода полураспада $T_{1/2} = 0,78$ лет, в сравнении с $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$, у которого $T_{1/2} = 27,7$ года. После выбора типа источника излучения электронов, необходимо рассмотреть вопрос о методической погрешности измерения толщины алюминиевых оболочек твэла за счет неравномерности поверхностной плотности топливного слоя. Ранее мы определили, что поверхностная плотность топливного слоя промышленного твэла может изменяться в нашем случае в пределах от $0,8 B_n$ до $1,3 B_n$ ($0,64$ г/см² до $1,04$ г/см²). Там же отмечено, что в основном

неравномерность поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛ связана с линейными изменениями толщины топливного слоя.

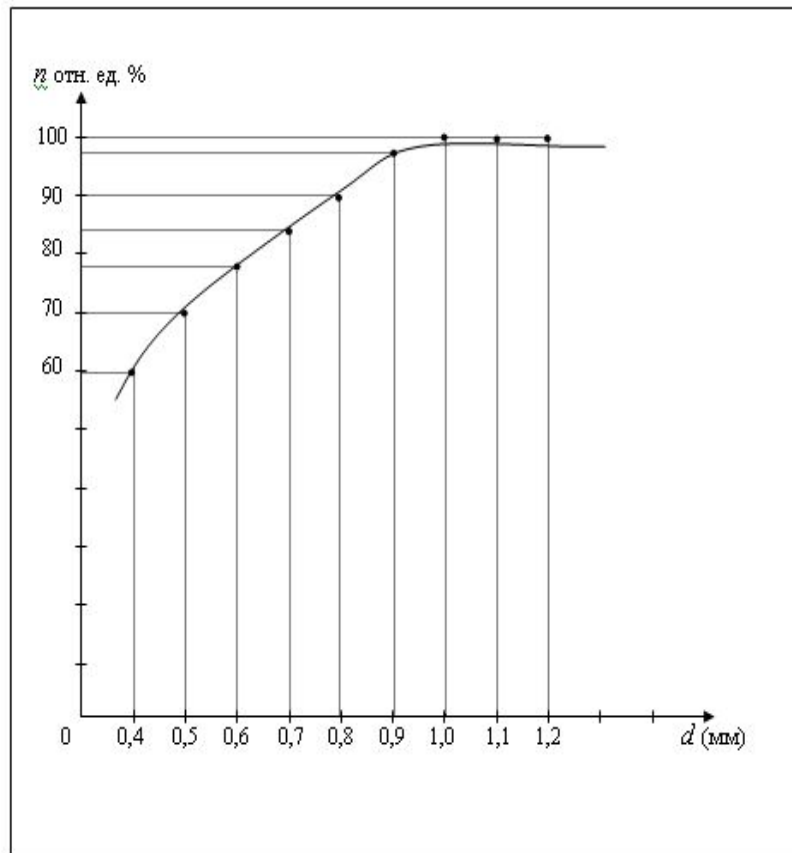


Рисунок 4.2 – Зависимость плотности потока обратно рассеянных электронов I от толщины алюминиевого рассеивателя d

В работах [100, 101] имеется анализ методической погрешности измерения толщины покрытия из-за непостоянства толщины основания. Если записать основное уравнение измерения толщины покрытия с помощью обратно рассеянного потока электронов относительно двух переменных: толщины покрытия d и толщины основания d_0 , то получим выражение

$$n(x, x_0) = n_0 [1 - \exp(-x_0)] \exp(-x) + n_n [1 - \exp(-x)], \quad (4.13)$$

где:

n_0 — плотность потока обратно рассеянных электронов от основания полубесконечной толщины;

n_n — плотность потока обратно рассеянных электронов от покрытия полубесконечной толщины;

$x = \mu \rho d$, где μ – массовый коэффициент ослабления потока электронов;

ρ – плотность вещества покрытия;

d – толщина слоя покрытия;

$x_0 = \mu \rho_0 d_0$, где ρ_0 – плотность вещества основания;

d_0 – толщина слоя основания.

На основании выражения (4.13) можно записать выражение для приращения $\Delta n(x, x_0)$:

$$\Delta n(x, x_0) = \frac{\partial n(x, x_0)}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial n(x, x_0)}{\partial x_0} \cdot \Delta x_0 \quad (4.14)$$

Первое слагаемое выражения (4.14) показывает вклад в изменение общего потока обратно рассеянного потока излучения, который обусловлен изменениями толщины покрытия. Второе слагаемое показывает долю общего приращения, вносимого за счет изменения толщины основания и определяемого как

$$\frac{\partial n(x, x_0)}{\partial x_0} \cdot \Delta x_0 = n_0 \exp(-x) \exp(-x_0). \quad (4.15)$$

В работе [100] отмечается, что методическая погрешность измерения толщины покрытия за счет флуктуации толщины основания является существенной в том случае, когда толщина основания d_0 меньше толщины насыщения d_{n0} в материале основания для электронов, применяемого источника излучения электронов. Это вполне понятно из физических принципов, лежащих в основе измерения толщины покрытия с помощью обратно отраженного потока электронов. Данный вывод подтверждается выражением (4.15), так как значение этого выражения будет сколь угодно мало отличаться от нуля, если $x_0 \geq x_{n0}$, в силу того, что $\exp(-x_0)$ в этом случае стремится к нулю. Таким образом, в выражении (4.14) при $x_0 \geq x_{n0}$ будет присутствовать одно слагаемое и функция $y = n(x, x_0)$ практически будет функцией одной переменной x , связанной только с толщиной измеряемого покрытия.

Для установления реальной толщины насыщения d_{n0} в материале топливного слоя для электронов источника $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$ были получены данные по зависимости плотности потока отраженных электронов n от пластин топливного слоя различной толщины. Эти пластины готовились из одного сердечника топливного слоя с

последующей прокаткой до нужной толщины. Из полученных после прокатки полос вырезались плоские участки с равномерной толщиной. По полученным после проведения измерений данным построен график зависимости n от толщины пластин топливного слоя d_0 . Этот график изображен на рисунке 4.3.

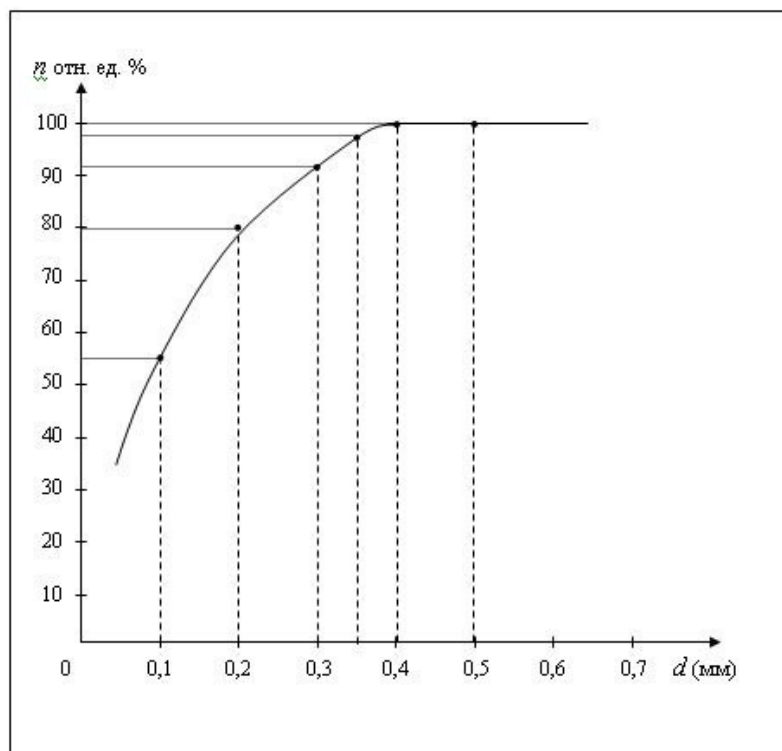


Рисунок 4.3 – Зависимость плотности потока обратно рассеянных электронов от толщины рассеивателя из материала топливного слоя твэла

Из графика на рисунке 4.2 видно, что область насыщения $d_{н0}$ наступает при толщинах топливного слоя около 0,4 мм. Если перевести это значение в соответствующее значение поверхностной плотности, то последняя составит 0,21 г/см². Становится очевидным, что в диапазоне реальных изменений величины поверхностной плотности топливного слоя от 0,64 г/см² до 1,04 г/см² методическая погрешность измерения толщины оболочек твэла за счет неравномерности поверхностной плотности топливного слоя будет в нашем случае равна нулю, так как будет выполняться условие $d_0 \geq d_{н0}$.

Далее необходимо выбрать детектор электронов для создания на его базе конструкции первичного преобразователя для измерения толщины оболочек твэла. Одной из главных целей создания АКК толщины слоёв промышленных твэлов

является достижение высокой производительности контроля. Эта цель достигается за счёт разработки многоканальной структуры измерительного тракта, когда контроль производится сразу по трём граням одновременно по трём параметрам (толщина наружной оболочки, толщина внутренней оболочки, поверхностная плотность топливного слоя).

Для создания многоканального измерительного тракта контроля толщины слоёв твэла необходима унифицированная конструкция первичного преобразователя, которая может быть использована как для измерения внутренней оболочки твэла, так и для измерения толщины наружной оболочки. Это возможно достичь при использовании малогабаритных детекторов, а именно кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД).

К настоящему времени накоплен большой опыт по применению ППД для измерения потоков электронов для задач прикладной спектроскопии ионизирующего излучения и неразрушающего контроля, что отражено в работах [26,27, 61]. Были проведены исследования и изучены характеристики следующих детекторов: детектор кремниевый с поверхностным барьером типа ДКП_с, детектор кремниевый диффузионный с поверхностным барьером типа ДКД-П_{сд}, детектор кремниевый диффузионно-дрейфовый типа ДДС.

Установлено, что детекторы типа ДКД-П_{сд} и ДКП_с имеют характеристики функции преобразования довольно близкие, а некоторое отличие друг от друга объясняется тем, что ППД типа ДКП_с обладает более высокой чувствительностью к видимому излучению, чем ДКД-П_{сд}. По этой причине чувствительные поверхности этих детекторов приходилось экранировать от действия света тонкой алюминиевой фольгой. Большая нелинейность свойственна ППД типа ДДС, особенно в области больших толщин оболочек, начиная с толщины алюминиевой оболочки равной 0,7 мм. Этот факт объясняется тем, что у данных диффузионно-дрейфовых детекторов р-і-п структуры имеется значительный по глубине "мертвый слой", значение которого может достигать 150 мкм. Часть полезного низкоэнергетичного электронного излучения поглощается в "мертвом слое", что является причиной высокой нелинейности на толщинах контролируемых оболочек свыше 0,7 мм. У

остальных рассматриваемых нами ППД толщина "мертвого слоя" не превышает 0,5 мкм, что характерно для всех поверхностно-барьерных детекторов.

К недостаткам детектора ДКП_с можно отнести малую толщину чувствительной области, которая составляет не более 200 мкм, и, как следствие этого, он имеет малую эффективность регистрации электронов изотопа Sr^{90} . Данный тип детектора имеет самую маленькую динамическую емкость перехода, а величина временной нестабильности показаний в течение 6 ч. непрерывной работы составила 3,2 %.

У ППД типа ДКД-П_{сд} временная нестабильность составила не более 4,5 %. Значение временной нестабильности определяет необходимый межнастрочный интервал времени, то есть время между двумя ближайшими настройками или калибровками прибора. Детекторы типа ДДС, ДКД-П_{сд} обладают толщиной чувствительной области до 2 мм и имеют стопроцентную эффективность регистрации спектра обратно рассеянных электронов изотопа Sr^{90} . В итоге, после сравнительного анализа технических характеристик, для создания первичного преобразователя измерения толщин оболочек промышленного твэла отдано предпочтение детектору типа ДКД-П_{сд}.

Для создания конструкции первичного преобразователя на основе выбранного нами детектора определим схему измерения толщины оболочек твэла. После изучения экспериментальных данных по угловому распределению отраженных электронов из работы [54] и изучения геометрии измерения толщины из работы [102], автором была предложена геометрия измерения толщины алюминиевых оболочек твэлов при использовании малогабаритного полупроводникового детектора и источника электронов малых размеров. Схема предлагаемой геометрии изображена на рисунке 4.4.

Для установления взаимных размеров между полупроводниковым детектором, коллиматором и изделием, а также для установления размеров коллиматора был проведен ряд экспериментов, которые позволили убедиться в правильности выводов работы [30], что в итоге помогло определить оптимальные размеры h , θ_0 , θ_1 , θ_2 , D_{k0} , l_k . Основополагающими размерами в этом случае являются диаметр облученного участка поверхности изделия и диаметр чувствительной области детектора $D_0 = 8$

мм и $D_d = 5$ мм. Наиболее подходящим в этих условиях для создания универсального первичного преобразователя (ППД) измерения толщин оболочек твэла является ППД типа ДКД-П_{сд}-20.

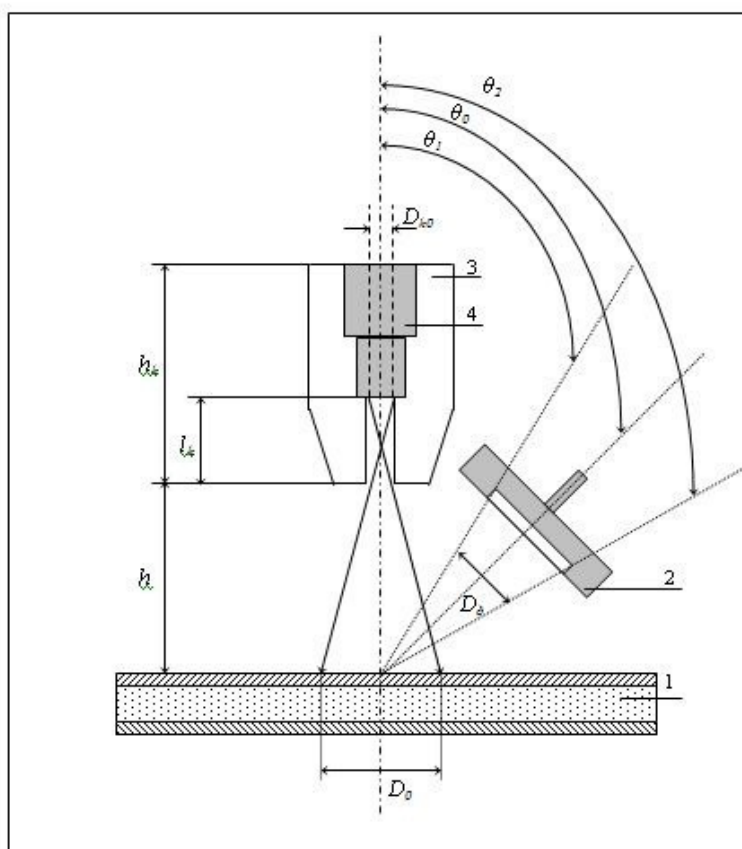


Рисунок 4.4 – Схема измерения алюминиевых оболочек промышленного твэла с ППД и малогабаритным источником электронов.

1-контролируемый твэл, 2- ППД, 3-коллиматор, 4- источник электронов

С учетом этих данных, были получены оптимальные размеры, которые определяют геометрию измерения толщины оболочек твэла, показанную на рисунке 4.4: $h = 5$ мм, $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $D_{k0} = 2$ мм, $l_k = 4$. Благодаря успешной разработке унифицированного первичного преобразователя измерения толщины оболочек, был сформирован многоканальный измерительный тракт (МИТ) АКК толщины слоёв твэлов промышленного реактора.

МИТ состоит из девяти измерительных каналов: три канала измерения толщины внутренней оболочки, три канала измерения толщины наружной оболочки и три канала измерения поверхностной плотности топливного слоя. Шестигранный твэл проходит контроль толщины оболочек первых трех граней, затем

осуществляется поворот твэла на 180° и на обратном ходе производится контроль толщины оболочек других трех граней твэла. Рассмотрим алгоритм функционирования АКК толщины слоёв твэла.

Организирующий алгоритм функционирования АКК толщины слоёв твэла состоит из трёх основных алгоритмов: алгоритма сбора и обработки информации с МИТ, алгоритма проверки измерительных каналов и системы управления, алгоритма активного контроля толщины оболочек. Рассмотрим подробнее алгоритм активного контроля толщины оболочек твэла.

Разработка данного алгоритма связана с необходимостью оперативного принятия решений по результатам измерения толщины оболочек твэла. При появлении информации о дефектном участке оболочки по любому из каналов, которые производят измерение толщины оболочек твэла, необходимо принять решение о дальнейшем продолжении процесса контроля, либо его прекращении и отбраковке твэла. Для оперативного принятия решения о годности и сокращении затрат на повторный переконтроль твэла разрабатывается алгоритм активного контроля толщины оболочек. Основные моменты активного контроля толщины оболочки твэла можно сформулировать следующим образом:

- анализ текущих результатов измерений толщины оболочки твэла и его местоположения в зоне контроля;
- выработка микро-ЭВМ сигнала о появлении дефектного участка оболочки и выдача управляющих команд на остановку и последующий реверс контролируемого твэла на расстояние, соответствующее двум тактам измерения;
- проверка исправности работы измерительного канала;
- повторный контроль предполагаемого дефектного участка изделия на пониженной скорости сканирования равной половине рабочей скорости контроля;
- анализ результатов повторного контроля и выдача команд микро-ЭВМ на продолжение контроля, либо на его прекращение.

Во время повторного контроля сбор данных проводится лишь по тому измерительному каналу, где произошла фиксация предполагаемого дефектного участка оболочки, а по остальным каналам информация в микро-ЭВМ не поступает,

а ранее полученные данные хранятся в оперативно-запоминающем устройстве ЭВМ. Длина реверса твэла L , соответствующая двум тактам измерения определяется соотношением (3.1), рассмотренным в предыдущей главе.

Алгоритм проверки исправности измерительного канала проводится в следующем порядке:

- проведение анализа и сравнение полученных при первоначальном и повторном контроле; результатов измерения толщины оболочки в месте, соответствующем конечной точке реверса твэла,
- измерительный канал считается исправным, если результаты измерения толщины оболочки при первоначальном и повторном контроле совпадут в пределах допустимой погрешности;
- измерительный канал нуждается в настройке и регулировке в случае, если результаты измерения толщины оболочки первоначального и повторного контроля отличаются друг от друга на значение, превышающее допустимый разброс, при этом процесс контроля прекращается.

В случае исправности измерительного канала начинается повторный контроль ранее измеренного участка оболочки на пониженной скорости сканирования $0.5 V_P$. В случае подтверждения первоначального результата измерения толщины оболочки в месте обнаружения дефектного участка, твэл признается бракованным и контроль прекращается, выдается команда на вывод твэла из зоны контроля. Если же результат первоначального измерения не подтверждается при повторном контроле, то считается, что он был ранее обусловлен сбоем в работе измерительного канала и тогда возобновляется контроль твэла по всем каналам комплекса на рабочей скорости сканирования V_P .

Целесообразность проведения повторного контроля предполагаемого дефектного участка оболочки на пониженной скорости состоит в том, что в этом случае происходит уменьшение площади усреднения однократного измерения толщины оболочки, что улучшает возможность выявления дефектного участка оболочки. Таким образом, сравнивая результаты измерения толщины оболочки в одном и том же месте в разное время, можно судить о метрологической исправности

измерительного канала. Кроме того, у твэла на краях есть небольшие участки, где отсутствует топливный слой, поэтому сигнал от этого участка используется как начало диапазона измерения толщины оболочки твэла и хорошо фиксируется уровень шума измерительного канала, при превышении которого также вырабатывается сигнал о дополнительной калибровке.

На рисунке 4.5 изображена кинематическая схема установки МПК. Основные функции по управлению процессом контроля, организации взаимодействия программ обработки информации, синхронизации процесса контроля с процессом сканирования твэла выполняет организующий алгоритм. Его работа поясняется на рисунке 4.5. АКК твэлов типа МПК работает в двух режимах: ТЕСТ и РАБОТА.

В режиме ТЕСТ АКК работает по алгоритму проверки работоспособности автоматизированного комплекса. В режиме РАБОТА по команде ПУСК с устройства ввода-вывода производится ввод исходных данных для контроля. Алгоритм ввода исходных данных передает управление подпрограмме проверки канал измерительного каркаса. Данная подпрограмма генерирует серию команд проверки блоков измерительного каркаса.

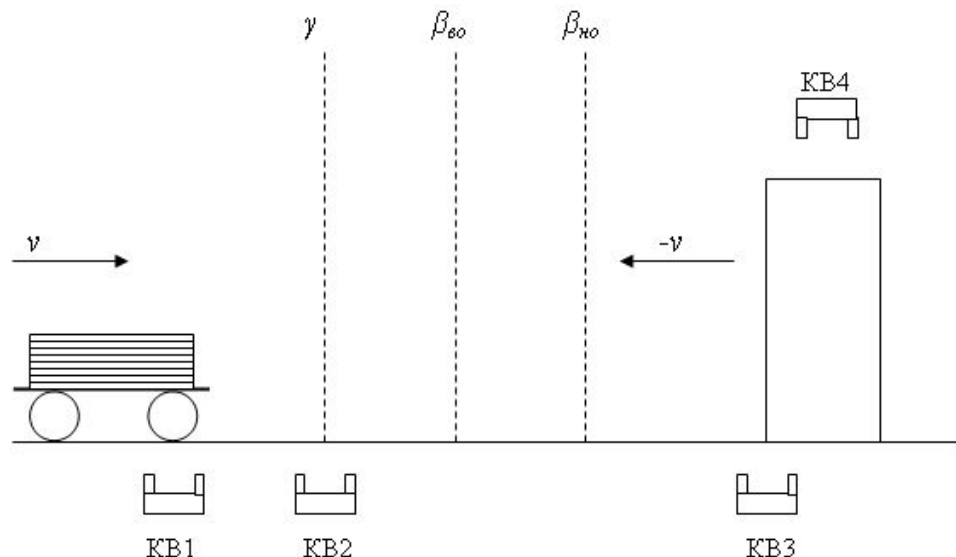


Рисунок 4.5 – Кинематическая схема автоматизированного комплекса типа МПК

KB1, KB2, KB3, KB4 – датчики положения;

$\gamma, \beta_{во}, \beta_{н}$ – оси соответственно γ - детекторов, β - детекторов для внутренней и наружной оболочек.

Информация о неисправности блоков выводится на монитор или печать. Подпрограмма проверки измерительного канала передает управление алгоритму проверки исходного положения тележки с твэлом.

Если датчик исходного положения КВ-1 подтверждает исходное состояние, то начинается проверка условия уровня начальной скорости счета в каналах, измеряющих неравномерность поверхностной плотности топливного слоя. Для этого производится запуск измерительных каналов, и полученная информация сравнивается с заданным уровнем начальной скорости счета в измерительных каналах. Если измеренная величина начальной скорости счета отличается от заданной более чем на $\pm 5\%$, то выводится сообщение на монитор или печать.

Команда движения твэла в прямом направлении на максимальной скорости V_0 передается в интерфейсный блок электропривода (ИБЭ), после чего начинается перемещение тележки с твэлом к зоне контроля. Циклически проверяется состояние датчика начала зоны контроля КВ-2, после срабатывания которого производится переключение скорости перемещения тележки с твэлом с V_0 на рабочую скорость сканирования V_p .

Одновременно с этим запускается измерительный тракт и начинается суммирование циклов измерения. При появлении в зоне контроля топливного слоя твэла по какому-либо из каналов измерительного тракта, формируется обращение к алгоритму обработки информации, и начинается заполнение счетчика количества циклов измерения соответствующего канала.

Топливный слой твэла отстоит от начала и конца грани твэла в среднем на расстоянии около 10–12 мм, образуя «холостые концы» грани твэла, которые представляют собой однородный слой алюминия толщиной около 2,5 мм.

Вход контролируемого твэла в плоскости расположения детекторов контроля толщины наружной и внутренней оболочек ($\beta_{но}$, $\beta_{во}$) сопровождается остановкой тележки с твэлом для контроля уровня начальной скорости счета в каналах, измеряющих толщину оболочек твэла.

Вход контролируемого твэла в эти плоскости фиксируется датчиком КВ-2 с помощью системы из двух дополнительных флажков, которые вызывают срабатывание датчика КВ-2, и расположены на остоле тележки друг за другом. По ходу движения тележки с твэлом флажки поочередно попадают в датчик КВ-2, вызывая его срабатывание. Команда СТОП передается в ИБЭ, после чего производится запуск измерительных каналов и полученная информация сравнивается с заданным уровнем начальной скорости счета отраженных электронов от холостых концов твэла. Если измеренная величина начальной скорости отклоняется от заданной величины, то выводится сообщение на монитор или печать.

После проверки уровня начальной скорости счета отраженных электронов от холостого конца твэла производится включение рабочей скорости сканирования V_p и контролируется появление топливного слоя в плоскости детекторов $\beta_{но}$, а затем и $\beta_{во}$. Как только средняя скорость счета в канале превысит определенный уровень, что является признаком появления топливного слоя, происходит обращение к алгоритму обработки информации по толщине оболочек.

Выход твэла из зоны контроля сопровождается последовательным выходом топливного слоя из узлов контроля, плоскости которых условно обозначаются на рисунке 4.5 $\beta_{но}$, $\beta_{во}$, γ , и завершением обращения к алгоритмам обработки информации по контролю толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя. Одновременно прекращается заполнение соответствующих счетчиков циклов измерений каждого канала.

В этот момент происходит подсчет суммы циклов измерений от датчика КВ-2 до датчика КВ-3, а твэл на рабочей скорости перемещается к узлу поворота. Захват твэла узлом поворота фиксируется датчиком КВ-3, и по команде прерывания в интерфейсный блок электропривода передается сигнал СТОП. После прекращения движения тележки производится анализ суммарного числа циклов измерения с целью контроля средней рабочей скорости сканирования твэла.

Если скорость сканирования более чем на $\pm 5\%$ отличается от номинального значения, то на монитор выводится строка “ $\neq V$ ” и процесс контроля прекращается.

Если скорость сканирования не вышла за пределы допуска, то производится обращение к алгоритмам обработки информации по неравномерности поверхностной плотности топливного слоя и толщине оболочек. Осуществляется промежуточная обработка результатов контроля, после чего в интерфейсный блок электропривода выдается команда ПОВОРОТ. При повороте твэла на 180° срабатывает датчик КВ-4 и привод узла поворота выключается.

Движение твэла в обратном направлении производится с рабочей скоростью V_p и вновь сопровождается подсчетом суммы циклов измерения на расстоянии от датчика КВ-3 до датчика КВ-2. Процесс контроля твэла в обратном направлении аналогичен процессу контроля в прямом направлении за исключением того, что остановка твэла перед плоскостями узлов контроля толщины оболочек $\beta_{но}$, $\beta_{во}$ не производится.

По окончании контроля твэла включается максимальная скорость сканирования V_0 в обратном направлении движения и датчик КВ-1 вырабатывает сигнал о возвращении твэла в исходное состояние. По этому сигналу тележка с твэлом останавливается и производится анализ средней скорости перемещения.

По окончании анализа скорости осуществляется переход на алгоритм окончательной обработки результатов контроля, по которому анализируются результаты контроля толщины оболочек, рассчитываются коэффициенты неравномерности поверхностной плотности топливного слоя.

Результаты анализа и расчета передаются алгоритму вывода документа с результатами контроля. Структурная схема алгоритма функционирования автоматизированного комплекса типа МПК изображена на рисунке.4.6.

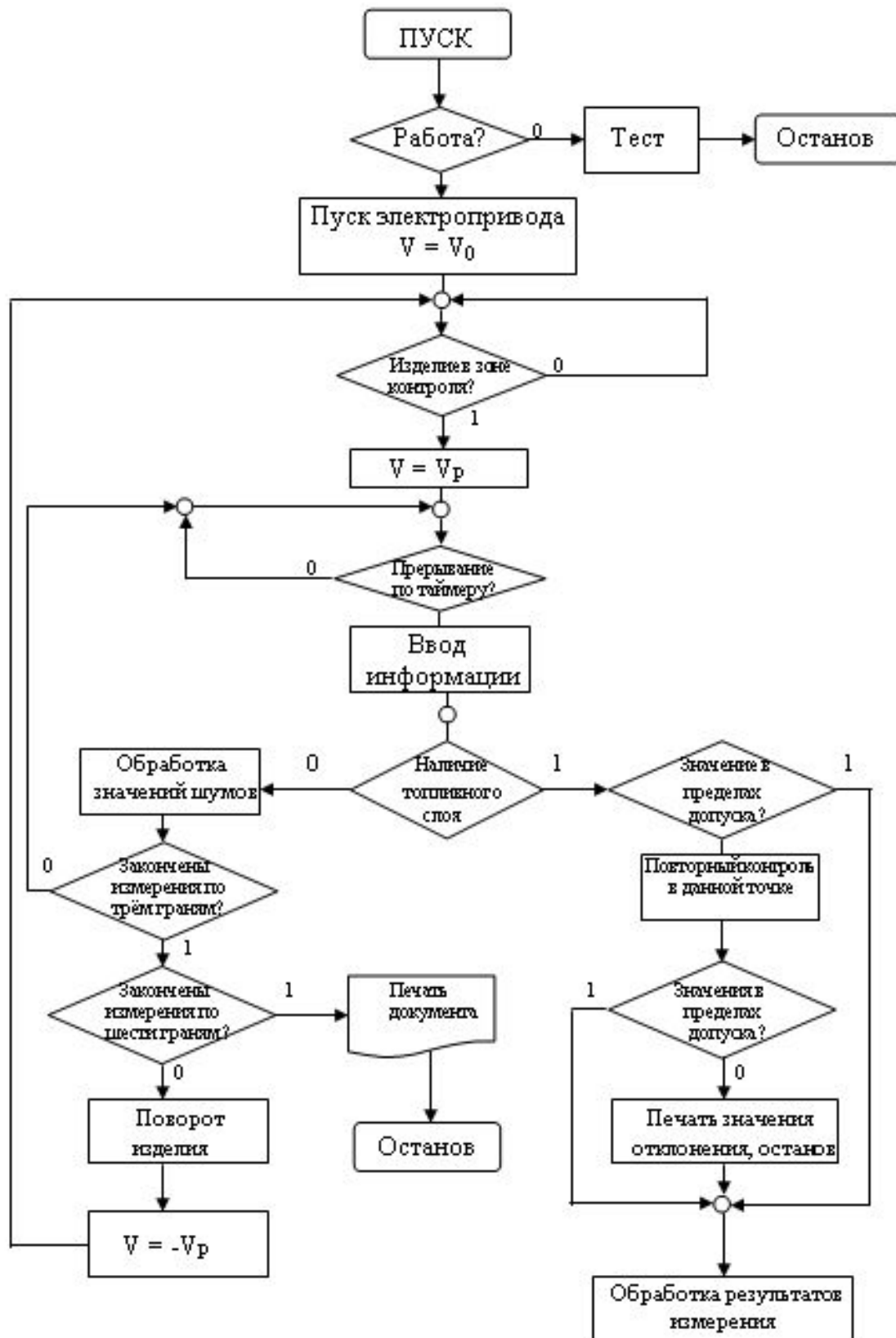


Рисунок 4.6 – Структурная схема алгоритма функционирования автоматизированного комплекса типа МПК твэлов промышленного реактора

В заключение этого раздела рассмотрим алгоритм проверки или калибровки измерительных каналов. Проверка настройки измерительных каналов системы заключается в определении контрольных точек реальных номинальных статических характеристик преобразования каждого канала и сравнении их с соответствующими паспортными значениями. Проверка производится в режиме ТЕСТ с помощью рабочего стандартного образца (PCO) специальной конструкции.

PCO представляет собой алюминиевый имитатор твэла, в плоскостях граней которого расположены участки с аттестованной толщиной внутренней и наружной оболочек и поверхностной плотностью топливного слоя. PCO устанавливают в одно из фиксированных положений в зоне контроля и на мониторе выставляют соответствующие номера грани $N_{гр}$ и номера пластины $N_{пл}$.

Каждая комбинация этих номеров имеет соответствующее паспортное значение скоростей счета $f_{этоб}i$, $f_{этмс}i$ и допустимые отклонения $\varepsilon_{этоб}i$, $\varepsilon_{этмс}i$. Данные по каждому из каналов накапливаются в течение 5 циклов опроса всех блоков счетчиков измерительных каналов и заносятся в память микро-ЭВМ. Находятся средние значения скоростей счета по 5 циклам измерения $\bar{f}_{mci}$, $\bar{f}_{obi}$. Потом вычисляются отклонения $\left| \bar{f}_{этоби} - \bar{f}_{оби} \right| = \varepsilon_{оби}$, $\left| \bar{f}_{этмси} - \bar{f}_{мси} \right| = \varepsilon_{мси}$. Полученные значения отклонения сравниваются с предельно допустимыми значениями отклонений, и в случае необходимости производится подстройка соответствующих измерительных каналов.

При функционировании алгоритма в режиме ТЕСТ производится формирование массива эталонных значений параметров: $f_{этоб}i$, $f_{этмс}i$ и $\varepsilon_{этоб}i$, $\varepsilon_{этмс}i$, где i – символ, обозначающий номер комбинации $N_{гр}$ и $N_{пл}$. Кроме того, производится формирование массива суммарных и усредненных значений параметров, полученных при контроле рабочего стандартного образца, и организация вывода на монитор отклонений по каждому образцу.

4.2 Алгоритм радиометрического контроля сплошности топливного столба твэлов типа ВВЭР

Важной характеристикой технологического процесса изготовления твэлов реактора ВВЭР является качество их снаряжения, что отражается на сплошности топливного столба твэла, в котором должны отсутствовать недопустимые зазоры между урановыми таблетками, их сколы, крошка в компенсационном объёме. На рисунке 4.7 схематично дано изображение несплошностей топливного столба твэла.

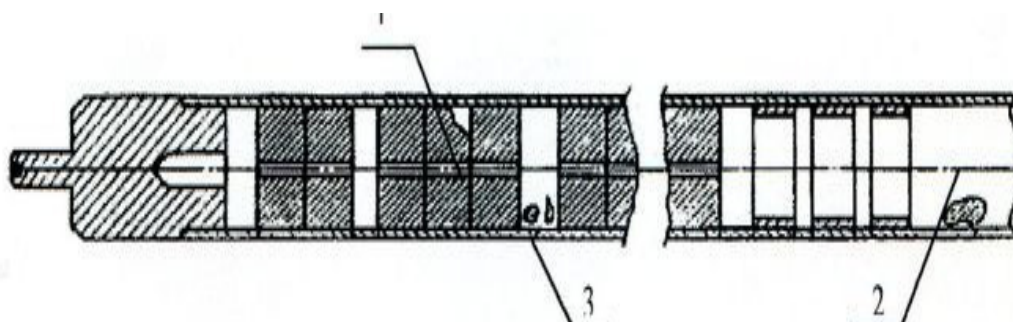


Рисунок 4.7 – Виды несплошности топливного столба:

1- скол таблетки, 2- крошка в компенсационном объёме,
3- зазор, частично заполненный крошкой.

Для контроля сплошности топливного столба применяется гамма-абсорбционная радиометрическая методика. Контролируемый твэл сканируется через плоскость двух взаимноперпендикулярных пучков гамма-излучения и каждый канал измерения регистрирует прошедший через твэл поток гамма-излучения.

На рисунке 4.8 изображена схема измерения сплошности топливного столба твэла. Скорость счёта импульсов регистрируемых детектором каждого канала зависит от наличия несплошностей топливного столба. Длительность временного интервала с аномально высокой скоростью счёта будет характеризовать величину несплошности.

Использование двух источников гамма-излучения с узко коллимированными пучками во взаимно перпендикулярном направлении позволяет повысить достоверность измерения несплошностей топливного столба твэла. Достигается это путем сравнения и анализа сигналов с каждого канала измерения. Кроме того,

применение двух каналов измерения позволяет добиться снижения уровня статистической погрешности измерения несплошностей.

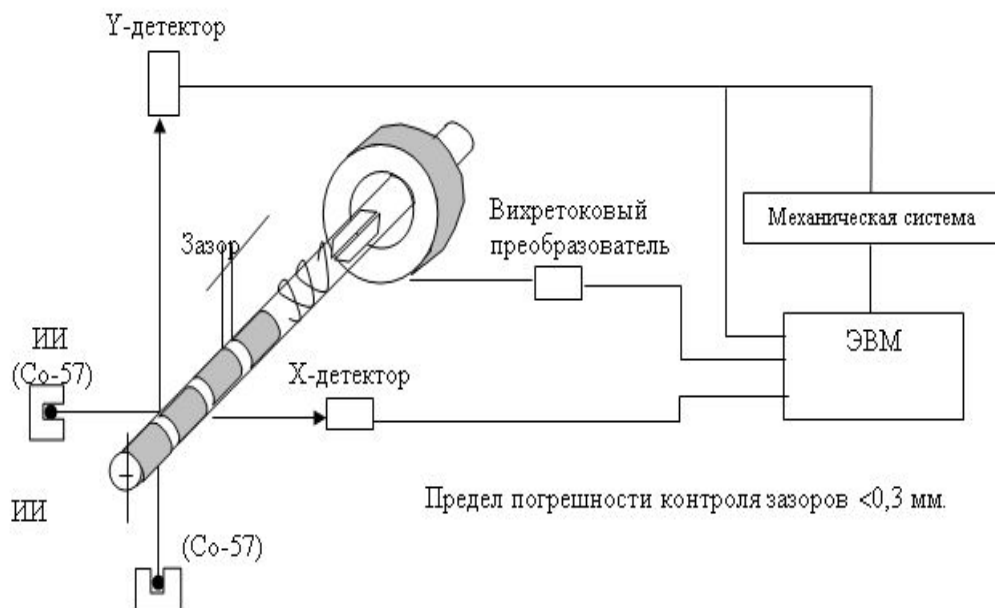


Рисунок 4.8 – Схема измерения сплошности топливного столба ТВЭЛ

В качестве источника гамма-излучения применяется радиоизотоп Co^{57} с энергией квантов излучения 123 кэВ, которые имеют резонансное сечение поглощения атомами урана. На рисунке 4.9 представлена форма сигнала от единичного зазора между топливными таблетками.

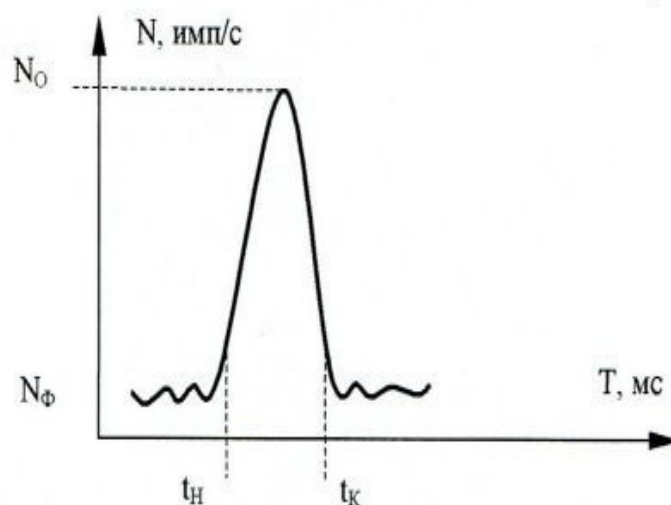


Рисунок 4.9 – Форма сигнала от единичного зазора

N_0 – скорость счёта гамма-квантов, прошедших через оболочку твэла без топливных таблеток;

N_ϕ – скорость счёта гамма-квантов, прошедших через оболочку и топливную таблетку снаряженного твэла;

t_H – время начала отсчёта длительности интервала;

t_K – время окончания отсчета длительности интервала.

Величина интервала времени, $t_K - t_H$ пропорциональна длине зазора между топливными таблетками. Время определения моментов t_H и t_K имеет характерную нестабильность, что влияет на точность измерения величины зазоров. В работе [103] предложена следующая методика измерения значения размера зазора.

В момент фиксации момента времени t_H запускается генератор импульсов определенной частоты и происходит подсчёт числа импульсов до момента наступления времени t_K . Количество импульсов будет связано с величиной зазора. Частота генератора импульсов синхронизирована с датчиком линейных перемещений (ДЛП) твэла и известен коэффициент пересчёта числа импульсов в значение длины зазора между топливными таблетками.

На точность определения времени начала и конца подсчёта импульсов влияют статистические флуктуации регистрируемого потока гамма-излучения. В результате этого превышение нижнего и верхнего порога срабатывания может происходить при разных положениях границ измеряемого зазора, что является дополнительным источником случайной погрешности измерения величины несплошности.

Для повышения достоверности выявления и оценки величины несплошностей было предложено использовать как основной критерий не интервал времени $t_K - t_H$, а площадь полезного сигнала от несплошности S . В работе [15] предложен и обоснован данный алгоритм измерения величины зазоров топливного столба твэла. Этот алгоритм и устройство для его реализации защищено патентами РФ [13, 14].

В качестве порогового значения для подсчёта S выбирается среднее значение скорости счёта фона N_ϕ , которое измеряется в статическом режиме на участке твэла, снаряженного топливными таблетками. Время начала и окончания подсчёта площади полезного сигнала будет определяться временем превышения скорости

счёта N_ϕ на определенную величину с учётом статистических флуктуаций. Очевидно, что величина измеряемого зазора линейно связана с величиной перемещения твэла относительно сколлимированного пучка излучения. Рассмотрим процесс перемещения твэла с зазором между таблетками L_z относительно щели коллиматора шириной L_K на рисунке 4.10.

Площадь полезного сигнала S можно получить как сумму количества зарегистрированных импульсов $\sum N_i$ за время сканирования твэла с момента начала и конца регистрации несплошности в течение i циклов измерения. Каждый i цикл процесса регистрации несплошности составляет 1 мс, перемещение твэла за это время составляет 0,15 мм. Количество зарегистрированных импульсов суммируется по двум каналам и подсчитывается их среднее значение, которое фиксируется в оперативной памяти процессора для дальнейшей оценки величины несплошности.

Из рассмотрения рисунка 4.10 видно, что $L_d = L_P - L_K$, т.е. является разностью длины перемещения твэла и ширины коллиматора источника излучения. В связи с этим, площадь полезного сигнала от зазора можно считать равной $S = N_0 \cdot L_z$, где N_0 – это скорость счёта гамма-квантов, полученная на пустой оболочке твэла.

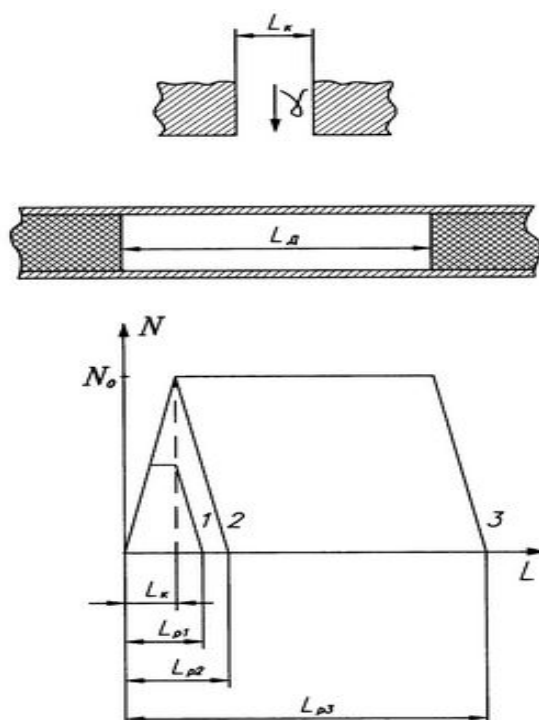


Рисунок 4.10 – График зависимости скорости счёта гамма-квантов от величины перемещения твэла с зазором L_d относительно коллиматора с выходным окном L_K

1 - $L_K > L_d$; 2 - $L_K = L_d$; 3 - $L_K < L_d$

N_0 – скорость счёта гамма-квантов, прошедших через оболочку твэла без топливных таблеток;

L_{P1}, L_{P2}, L_{P3} - величина перемещения твэла в каждом случае.

Исходя из того, что измерение производится по двум каналам, то можно записать общее выражение для величины зазора, как

$$L_d = \frac{1}{2} (S_1 / N_{01} + S_2 / N_{02}) , \quad (4.16)$$

где:

S_1, S_2 – площади полезного сигнала по двум каналам, полученные в двух направлениях просвечивания при перемещении твэла, N_{01}, N_{02} – скорости счёта гамма-квантов на пустой оболочке в двух направлениях просвечивания.

При реализации данного алгоритма для контроля несплошностей топливного столба твэлов ВВЭР-1000 удалось снизить случайную погрешность измерения малых зазоров в 1,5 раза, что было подтверждено многократными измерениями аттестованных стандартных образцов сплошности с малыми зазорами.

4.3 Алгоритм контроля геометрических размеров твэлов реакторов типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000

Тепловыделяющие элементы являются одними из основных частей тепловыделяющих сборок для АЭС. В связи с этим требования к геометрическим параметрам твэла определяются конструкцией ТВС. Для обеспечения качественной сборки ТВС и последующего эффективного использования ядерного топлива в реакторах, твэл в процессе производства необходимо подвергать сплошному контролю по геометрическим параметрам.

В первых линиях выходного контроля твэлов ВВЭР контроль каждого критического параметра геометрии твэла осуществлялся на отдельных измерительных позициях с использованием контактных мерительных приспособлений: индикаторные головки, концевые меры, щупы. В связи с этим

некоторые геометрические параметры твэла, такие как несоосность оболочки твэла с заглушкой и прогиб твэла, контролировались выборочно.

Для решения задачи сплошного контроля геометрических параметров твэла была разработана оптикоэлектронная методика измерения геометрических параметров твэлов реакторов типа ВВЭР. В работах [72, 104] представлены результаты исследований и испытаний оптикоэлектронного измерителя на базе фотодиодных линеек для контроля геометрических размеров твэлов реактора ВВЭР-1000. В дальнейшем в работах [19, 73] был обоснован алгоритм и методика комплексного контроля всех геометрических параметров твэла ВВЭР для создания АКК геометрических параметров твэла. Разработанная конструкция такого АКК позволяет осуществить высокопроизводительный сплошной контроль всех критических параметров геометрии твэлов реакторов ВВЭР. Конструкция твэла для российских реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 приведена на рисунке 4.11.

Тепловыделяющие элементы имеют вид труб (диаметром 9 мм и длиной от 2,5 до 4 м), заполненных топливными таблетками из диоксида урана, с заглушками на концах труб. Контролю подлежат внешний диаметр D оболочки твэла, номинальный размер которого составляет с технологическими допусками: $D = 9,1^{+0,050}_{-0,050}$ мм), длина L (номинальное значение с допусками: $L = 3837^{+2}_{-2}$ мм для ВВЭР-1000, $L = 2551^{+2}_{-2}$ мм для ВВЭР-440), отклонения от прямолинейности B оболочки на базе 250 мм ($B \leq 0,3$ мм), соосность H нижней и верхней заглушек относительно оболочки твэла.

Необходимо отметить, что для обеспечения заданных требований на геометрические параметры D и B их измерение необходимо производить по всей длине твэла с интервалом 2 мм, причём диаметры D должны измеряться в двух ортогональных (поперечных) сечениях оболочки для выявления возможной некруглости труб.

Автоматизированный комплекс контроля твэлов должен обеспечивать измерение указанных геометрических параметров с точностями, определяемыми полями соответствующих технологических допусков. Погрешности измерений параметров D , L , B , H должны находиться в пределах: $\Delta D \leq \pm 0,01$ мм; $\Delta L \leq \pm 0,4$ мм; $\Delta B \leq \pm 0,05$ мм; $\Delta H \leq \pm 0,02$ мм. Положение и протяженность вдоль оси Z участков с

диаметрами, выходящими за границы допусков контролируемого параметра, должны определяться с погрешностью не более $\Delta Z = \pm 5$ мм.

Важно, что АКК должен осуществлять контроль твэлов при движении их по технологической линии (вдоль оси Z) в условиях ряда возмущающих факторов: поперечных вибраций изделий вдоль осей X и Y с амплитудой до $\pm 1,5$ мм, меняющихся во времени фоновых засветок, наличия частиц пыли на поверхности твэла и освещении его квазипараллельным пучком света.

В плоскости многоэлементного фотоприёмника формируется теневое изображение объекта. В качестве первичного преобразователя используется ПЗС линейка (2048 пикселей, размер пикселя 14 мкм), которая выполняет электронное сканирование изображения объекта. Выходной сигнал с первичного преобразователя оцифровывается и затем обрабатывается с помощью сигнального процессора.

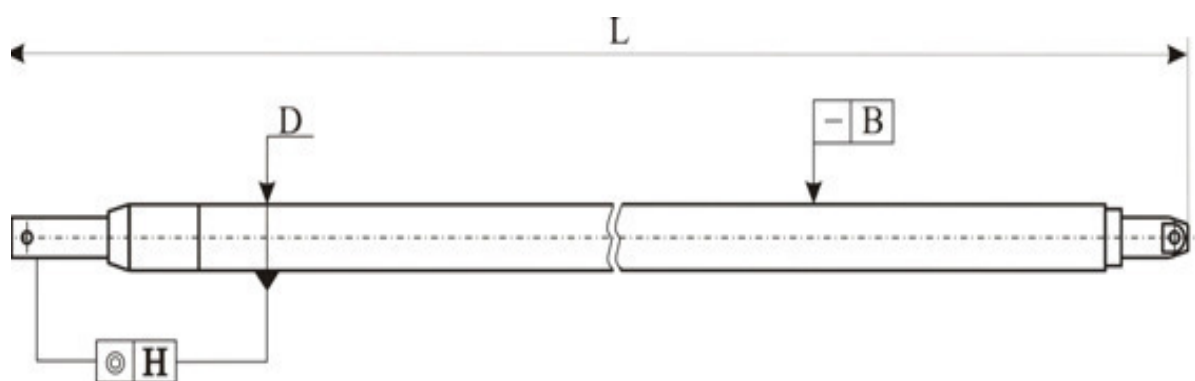


Рисунок 4.11 – Вид твэлов типа ВВЭР -1000 и ВВЭР-440

Уменьшение влияния вибраций твэл вдоль осей X и Y на точностные характеристики датчика достигается путем малой экспозиции, а также путем увеличения глубины резкости фотоприемного первичного преобразователя, за счет соответствующего выбора углового размера апертурной диафрагмы. По положению фронтов сигнала вычисляется диаметр твэл в одном поперечном сечении и положение его оси по координате X . Измерение диаметров на протяжении всего твэла, включая нижнюю и верхнюю заглушки, осуществляется путем перемещения изделия вдоль его оси через измерительную зону. Отклонение от прямолинейности

образующей оболочки твэла определяется с помощью датчиков измерения диаметров, расположенных в трех поперечных сечениях. Отклонение от прямолинейности вычисляется по положению оси твэла. Измерение диаметров производится в шести направлениях относительно поперечного сечения твэл. Измерение всех контролируемых параметров осуществляется с помощью двух типов датчиков: теневого датчика и датчика измерения длины. С этой целью была проведена разработка конструкции специализированных теневых датчиков для измерения каждого критического геометрического параметра твэла.

На рисунке 4.12 изображена схема теневого измерительного датчика, с помощью которого осуществляется измерение диаметра твэла, прогиба твэла на определенной длине и несоосности твэла.

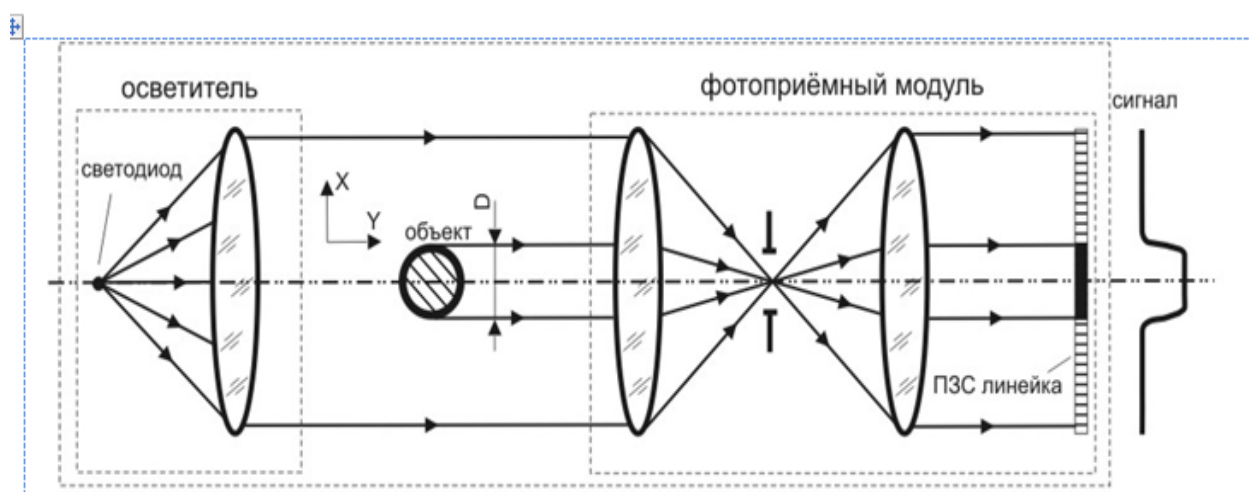


Рисунок 4.12 – Конструкция теневого измерительного датчика

На рисунке 4.13 изображена конструкция датчика измерения длины твэла. Для измерения длины твэла (L) использовано два теневых датчика. При этом, каждый из них измеряет положение одного из концов твэла. Однако вследствие того, что на концах заглушек имеются прорези, оптическая схема датчиков (рисунок 4.13) отлична от схемы, приведенной на рисунке 4.12.

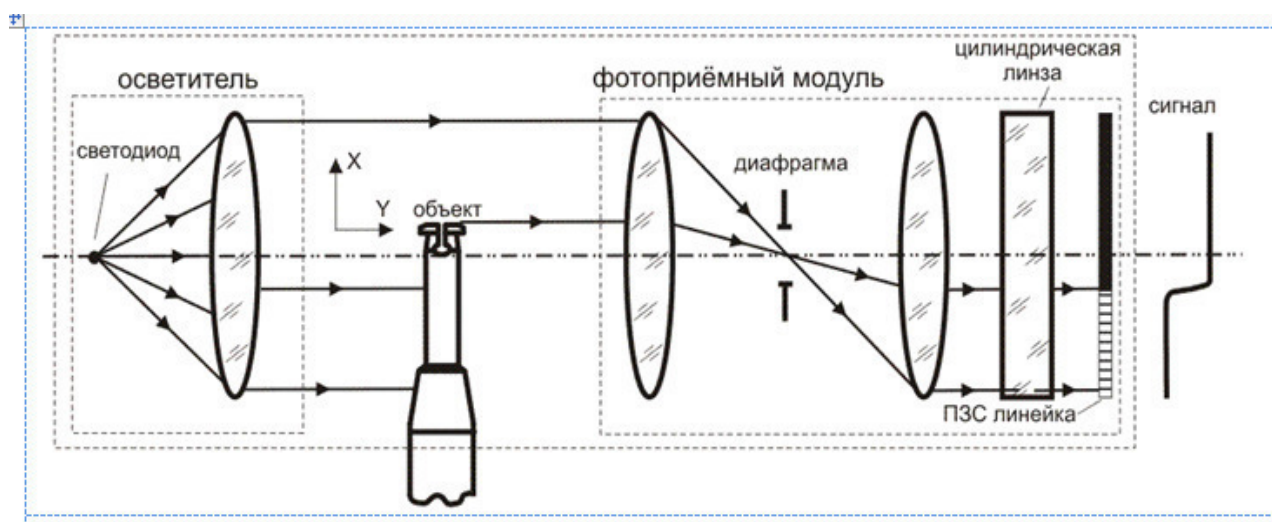


Рисунок 4.13 – Конструкция теневого датчика для измерения длины твэла

В схему данного датчика введен дополнительный элемент – цилиндрическая линза. В направлении оси твэла эта линза интегрирует световой поток, преобразуя изображение объекта в узкую темную полосу, тем самым снижая влияние прорези на теневой сигнал.

Для измерения несоосности трубы твэла и заглушек используется датчик, подобный тому, что изображён на рисунке 4.12. Однако измерение соосности подразумевает определение положения оси трубы твэла и оси заглушек, что поясняется на рисунке 4.14. Для этой цели требуется измерить два диаметра в двух поперечных сечениях на трубе и два диаметра в двух поперечных сечениях на заглушке. В этом случае метод механического сканирования твэла вдоль оси неприемлем вследствие наличия колебаний концов твэла во время движения. Для измерения несоосности необходимо чтобы все сечения измерялись с малым временным интервалом (порядка миллисекунды). Это требование удовлетворяется путём регистрации изображений с помощью матричного фотоприемника.

На рисунке 4.15 представлена схема измерения геометрических параметров твэла с использованием специализированных датчиков, изображенных на рисунках 4.12-4.13, поясняющая алгоритм контроля критических параметров твэла в технологической линии производства твэлов.

твэл удерживается двумя парами роликов. Нижние ролики являются опорными, ролики сверху соединены с электромеханическими датчиками угла поворота. Датчики поворота позволяют осуществлять координатную привязку при сканировании твэл по длине. Измерительные датчики сгруппированы в трёх измерительных позициях. При этом их оси (оптические оси входящих в их состав проекционных систем) и ось твэл ориентированы взаимно ортогонально. Использование трёх пар датчиков измерения диаметров позволяет измерить отклонение от прямолинейности оси ТВЭЛ на базе 250 мм. Один из датчиков длины расположен во второй измерительной позиции. Другой датчик вынесен на расстояние, примерно равное номинальной длине твэл.

Длина твэл измеряется в момент одновременного нахождения концов изделия в измерительной зоне датчиков. Таким образом, предложенный алгоритм измерения геометрических параметров твэла позволяет за один проход зоны контроля получить данные о четырёх геометрических размерах конструкции твэла. Скорость сканирования твэла может достигать до 8 м/мин.

С помощью внедрения данного АКК решается задача высокопроизводительного сплошного контроля геометрических размеров твэлов реактора типа ВВЭР.

4.4 Алгоритм функционирования автоматизированного комплекса контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000

Тепловыделяющая сборка (ТВС) реактора ВВЭР-1000 представлена на рисунке.1.1. Каркас ТВС состоит из центральной трубы, тринадцати или восемнадцати направляющих каналов и закрепленных на них дистанционирующих решеток, равномерно распределенных по высоте. Общий вид дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000 представлен на фотоснимке (рисунок 4.16).

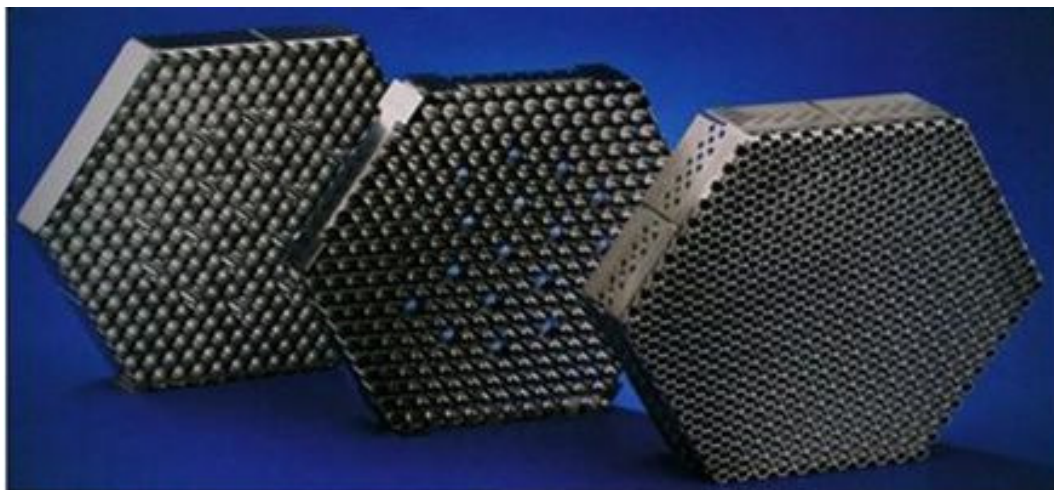


Рисунок 4.16 - Общий вид дистанционирующей решётки ТВС реактора ВВЭР-1000

Каждая решетка состоит из 312 или 317 ячеек (общее число ячеек и направляющих каналов равно 331). Каждая ячейка решетки представляет собой полую, тонкостенную интегральную призму высотой 20 мм с тремя цилиндрическими выступами в направлении центра ячейки (рисунок 4.17а).

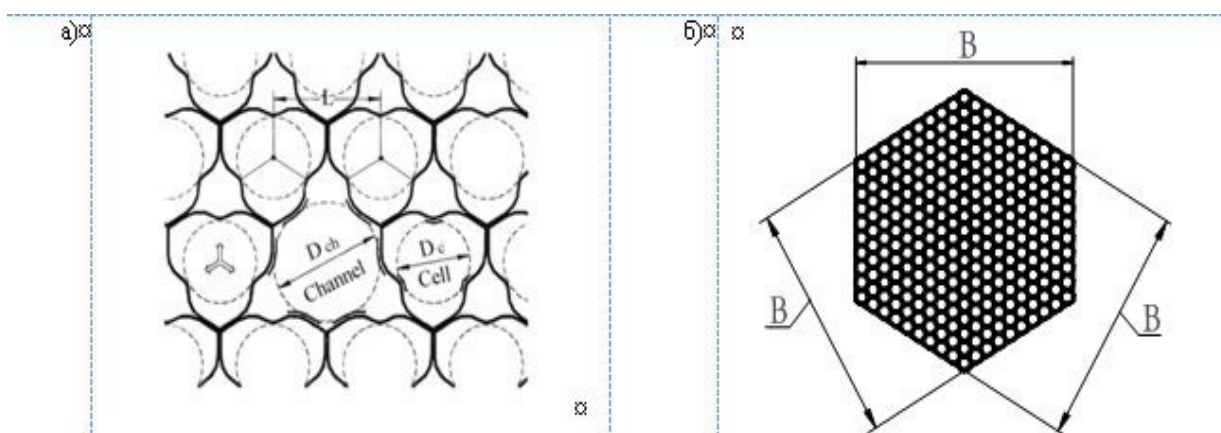


Рисунок 4.17 - Геометрические параметры дистанционирующей решётки при контроле: а - фрагмент ячейки и зоны направляющего канала; б – общая размерная конфигурация

Образующийся в процессе сборки «натяг» в соединении «ячейка - твэл» (за счет выступов ячейки) формирует и удерживает твэл в заданном положении, как в процессе транспортно-технологических операций, так и при эксплуатации ТВС.

Автоматизированный комплекс должен контролировать следующие параметры дистанционирующих решеток (рисунок 4.17а): диаметры $D_c^{(n)}$ ячеек, формируемые их выступами, т.е. диаметры вписанных окружностей ячеек (номинальный размер $D_{c,nom} = 8,9$ мм); диаметры $D_{ch}^{(m)}$ вписанных окружностей под направляющие каналы (номинальный размер $D_{ch,nom} = 12,9$ мм); расстояния $L^{(k)}$ между соседними ячейками, т.е. расстояния между центрами вписанных окружностей в ячейках (номинальный параметр $L_{nom} = 12,75$ мм); сдвиги центров вписанных окружностей для ячеек относительно конструкции рисунка дистанционирующей решетки $S^{(q)}$ (сдвиги позиционирования); размеры «под ключ» (рисунок 4.17б) $B^{(p)}$, характеризующие габаритные размеры ТВС (номинальные размеры $B_{1,nom} = 234$ мм, $B_{2,nom} = 233,5$ мм). По техническим условиям [6] необходимо обеспечить измерение геометрических параметров дистанционирующих решеток: $D_c^{(n)}$, $D_{ch}^{(m)}$, $L^{(k)}$, $S^{(q)}$, $B^{(p)}$ с погрешностями, не превосходящими следующие предельные значения: $\Delta D_c = \pm 0,03$ мм, $\Delta D_{ch} = \pm 0,05$ мм, $\Delta L = \Delta S = \pm 0,04$ мм, $\Delta B = \pm 0,1$ мм.

Для этой цели использовались координатно-измерительные машины (КИМ) импортного производства, такие как «LK TOOLS» (Великобритания) или «KARL ZEISS» (ФРГ). Данные измерительные комплексы используют контактные методы измерения геометрических размеров с помощью различных щупов. В связи с высокой трудоемкостью контактного способа контроля время измерения геометрических параметров одной решётки составляет до 6 ч. Для проведения метрологических измерений и при опытных работах по отладке технологии изготовления решёток, такая производительность ещё допустима, но для проведения штатного сплошного контроля в технологической линии производства решёток такая производительность контроля неприемлема.

Предложено разработать методику измерения геометрических параметров дистанционирующих решёток с помощью оптикоэлектронного метода технического зрения. В работах [34–36] рассмотрена методика оптикоэлектронного измерения геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000, а также алгоритмы обработки информации и функционирования измерительного комплекса и его конструкция. После проведения исследований

экспериментального образца измерительного комплекса разработан АКК геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000, о чём изложено в работах [90, 91].

По техническим требованиям производительность контроля автоматизированного комплекса должна составлять не менее одной дистанционирующей решетки за 0,5 ч. Важным обстоятельством в данной задаче является то, что для вычисления некоторых параметров необходимо знать конфигурацию канала ячейки (по ее высоте), используя информацию о геометрии трех указанных цилиндрических выступов и их расположении в пространстве. Очевидно, что это требует получения достаточно большого объема 3D информации для каждой ячейки дистанционирующей решетки. Указанное замечание справедливо и для измерения канальных отверстий.

В этом случае задача значительно усложняется: параметр вписанной окружности D вычисляется, исходя из геометрии и расположения в пространстве шести цилиндрических выступов. Расчеты показывают, что для получения достоверной информации о конфигурации каналов под твэлы необходимо иметь информацию о выступах не менее чем в 12 сечениях по высоте дистанционирующей решетки. Для решения этой задачи предлагается алгоритм многоточечного структурного освещения объекта.

Рассмотрим детально некоторые особенности и недостатки традиционных методов структурного освещения для 3D измерений. Метод структурного освещения стал широко использоваться для автоматических измерений 3D объектов. Данный метод основан на освещении объекта пучком света известной конфигурации (линия, решетка и т.д.), записи изображения ПЗС камерой и обработки информации. Форма и геометрические параметры поверхности объекта внутри измерительного объема $D_x \times D_y \times D_z$ восстанавливаются при помощи набора поперечных сечений объекта. Поскольку применение традиционного метода структурного освещения сталкивается с проблемами, касающимися формирования требуемой световой структуры, восприятия и обработки оптического изображения, нами на его основе разработан модифицированный метод 3D контроля

Этот метод должен обеспечивать требуемую глубину фокусировки для структурного светового поля. Это означает, что световое поле должно сохранять свои параметры по распространению света вдоль оси Z в измеряемом объеме. Кроме того, интенсивность света, рассеянного различными частями объекта, не должна отличаться более чем на порядок, чтобы камера могла одновременно записывать все части информативного объекта с примерно одинаковым качеством. В этом случае не должно возникать проблем по идентификации пар «точка объекта – точка изображения» при обработке изображения. При использовании структурного освещения в виде одномерной (1D) решетки, анализируемое «окаймленное» изображение объекта с гладкой поверхностью приводит к неопределенности идентификации полей, т.е. соответствия между каждой полосой изображения и соответствующей полосой структурного светового поля. Таким образом, пространственное положение объекта или его форма не могут быть определены нами однозначно. Устранить этот недостаток можно путем последовательного освещения объекта световыми решетками с различными периодами и последующей обработкой всех полученных изображений объекта. Однако, это связано с большими временными затратами для восстановления 3D объекта. Эта проблема решается с помощью модифицированного метода 3D контроля с использованием алгоритма многоточечного структурного освещения, который свободен от указанных выше недостатков. Сущность работы этого алгоритма представлена на рисунке 4.18.

Многоточечное структурное освещение объекта задается в виде матрицы, состоящей из 2D набора лазерных пучков (рисунок 4.18a), которые могут быть сформированы с помощью киноформных элементов, например, с помощью двух скрещенных решеток Дамманна. Интенсивность распространения света $J(\xi, \eta)$ в точечном структурированном свете представляет положение гауссовых пучков одинаковой интенсивности:

$$J(\xi, \eta) \sim A \sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{\substack{j=-M/2, \\ j \neq 0}}^{M/2} \exp \left\{ -\frac{(\xi - i \cdot \Delta_{\xi})^2 + (\eta - j \cdot \Delta_{\eta})^2}{\sigma^2} \right\}, \quad (4.17)$$

где:

ξ, η – координаты поперечных сечений лазерных пучков; N, M – количества гауссовых пучков вдоль ξ и η соответственно; $\Delta\xi, \Delta\eta$ – расстояния между центрами пучка; σ – полуширина гауссовых пучков, $\sigma \ll \Delta\xi, \sigma \ll \Delta\eta$.

В этом случае во всем диапазоне $D_x \approx N\Delta\xi, D_y \approx M\Delta\eta$ имеет место «однородное» освещение в опорных точках и таким образом, не наблюдается заметных отличий интенсивности падающих пучков в центре и на периферии. Благодаря малой расходимости лазерных пучков обеспечивается требуемый измерительный объем по глубине $D_z \approx D_y \approx D_x$.

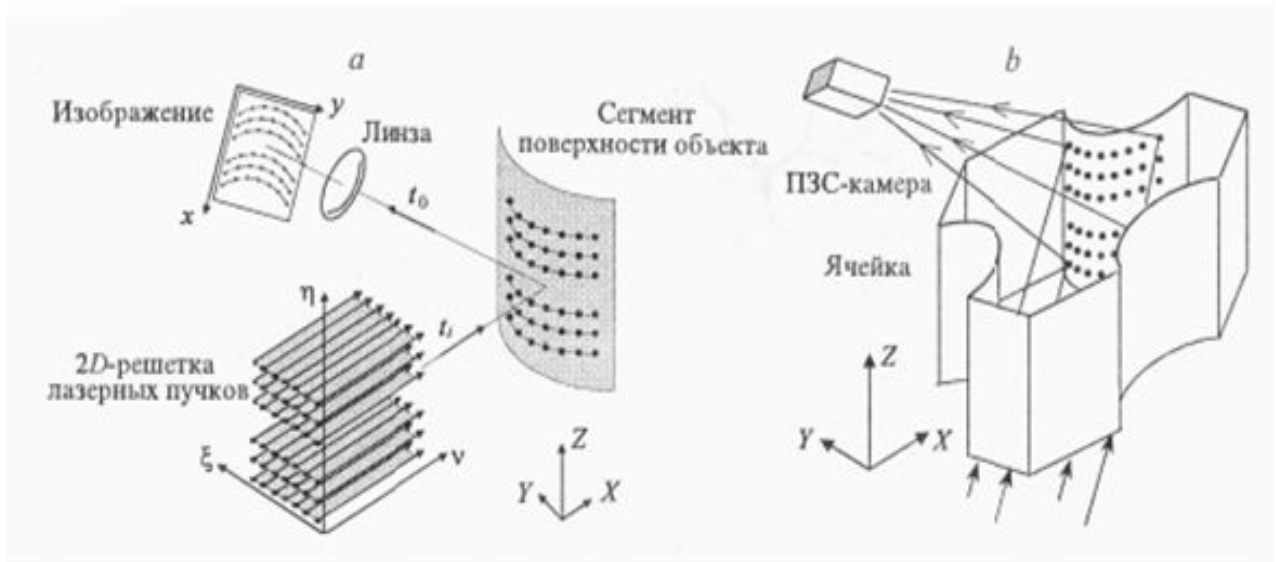


Рисунок 4.18 - Иллюстрация метода 3D контроля с использованием алгоритма многоточечного структурного освещения применительно:

а - к одному сегменту поверхности объекта, б – к ячейке дистанционирующей решётки

Для того, чтобы преодолеть неопределенность при определении положения и формы объекта, вводится сингулярность в структуру матрицы лазерного пучка в виде сбоя периода: $j \neq 0$ (см. выражение для $J(\xi, \eta)$). Параллельные лазерные пучки создают пятна света, как на объекте, так и изображении, зарегистрированном ПЗС камерой. Сингулярный (пустой) слой позволяет идентифицировать световые пятна относительно световых пучков. Для двух падающих и наблюдаемых пучков (t_1 и t_0),

уравнения которых известны, один может всегда определять параметры 3D сегмента, соответствующего минимальному расстоянию между пучками.

Центр сегмента соответствует освещенной точке на поверхности объекта, тогда как длина сегмента определяется параметрами многоточечной системы. При 3D контроле ячеек дистанционирующей решетки, состоящей из трех выступов (рисунок 4.18б), которые аппроксимированы цилиндрическими сегментами, требуется наличие трех матриц лазерных пучков (для простоты показана одна матрица света). Алгоритм многоточечного структурного освещения положен в основу разработки автоматизированного комплекса 3D контроля дистанционирующих решеток ТВС реактора ВВЭР-1000.

С помощью АКК контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000 был реализован сплошной высокопроизводительный контроль решёток в технологическом процессе их изготовления.

4.5 Алгоритм функционирования комплексного контроля дефектов внешнего вида наружной поверхности твэлов реактора ВВЭР-1000

В разделе 2.4.1 настоящей работы отмечалось, что одним из самых опасных событий при эксплуатации ТВС в реакторе является разгерметизация твэлов, которая может произойти вследствие некачественных сварных соединений, либо из-за нарушения целостности оболочки. Поэтому особенно важным является фактическое состояние наружной поверхности циркониевой оболочки твэла, ввиду того, что в течение эксплуатации может происходить её утонение за счёт коррозии и износа, связанного с контактом теплоносителя с поверхностью твэла.

С этой целью был предусмотрен штатный визуальный контроль состояния наружной поверхности твэлов операторами технического контроля. Визуальный контроль проводится вручную с помощью специальных осветителей и оптических принадлежностей, данная операция весьма трудоёмка и субъективна. Кроме того,

она вредна для здоровья персонала ОТК, т.к. напряжение зрения в течение смены может приводить к преждевременному ухудшению состояния органов зрения. Данный контроль носит выборочный характер и не позволяет осуществить сплошной контроль твэлов. В этой связи, задача автоматизированного контроля дефектов наружной поверхности оболочки твэла оказалась очень актуальной для достижения высокого качества производства твэлов и их эксплуатационной надёжности.

Согласно техническим условиям на твэл определены технические требования для автоматизированного контроля дефектов наружной поверхности твэла:

- вероятность выявления дефектов глубиной 0,05 мм не менее 0,95 для риски поперечной и продольной протяжённостью 3 мм с углом раскрытия 60° и сферической вмятины радиусом 10 мм.
- производительность (скорость перемещения твэла) контроля не менее 180 мм/с.

Вопросам автоматизированного контроля внешнего вида наружной поверхности твэлов ВВЭР-1000 уделено достаточно большое внимание, известны работы [19, 46, 47, 74], где анализируется общее состояние и перспективы решения данной задачи. В указанных работах отмечено, что вихретоковый метод контроля дефектов имеет высокую скорость и чувствительность контроля дефектов, но дать информацию о реальной глубине и форме дефекта не может. Оптикоэлектронный метод контроля дефектов наружной поверхности твэла не способен развить высокую производительность контроля, но может с высокой точностью измерить глубину и форму дефекта в определенной зоне объекта.

Дефекты в виде сдиров, царапин выявляются как различные комбинации риск поперечных и продольных, что позволяет изготовить и аттестовать стандартные образцы этих риск нужной глубины. Высокую производительность и достоверность контроля можно осуществить только с помощью комплексного применения неразрушающих методик различного направления.

Для осуществления высокой производительности контроля предложена вихретоковая методика обнаружения механических дефектов поверхности твэла, а для высокой точности измерения глубины дефектов предложен оптикоэлектронный

интерференционный метод. В связи с этим был предложен алгоритм комплексного контроля дефектов наружной поверхности твэла с использованием вихретокового и оптикоэлектронного метода контроля. На рисунке 4.19 изображена схема комплексного контроля дефектов наружной поверхности твэла ВВЭР-1000.



Рисунок 4.19 - Схема комплексного контроля твэлов ВВЭР-1000
дефектов наружной поверхности

Алгоритм комплексного контроля внешнего вида поверхности твэлов функционирует следующим образом:

- все твэлы проходят вихретоковый контроль, чувствительность которого настроена на определение дефектов глубиной более 0,05 мм с допуском на погрешность контроля;
- твэлы (г) годные, которые прошли вихретоковый контроль и у них не обнаружено дефектов, проходят далее по технологическому процессу к следующей операции;
- твэлы (пб), у которых обнаружены предполагаемые дефекты, направляются на оптикоэлектронную позицию для измерения глубины дефектов по координатам, которые отмечены вихретоковой позицией;

- твэлы (г), прошедшие контроль глубины дефектов оптикоэлектронным методом, возвращаются в технологический процесс, если глубина дефектов не превысила 0,05 мм.

- твэлы (об), которые имеют превышение предельно допустимого значения глубины дефекта, поступают в изолятор брака и считаются окончательно забракованными.

Для реализации данного алгоритма контроля дефектов наружной поверхности твэла ВВЭР-1000 были созданы и внедрены следующие АКК: автоматизированный комплекс вихретокового контроля дефектов внешнего вида типа «ВИТОК» и автоматизированный комплекс оптикоэлектронного контроля глубины дефектов типа «ПРОФИЛЬ» Данный алгоритм защищён патентом РФ [21].

В заключение стоит отметить, что настройка порога разбраковки вихретоковой позиции установлена таким образом, что с учётом погрешности измерения порог составляет 0,045 мм при браковочном признаке 0,05 мм. В связи с этим происходит небольшая перебраковка твэлов, которая не превышает уровень 8% по экспериментальным данным производственных испытаний. При контроле на оптикоэлектронной позиции производится точное определение глубины предполагаемого дефекта с точностью $\pm 0,003$ мм. Таким образом, достигается высокая надёжность результатов контроля при его высокой производительности за счёт комплексного контроля дефектов внешнего вида наружной поверхности твэла. Улучшаются условия труда контролеров ОТК и исключается субъективный фактор, который характерен для визуального контроля дефектов внешнего вида твэлов реактора ВВЭР.

4.6 Выводы по главе 4

В результате исследования технических требований по контролю критических параметров твэлов различного назначения, особенностей технологического процесса их производства и возможностей ряда методик контроля разработаны алгоритмы функционирования АКК критических параметров твэлов.

1. Все рассмотренные в данной главе алгоритмы функционирования АКК критических параметров твэлов для различных реакторов разработаны с применением системного подхода к построению АКК для достижения основной цели работы – осуществление высокопроизводительного сплошного контроля критических параметров твэлов в технологическом процессе их производства.

2. Применение многоканальной структуры за счет разработки специализированных первичных преобразователей и обратной связи между измерительным трактом и подсистемой сбора, обработки информации и управления контролем позволяет реализовать алгоритм активного контроля толщины оболочек твэлов промышленного реактора. АКК толщины слоёв твэлов промышленного реактора защищена патентами РФ № 2069838 и № 2079172.

3. Применение многофункционального подхода в рамках одного метода контроля и разработка специализированных первичных преобразователей (теневых измерительных датчиков) позволяет осуществить комплексный контроль геометрических параметров твэлов типа ВВЭР, геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС ВВЭР-1000. Использование в этих измерительных комплексах универсальных технических средств позволяет добиться высокой степени их адаптивности к различным конструкциям выпускаемых твэлов. Получен патент РФ № 2334944.

4. Применение многофункционального подхода с использованием разных методик контроля позволяет реализовать комплексный автоматизированный контроль дефектов наружной поверхности твэлов реактора ВВЭР-1000. Получен патент РФ № 2235999.

5. Алгоритм контроля сплошности топливного столба твэлов типа ВВЭР защищен патентом РФ № 2172529.

ГЛАВА 5

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ ТВЭЛОВ И ТВС

В предыдущих главах были рассмотрены принципы построения и разработки (АКК) критических параметров твэлов и алгоритмы функционирования АКК. Отмечено, что АКК является базовым элементом системы управления контролем параметров твэлов и ТВС. В ходе дальнейшей работы по созданию АКК параметров твэлов возникают задачи по разработке и изготовлению конструкции автоматизированного комплекса, прежде всего конструкции специализированных первичных преобразователей измерения, что позволит реализовать технические требования, предъявляемые к контролю критических параметров твэлов. Прежде всего, это точность измерения величины критического параметра, которая гарантирует надёжность результатов контроля. Большое значение имеет производительность контроля и возможность встраивания комплекса в технологическую линию производства твэлов.

В работах [1, 2, 5] в период начала массового производства твэлов ВВЭР-1000 обсуждались вопросы развития производства АКК параметров твэлов за счёт унификации и стандартизации основных узлов комплекса. В итоге был предложен модульный агрегатный метод изготовления конструкции АКК. В условиях быстрого развития электроники и вычислительной техники такой подход к разработке и изготовлению АКК оказался неудачным.

Главная цель данного предложения состояла в обеспечении низкой себестоимости АКК критических параметров твэлов. Опыт работ западных фирм, производящих ядерное топливо, показывает, что, несмотря на относительно высокую стоимость специализированных АКК параметров твэлов, они являются основным средством технологического и выходного контроля.

В работах [33, 43, 105] представлен анализ состояния и развития АКК параметров твэлов у западных производителей ядерного топлива (Aрева, Westinghous, Enusa). Как правило, АКК параметров твэлов на этих заводах встроены в технологические линии производства твэлов для выполнения сплошного контроля критических параметров твэлов. Осуществление сплошного контроля критических параметров ядерного топлива является подтверждением высокого качества данной продукции, что повышает конкурентоспособность ядерного топлива в условиях растущих требований к безопасности эксплуатации ядерных реакторов.

Наши производители ядерного топлива ПАО «НЗХК» и ПАО «МСЗ» постоянно работают над совершенствованием АКК параметров твэлов и вкладывают большие средства в инновационные разработки, направленные на их развитие. В работах [19, 29] обсуждены проблемы по созданию АКК параметров твэлов и перспективы их развития. В настоящей главе рассматриваются оригинальные разработки АКК параметров твэлов, внедрённые в эксплуатацию в составе технологических линий на ПАО «НЗХК». Особое внимание уделено конструктивным особенностям АКК параметров твэлов, их техническим характеристикам и метрологическому обеспечению их работы.

5.1 Автоматизированный комплекс контроля толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэлов типа МПК-3

В разделе 4.1 настоящей работы рассмотрены основные технические требования по контролю толщины наружной и внутренней оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэлов промышленного реактора (рисунок 1.7). Далее там же рассмотрен алгоритм функционирования АКК для реализации данного контроля. В настоящем разделе более подробно рассмотрим элементы и устройства конструкции АКК типа МПК-3, на рисунке 5.1 представлена его структурная схема.



Рисунок 5.1 – Структурная схема АКК типа МПК-3

Основные агрегатные узлы (элементы) автоматизированного комплекса МПК-3:

- механизм сканирования твэла;
- многоканальный измерительный тракт;
- система обработки информации и управления;
- интерфейсный блок электропривода;
- блок управления электроприводом;
- электропривод с датчиком положения твэла.

Функциональные связи основных узлов комплекса поясняются на рисунке 5.1, на котором изображена укрупненная структурная схема автоматизированного комплекса контроля толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэла. Одним из основных элементов автоматизированного комплекса является многоканальный измерительный тракт

(МИТ), состоящий из нескольких каналов прямого измерения потоков ионизирующих излучений.

Различие между измерительными каналами состоит в том, что каналы измерения, предназначенные для контроля толщин оболочек, имеют источники и детекторы электронов, а каналы, предназначенные для контроля неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэла, соответственно имеют источники и детекторы гамма-излучения. Каждый из каналов измерительного тракта регистрирует скорость счета соответствующего вида ионизирующего излучения, которое попадает на первичный преобразователь измерительного канала. Далее в каждом измерительном канале происходит преобразование плотности потока ионизирующего излучения в пропорциональную ей частоту импульсной последовательности электрического сигнала.

Таким образом, каждый канал измерительного тракта комплекса завершается цифровым счетчиком, который осуществляет регистрацию количества импульсов, поступающих ему на вход за фиксированное время. Информация со счетчиков поступает на вход системы сбора, обработки информации и управления (СОИУ). Центральной частью СОИУ является микро-ЭВМ. СОИУ по определенным алгоритмам проводит сбор и обработку данных, поступающих с измерительных каналов, и в соответствии с получаемыми результатами вырабатывает команды управления режимом контроля твэла, которые посредством интерфейсного блока электропривода (ИБЭ) передаются блоку управления электропривода (БУЭ). Кроме этого, СОИУ в течение всего цикла контроля твэла постоянно ведет анализ данных с датчика положения (ДП) о местоположении твэла в зоне контроля комплекса.

Электропривод комплекса состоит из электродвигателей, первый из которых обеспечивает поступательное перемещение контролируемого твэла с заданными скоростями, а другой – обеспечивает поворот твэла на 180°. БУЭ комплекса обеспечивает выполнение заданных режимов контроля по командам СОИУ. Механизм сканирования твэла (МСТ) представляет собой сложный механический узел, обеспечивающий перемещение контролируемого изделия относительно

первичных преобразователей измерительного тракта комплекса. Сложность конструкции МСТ состоит в том, что в нем необходимо расположить большое количество специализированных первичных преобразователей с соответствующими источниками ионизирующего излучения таким образом, чтобы обеспечить автоматический контроль всех типоразмеров контролируемых твэлов без дополнительной перенастройки узлов.

Перейдем к рассмотрению структуры многоканального измерительного тракта комплекса. Наиболее приемлемым в нашем случае способом построения МИТ является способ магистральной передачи данных, который получил развитие в системах ядерно-физической аппаратуры типа "САМАС", "ВЕКТОР". Структурная схема МИТ автоматизированного комплекса контроля толщины слоев твэлов изображена на рисунке 5.2.

Электрические сигналы в виде импульсов тока поступают с первичных преобразователей (ПП) на вход зарядочувствительных предусилителей (ЗУ) типа БУС2-94, либо БУС2-96 в зависимости от типа ПП. С предусилителей (ПУ) сигналы в виде импульсов напряжения поступают на вход основных усилителей (ОУ) типа БУС2-95, либо БУС2-97. Усиленные импульсы напряжения поступают на вход блоков дискриминации (Д) типа БСА2-95, которые производят амплитудную селекцию сигналов, нормируя их по амплитуде и длительности.

Нормализованные импульсы с дискриминаторов поступают на вход цифровых счетчиков (С) типа БСЧЦ2-90, либо БСЧЦ2-96, которые производят регистрацию количества импульсов за определенное время и выдают данные в виде двоичного кода на магистраль канала "ВЕКТОР". Для управления работой счетчиков может применяться программируемый таймер БТЭ-13. Каждый счетчик может работать на два измерительных канала, так как представляет собой блок из двух шестнадцатиразрядных счетчиков. Магистраль канала каркаса ВБЦ2-90 состоит из шестнадцатиразрядной шины данных и четырехразрядных шин адреса и команд. Питание всех блоков низковольтным напряжением осуществляется блоками БН-

151, а высоковольтное напряжение подается от блоков типа БНВ2-95 с помощью распределителя питания БРП на каждый детектор.

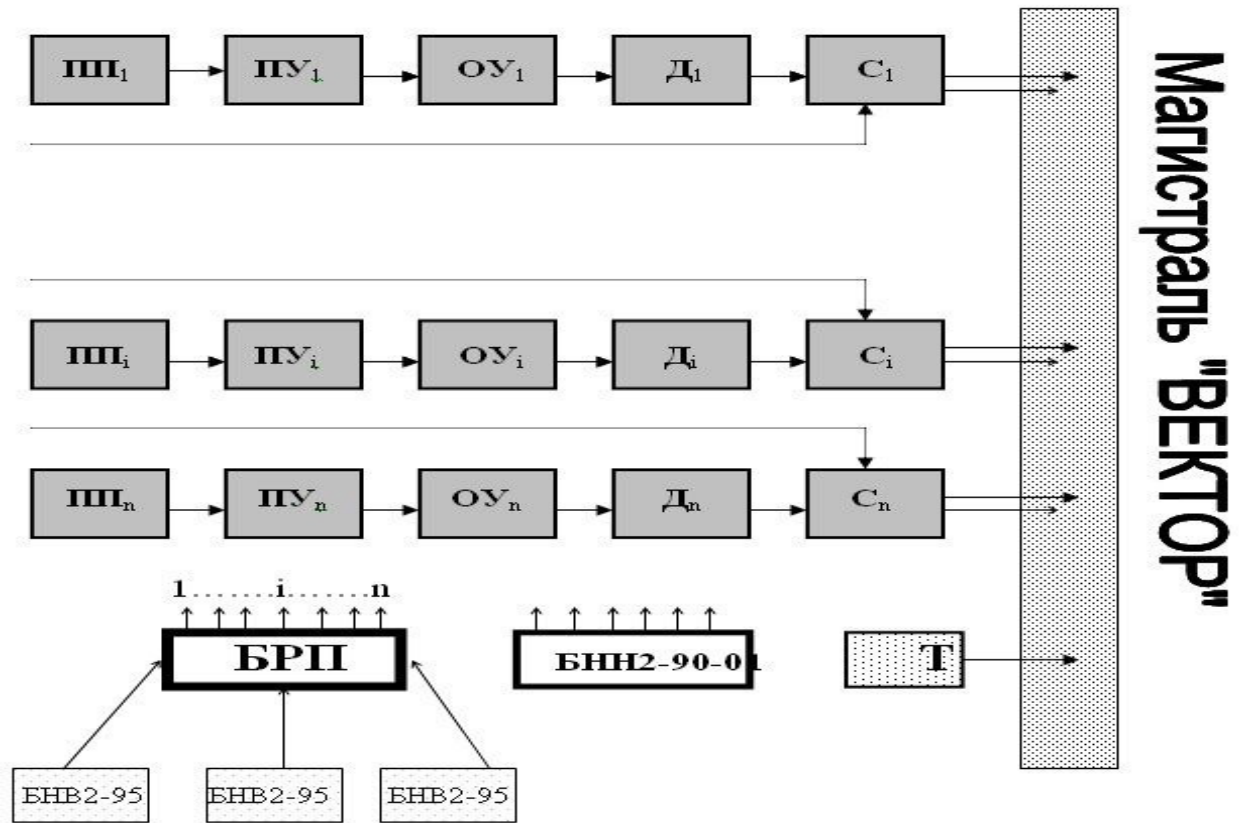


Рисунок 5.2 – Структурная схема МИТ автоматизированного комплекса МПК-3

Далее рассмотрим структуру СОИУ автоматизированного комплекса, которая изображена на рисунке 5.3. Центральным узлом СОИУ является микро-ЭВМ, которая предназначена выполнять следующие функции:

- арифметическая и логическая обработка поступающей информации;
- ввод-вывод информации с устройства ввода-вывода, с пульта оператора.
- выдача управляющих воздействий на интерфейсный блок электропривода.

Блок контроллера (К) каркаса "ВЕКТОР" предназначен для управления блоками, размещаемыми в каркасе, и передачи информации между микро-ЭВМ и каналом каркаса. Устройство ввода-вывода обеспечивают ввод информации с ручного пульта ввода, сигнализацию режимов работы СОИУ. Пульт оператора служит для ввода исходных данных, для расчета и оформления выходного

документа, а также для вывода выходного документа. В качестве пульта оператора может использоваться дисплей или печатающее устройство.

Интерфейсный блок электропривода ИБЭ предназначен для связи микро-ЭВМ с блоком управления электроприводом БУЭ. ИБЭ осуществляет прием, хранение и преобразование информации из канала каркаса "ВЕКТОР" в команды управления электроприводом, а также транслирует в канал каркаса сигналы о готовности и требования на обслуживание электропривода БУЭ.

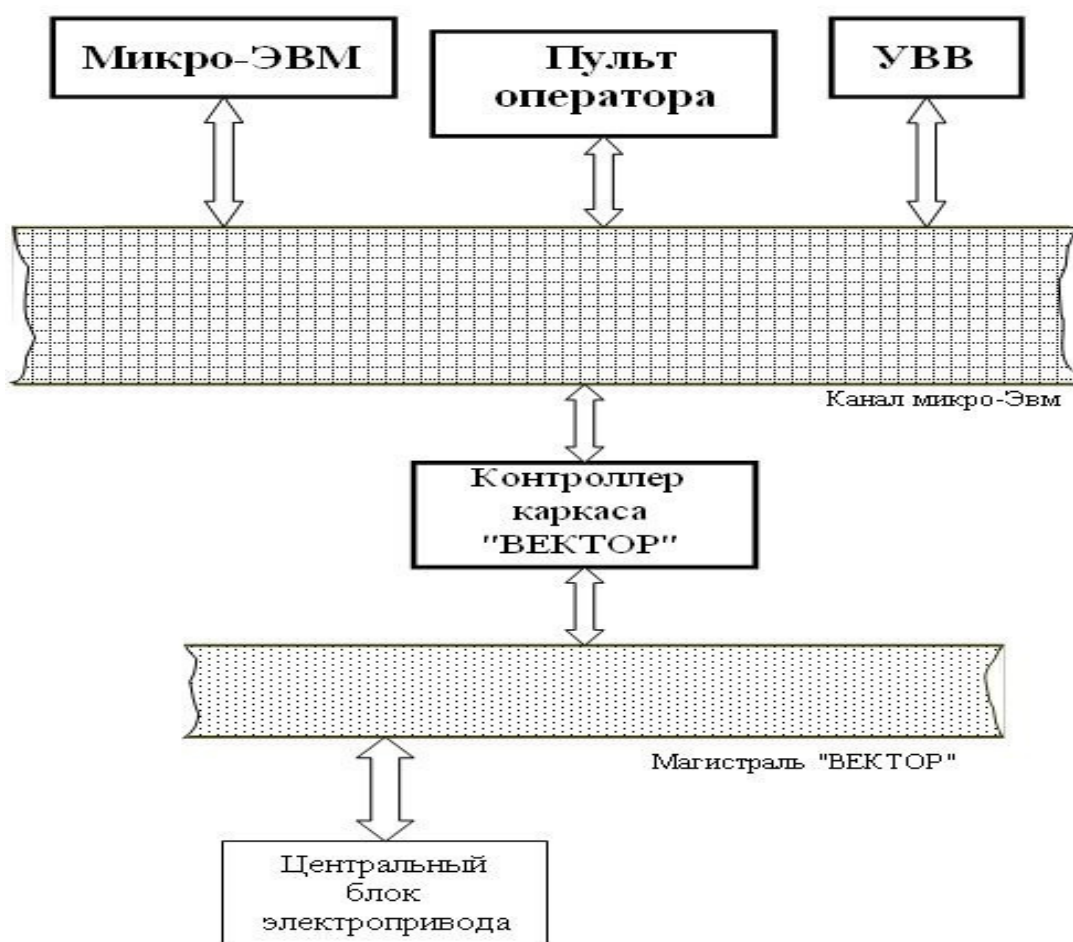


Рисунок 5.3 – Структурная схема системы сбора, обработки информации и управления автоматизированного комплекса МПК-3

В качестве микро-ЭВМ можно использовать стандартную ПЭВМ с соответствующими интерфейсными платами. После рассмотрения отдельных структурных схем подробнее рассмотрим общую структурную схему комплекса.

Характерной особенностью данной структуры является то, что она может быть реализована с максимальным использованием стандартной аппаратуры.

За счет этого может быть достигнута высокая степень унификации и взаимозаменяемости основных элементов комплекса, обеспечивается высокая эксплуатационная надежность функционирования и упрощается проведение метрологической аттестации, что чрезвычайно важно для многоканальной структуры комплекса. Несмотря на это, часть основных узлов все же необходимо разработать специально для данной конструкции автоматизированного комплекса. Прежде всего, это касается механизма сканирования твэла и конструкции специализированных первичных преобразователей измерительного тракта.

Механизм сканирования твэла (МСТ) АКК МПК-3 является одним из его основных узлов, в функции которого входит выполнение следующих операций:

1. Продольное сканирование твэла в прямом и обратном направлении с регулируемой скоростью в диапазоне от 6 м/ч до 60 м/ч.
2. Поворот изделия на 180° .
3. Обеспечение необходимой геометрии измерения толщины слоев твэла посредством оптимальной фиксации детекторов и источников ионизирующего излучения.

Конструкция механизма сканирования твэла системы многоканального контроля толщины слоев твэлов изображена на рисунке 5.4. Выполнение первой функции достигается за счет использования продольных направляющих 2 (длиной до 3 м), установленных на корпусе 1. По направляющим 2 с помощью электропривода 6 перемещается тележка 3, на которой устанавливается контролируемый твэл 4. В своем основании тележка имеет зубчатую рейку 5, которая, вступая в зацепление с зубчатым колесом редуктора электропривода 6, осуществляет продольное перемещение тележки по направляющим.

Для обеспечения поворота контролируемого изделия на 180° на штанге 9 располагается универсальный кулачок 8 в виде ступенчатой призмы и привод 7. Кулачок 8 подпружинен пружиной 22, находящейся между кулачком и зубчатым

колесом привода 7. На штанге 9, которая установлена точно по оси контролируемого твэла, расположены гибкие основания 12 для крепления специальных первичных преобразователей 13 толщины внутреннего слоя оболочки твэла. Основания 12 с одной стороны жестко закреплены на барабане 18, а с другой стороны имеют свободу продольного перемещения в направляющих скобах 19. Кроме того, на штанге 9 располагается свинцовый контейнер 10, в котором установлены три источника гамма-излучения под углом 60° между своими осями. На кронштейнах 11, 17, которые закреплены на станине-корпусе 1, установлены свинцовые контейнеры 15 для сцинтилляционных детекторов 16 и гибкие основания 12, на которых находятся специализированные первичные преобразователи 14 контроля толщины слоев наружного слоя оболочки твэла.

Юстировка и фиксация контейнеров с источниками гамма-излучения и сцинтилляционными детекторами, а также конструкций с гибкими основаниями осуществляется таким образом, чтобы зоны контроля толщины всех слоев соответствовали тем зонам, которые определены техническими условиями на твэлы. На корпусе МСТ размещается специальный экран 20, который служит для защиты персонала от воздействия ионизирующего излучения. В корпусе МСТ установлен блок управления электроприводом (БУЭ) 21. С его помощью осуществляется управление работой приводов МСТ в ручном и автоматическом режимах работы автоматизированного комплекса. На направляющих 2 в местах, где происходит смена режима работы электропривода, в соответствии с алгоритмом работы системы располагаются бесконтактные датчики БК-А.

Схема конструкции, изображенная на рисунке 5.4, представляет МСТ в одной плоскости, поэтому необходимо представить, что реальная конструкция МСТ снабжена тремя контейнерами 15 и тремя сцинтилляционными детекторами 16, а также тремя, попарно объединенными конструкциями гибких оснований 12, вертикальные плоскости которых находятся под углом 60° друг к другу. Поэтому, кронштейны 11, 17 имеют вид рамы, повторяющей профиль контролируемого твэла. Далее будет отмечена отдельно роль гибких оснований для расположения

рассмотрена ниже. Геометрия гамма-абсорбционного измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя должна быть близка к геометрии «узкого» пучка. Это условие необходимо ввиду того, что контролируемые грани твэлов разных типоразмеров находятся на разном расстоянии от источника гамма-излучения, что может влиять на величину фактора накопления рассеянного излучения, если измерение неравномерности поверхностной плотности топливного слоя будет осуществляться в «широком» пучке.

Для реализации геометрии «узкого» пучка применяется двойная коллимация гамма-излучения. Вначале происходит коллимирование гамма-излучения при выходе из контейнера 10 ($\varnothing = 6$ мм, $l = 20$ мм), а затем происходит коллимирование гамма-излучения при входе его в сцинтилляционный детектор ($\varnothing = 6$ мм, $l = 25$ мм). Двойная коллимация гамма-излучения помогает достичь геометрии измерения близкой к геометрии «узкого» пучка. В результате этого фактор накопления рассеянного излучения в данном случае имеет величину равную 1,14. Расстояние между сцинтилляционным детектором и источником гамма-излучения составляет 190 мм.

Функционирование механизма сканирования твэла происходит следующим образом. Контролируемый твэл 4, установленный на тележке 3, с помощью приводного зубчатого колеса и рейки 5 перемещается в зону контроля на повышенной скорости $V_0 = 5 V_p$. По достижении зоны контроля толщины оболочек скорость сканирования становится равной номинальной рабочей скорости V_p на которой в дальнейшем осуществляется весь контроль. Грани контролируемого изделия проникают между упругими плоскими пружинами-основаниями 12, раздвигая их на толщину стенки, и перемещаются до упора изделия в кулачок 8. После этого останавливается электропривод продольного перемещения 6 и срабатывает привод 7, который производит поворот изделия на 180° . По окончании поворота вновь включается электропривод 6 и начинается перемещение тележки с изделием в обратном направлении. При выходе изделия из зоны контроля вновь происходит переход скорости сканирования с V_p на V_0 .

В течение цикла контроля каждого твэла может несколько раз происходить смена направления и скорости сканирования в случае, если результаты измерения толщины оболочек не будут соответствовать требованиям браковочных пределов в соответствующих зонах твэла. В данном случае изменение режима сканирования изделия происходит не по сигналам датчиков положения типа БК-А, а по сигналам микро-ЭВМ после предварительной обработки результатов измерений и привязки их к конкретной зоне твэла.

При переходе контроля на данный режим происходит остановка тележки с изделием и ее реверс на определенное расстояние, после чего производится повторный контроль предполагаемой дефектной области на малой скорости сканирования V_n , которая равна половине номинальной рабочей скорости V_p . Более подробно режим повторного контроля рассмотрен в разделе 4.1. Следует отметить, что этот режим контроля накладывает достаточно высокие требования к точности отката тележки (± 1 мм), следовательно, высокие требования к обеспечению низкого уровня люфта в редукторе и к стабилизации скорости сканирования блоком управления электропривода (БУЭ).

Структурная схема БУЭ изображена на рисунке 5.5. Преобразование вращательного момента от вала двигателя СЛЗ69 и получение необходимой скорости продольного сканирования осуществляется за счет взаимодействия редуктора (который представляет собой одноступенчатую червячную пару) и зубчатой рейки, закрепленной на тележке. Применение одноступенчатого редуктора позволило добиться минимального уровня люфта, так как число зубчатых колес сведено к минимуму.

Датчики положения изделия и узла поворота типа БК-А определяют места, по достижении которых происходит изменение скорости сканирования, прекращение движения, начало поворота изделия, изменение направления сканирования. Для этого необходимо пять таких датчиков. Все они расположены на корпусе направляющих МСТ и выдают сигналы в интерфейсный блок электропривода (ИБЭ), который обрабатывает их и передает по магистрали данных в микро-ЭВМ.

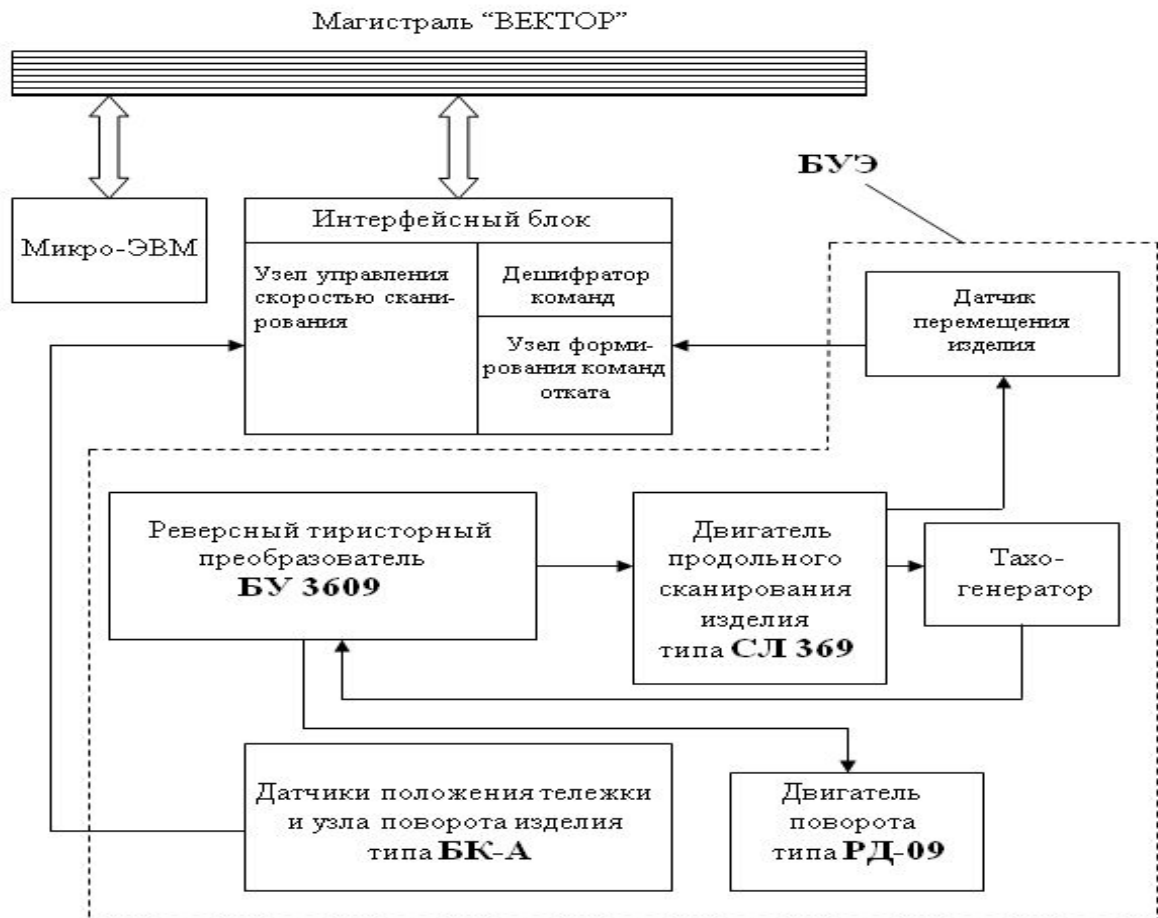


Рисунок 5.5 – Структурная схема блока управления электроприводом АКК типа МПК-3

Датчик перемещения изделия служит для точной геометрической привязки положения твэла относительно разных зон контроля, а также он необходим для обеспечения точного отката на заданное расстояние. Датчик представляет собой оптикомеханический электронный преобразователь значения перемещения в цифровой электрический код. Датчик состоит из синхродиска с определенным числом прямоугольных прорезей, который механически соединен с валом двигателя. При своем вращении прорези синхродиска перекрывают лучи светодиода, которые направлены на фотодиод. Число импульсов, поступающих с датчика перемещения в интерфейсный блок электропривода, пропорционально определенному расстоянию, пройденному твэлом в зоне контроля.

ИБЭ предназначен для связи БУЭ с микро-ЭВМ. Он осуществляет прием, хранение и преобразование информации из канала «ВЕКТОР» в команды управления электроприводом, а также транслирует в канал «ВЕКТОР» сигналы готовности и требования на обслуживание электропривода. ИБЭ состоит из нескольких функциональных модулей-узлов: узла управления скоростью сканирования, узла формирования команд отката, дешифратора команд.

Перейдём к рассмотрению конструкции специализированного первичного преобразователя (ПП) для измерения толщины внутренней и наружной оболочки твэла. За основу для разработки конструкции универсального ПП измерения толщин оболочек взята геометрия измерения, представленная на рисунке 4.3 в разделе 4.1. Данная геометрия измерения кольцевого расположения детектора позволяет добиться компактной конструкции при высокой эффективности использования активности источника излучения.

В результате теоретических и экспериментальных исследований для использования в конструкции выбран источник излучения электронов типа БИС-М активностью $7,4 \cdot 10^8$ Бк и кремниевый диффузионный детектор типа ДКД-П_{сд}-20. На рисунке 5.6 изображена конструкция универсального ПП измерения толщины оболочек промышленного твэла АКК типа МПК-3.

Основная особенность данной конструкции заключается в том, что нижняя поверхность корпуса первичного преобразователя предназначена для контакта с контролируемой поверхностью твэла и в процессе сканирования скользит по ней, тем самым происходит стабилизация расстояния от источника излучения до контролируемой поверхности твэла. Чтобы скользящая поверхность корпуса первичного преобразователя не царапала поверхность алюминиевой оболочки, корпус изготавливают из винипласта или капролона, а нижние края закругляют.

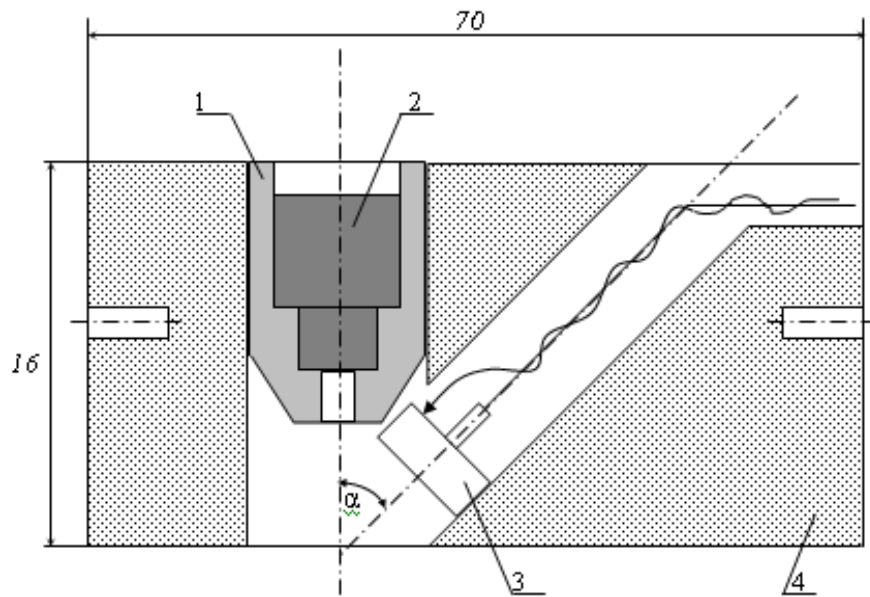


Рисунок 5.6 – Конструкция первичного преобразователя для измерения толщины оболочек твэла промышленного реактора

1- коллиматор; 2- источник электронов БИС-М; 3- полупроводниковый детектор ДКД-Псд; 4- корпус.

На основе этой конструкции разработано устройство узла контроля толщины оболочек, который изображён на рисунке 5.7. Первичный преобразователь 1 крепится с помощью двух винтов к скобе 2, за счет чего образуется шарнирное соединение корпуса преобразователя со скобой. Такая конструкция позволяет достичь того, что, в случае непараллельности плоскостей нижней поверхности корпуса и поверхности грани твэла в момент захода изделия под первичный преобразователь, последний начинает поворачиваться за счет возникающего вращательного момента до полного соприкосновения поверхностей корпуса и контролируемой грани твэла с помощью шарнирного соединения со скобой. Таким образом, исключается заклинивание изделия в момент его захода в узел контроля толщины слоев оболочек.

Скоба 2, в свою очередь, жестко крепится с помощью заклепок к упругим плоским пружинам 3. Плоские пружины располагаются по ходу движения твэла, фиксируя положения ПП относительно горизонтальной оси твэла.

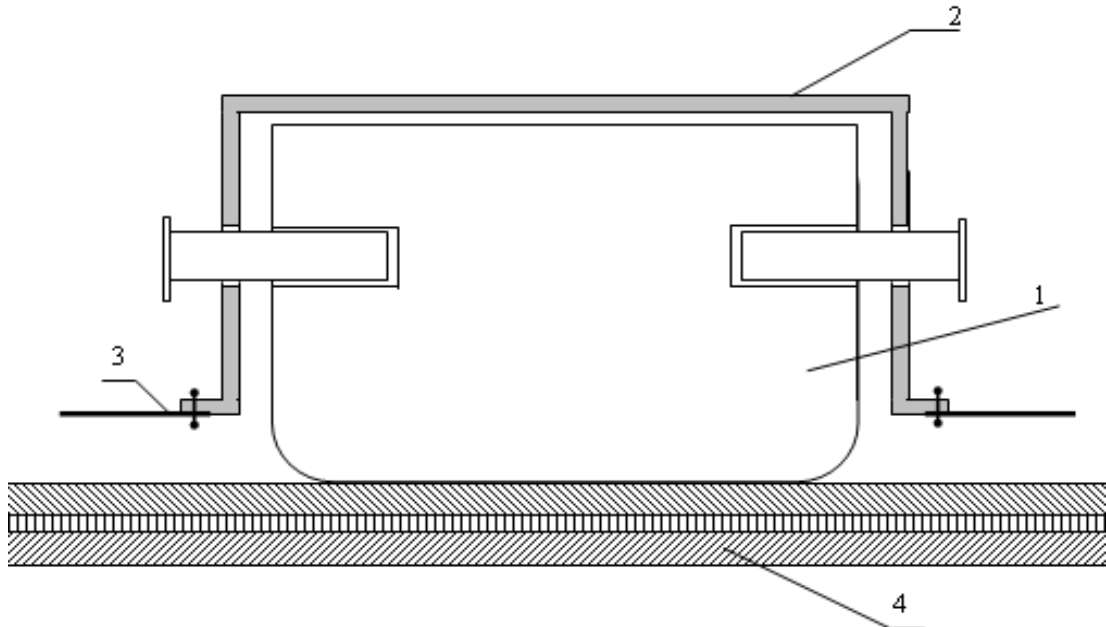


Рисунок 5.7 – Конструкция устройства узла контроля толщины оболочек твэла промышленного реактора

1- первичный преобразователь; 2- скоба; 3- упругие плоские пружины; 4- участок грани твэла

Но этим не исчерпывается роль плоских пружин в данной конструкции. Оригинальным является то, что за счет применения плоских упругих пружин решается вопрос не только фиксации ПП относительно грани твэла, но и одновременно выполняется автоматическая регулировка геометрии измерения толщины для твэлов разных типоразмеров. Этот процесс поясняется на рисунке 5.8.

Упругие плоские пружины обоих узлов выгнуты навстречу друг другу и соприкасаются поверхностями корпусов первичных преобразователей. Один конец каждой пружины жестко закреплен, а противоположный ему свободно перемещается в специальных направляющих. Поэтому, когда твэл заходит с

рабочей скоростью в узел контроля толщины оболочек, то он своей гранью разжимает плоские пружины до тех пор, пока корпуса преобразователей не вступят в контакт с соответствующими поверхностями грани твэла. Причем, при уменьшении диаметра контролируемого твэла пружины узла контроля толщины внутренней оболочки работают на сжатие, а пружины узла контроля толщины наружной оболочки работают на растяжение.

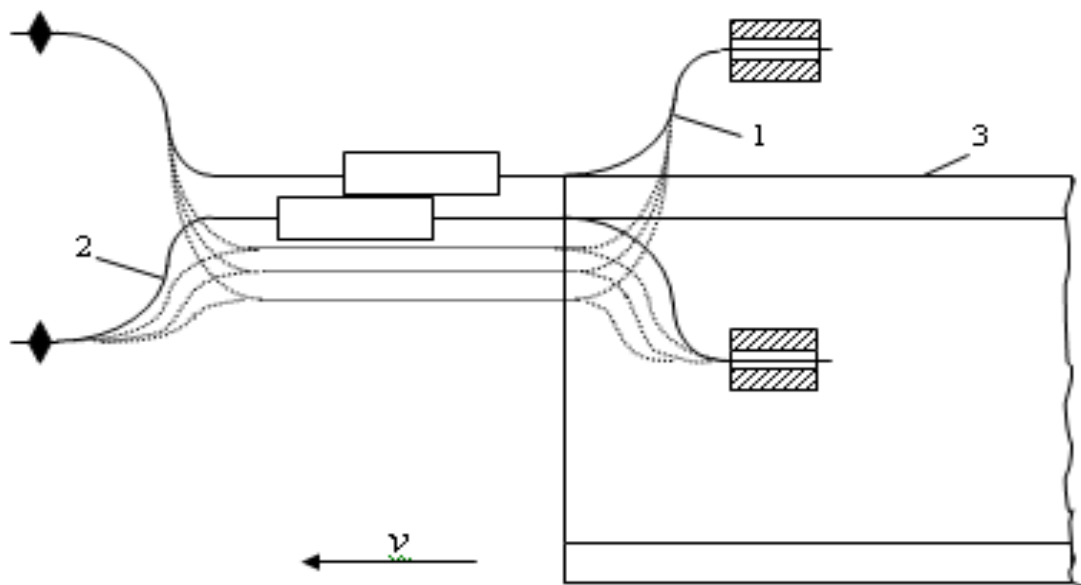


Рисунок 5.8 – Взаимное расположение узлов контроля толщины наружной и внутренней оболочек твэла промышленного реактора.

1 – узел контроля толщины наружной оболочки; 2 – узел контроля толщины внутренней оболочки; 3 – контролируемый твэл.

Таким образом, происходит автоматическая регулировка положения первичного преобразователя при контроле толщины слоев оболочек твэлов разных типоразмеров. Данное техническое решение защищено патентом РФ [25].

Далее рассмотрим более подробно задачи, которые выполняет СОИУ автоматизированного комплекса МПК-3:

- а) обеспечение управления механизмом сканирования твэла МСТ для осуществления необходимых перемещений твэла в процессе контроля;
- б) идентификация зон твэла, с которых поступает информация в каждый конкретный момент времени, разделение твэла на линейные зоны необходимо проводить по двум вариантам: зоны откладываются от начала прессования твэла (именуемого в дальнейшем «началом» твэла) конца прессования твэла (именуемого в дальнейшем «концом» твэла,
- в) вычисление для каждой из зон твэла следующих параметров с привязкой их к номеру грани: минимальная толщина наружной оболочки; минимальная толщина внутренней оболочки; максимальное и минимальное значения коэффициента неравномерности поверхностной плотности топливного слоя K_T , вычисляемого как

$$(K_T)_{\min} = \frac{H_{\min}}{H_{cp}}; (K_T)_{\max} = \frac{H_{\max}}{H_{cp}}; H_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^{n_i} f_{ik}}{\sum_{i=1}^6 n_i};$$

$$H_{\max} = F_{\text{баз}} - (F_{ik})_{\min}, i = 1, 2, \dots, 6;$$

$$H_{\min} = F_{\text{баз}} - (F_{ik})_{\max}, i = 1, 2, \dots, 6, \quad (5.1)$$

где f_{ik} – количество импульсов, зарегистрированных в k -м цикле измерения по i -й грани; $(F_{ik})_{\max}$ – максимальное количество импульсов, зарегистрированных в k -м цикле измерения по i -й грани; $(F_{ik})_{\min}$ – минимальное количество импульсов, зарегистрированных в k -м цикле измерения по i -й грани; n_i – количество циклов, зарегистрированных в k -ом цикле измерения по i -й грани; n_i – количество циклов измерения на i -й грани,

- г) вычисление параметров по предыдущему пункту производится по двум вариантам привязки линейных зон к твэлу,
- д) для повышения достоверности результатов измерения толщины оболочек проводится повторный контроль участков твэла с предполагаемым отклонением толщины оболочки за пределы браковочных уровней,

- е) повторный контроль проводится на пониженной скорости сразу после обнаружения предполагаемого отклонения,
- ж) обеспечение возможности ручного ввода исходных данных.

На рисунке 5.9 представлена форма выходного документа по результатам контроля твэлов на АКК МПК-3.

ДАТА 08 12 80 НОМЕР ИЗД. 9999 ДЛИНА 9999				
РАСЧЕТ КТ ВАРИАНТ 1				
ЗОНА	МН	ГРАНЬ	МАХ	ГРАНЬ
1	-----	—	0,0000	0
2	0,0000	0	0,0000	0
3	0,0000	0	0,0000	0

РАСЧЕТ КВО ВАРИАНТ 1				
ЗОНА	МАХ	ГРАНЬ	МН	ГРАНЬ
1	-----	—	0,0000	0
2	-----	—	0,0000	0
3	-----	—	0,0000	0

РАСЧЕТ КНО ВАРИАНТ 1				
ЗОНА	МАХ	ГРАНЬ	МН	ГРАНЬ
1	-----	—	0,0000	0
2	-----	—	0,0000	0
3	-----	—	0,0000	0

РАСЧЕТ КТ ВАРИАНТ 2				
ЗОНА	МН	ГРАНЬ	МАХ	ГРАНЬ
1	-----	—	0,0000	0
2	0,0000	0	0,0000	0
3	0,0000	0	0,0000	0

РАСЧЕТ КВО ВАРИАНТ 2				
ЗОНА	МАХ	ГРАНЬ	МН	ГРАНЬ
1	-----	—	0,0000	0
2	-----	—	0,0000	0
3	-----	—	0,0000	0

РАСЧЕТ КНО ВАРИАНТ 2				
ЗОНА	МАХ	ГРАНЬ	МН	ГРАНЬ
1	-----	—	0,0000	0
2	-----	—	0,0000	0
3	-----	—	0,0000	0

Рисунок 5.9 - Форма выходного документа

Перейдём к оценке погрешности измерения толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэлов промышленного реактора автоматизированным комплексом МПК-3. С этой целью были проведены испытания АКК МПК-3, разработаны и изготовлены стандартные образцы толщины оболочек и поверхностной плотности топливного слоя. С помощью полученных в ходе испытаний значений составляющих погрешностей

измерения толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛОВ можно оценить суммарную погрешность измерения этих параметров автоматизированным комплексом МПК-3 как средства измерения. Для этого используем положения руководящих документов [106, 107]:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c \pm k\sigma, \quad (5.2)$$

где Δ_c – общая систематическая погрешность измерения контролируемого параметра; σ – суммарное среднеквадратическое отклонение за счет действия случайных составляющих погрешности измерения контролируемого параметра, k – множитель (для $P = 0,95$, $k = 2$).

1. Погрешность измерения толщины оболочек ТВЭЛА.

Методическая погрешность измерения толщины оболочек носит характер неисключенной систематической погрешности $\delta_{mo} = 1,92 \%$. Остальные составляющие погрешности измерения толщины оболочек носят характер случайных погрешностей. К ним относятся погрешности: $\delta_{ст}$ – статистическая, δ_{app} – аппаратная, δ_p – расчета выходных данных СОИУ ($\delta_p = \pm 0,5 \%$). Общая случайная погрешность измерения толщины оболочек

$$\dot{\Delta} = \pm \sqrt{\delta_{ст}^2 + \delta_{app}^2 + \delta_p^2}. \quad (5.3)$$

Так как все составляющие случайной погрешности были определены при доверительной вероятности 0,95, то

$$\Delta_{\Sigma} = \delta_{mo} \pm \dot{\Delta} = (1,92 \pm 2,14) \%$$

Таким образом, суммарная погрешность измерения толщины оболочек ТВЭЛОВ изменяется в указанных пределах. Данные сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Погрешность измерения толщины оболочек

$\Delta_c, \%$	$\dot{\Delta}$ – случайная погрешность, %			$\Delta_{\Sigma}, \%$
	$\delta_{ст}$	δ_{app}	δ_p	
1,92	1	1,82	0,5	$1,92 \pm 2,14$

2. Погрешность измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛОВ.

Систематическая составляющая погрешности измерения неравномерности поверхностной плотности Δ_c представляет собой погрешность линеаризации номинальной статической характеристики преобразования измерительного канала. Установлено, что $\Delta_c = -0,5\%$. Случайная погрешность измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя $\dot{\Delta}$ состоит из следующих составляющих погрешности: δ_{mo} – методическая, $\delta_{ст}$ – статистическая, δ_{app} – аппаратная, δ_p – расчета K_T .

Так как, все составляющие случайной погрешности определены, можно получить суммарное значение случайной погрешности:

$$\dot{\Delta} = \pm \sqrt{\delta_{mo}^2 + \delta_{ст}^2 + \delta_{app}^2 + \delta_p^2}$$

Подставляя полученные ранее значения составляющих случайной погрешности, получим $\dot{\Delta} = \pm 1,54\%$. Тогда суммарная погрешность измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя :

$$\Delta_{\Sigma} = (-0,5 \pm 1,54)\%.$$

Данные по составляющим суммарной погрешности измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛОВ представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. – Погрешность измерения неравномерности поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛА

$\Delta_c, \%$	$\dot{\Delta}$ – случайная погрешность, %				$\Delta_{\Sigma}, \%$
	δ_{mo}	$\delta_{ст}$	δ_{app}	δ_p	
0,5	1,06	1	0,06	0,5	$-0,5 \pm 1,54$

Таким образом, погрешность измерения толщины внутренней и наружной оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя ТВЭЛОВ

автоматизированным комплексом МПК-3 удовлетворяет техническим требованиям на контроль этих критических параметров. По результатам метрологической аттестации АКК типа МПК-3 был допущен к эксплуатации в технологическом производстве твэлов промышленного реактора на ПАО «НЗХК» с 1986 года. После некоторой модернизации он находится в эксплуатации по настоящее время.

Конструкция АКК типа МПК защищена патентами РФ [25, 27]

5.2 Автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров твэлов реакторов типа ВВЭР

В разделе 4.3 настоящей работы рассмотрен алгоритм контроля геометрических размеров реакторов типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, реализованный в автоматизированном комплексе типа «РАЗМЕР-06». В этом разделе рассмотрим конструкцию АКК «РАЗМЕР-06», его режимы работы и технические характеристики. АКК «РАЗМЕР-06» является развитием автоматизированных комплексов контроля геометрических размеров твэлов «КОНТРОЛЬ» и «РАЗМЕР», которые успешно эксплуатировались в технологических линиях производства твэлов ВВЭР-1000 на ПАО «НЗХК». В АКК «РАЗМЕР-06» применены более современные аппаратные и программные технические средства, которые позволили достичь высоких технических характеристик по точности и производительности контроля геометрических размеров твэлов ВВЭР в составе технологических линий их производства. Структурная схема измерительной части АКК «РАЗМЕР-06» изображена на рисунке 4.14 в разделе 4.3. Конструкция АКК «РАЗМЕР-06» представлена на фотоснимке (рисунок 5.10).

Данная конструкция автоматизированного комплекса позволяет осуществить измерение геометрических параметров твэлов в процессе их движения по технологической линии. Внутри измерительной зоны твэл удерживается двумя парами роликов. Нижние ролики являются опорными, ролики сверху соединены с электромеханическими датчиками угла поворота, позволяющими осуществлять

координатную привязку при сканировании твэла по длине. Первичные преобразователи измерения геометрии твэла сгруппированы в трёх измерительных позициях. При этом их оси (оптические оси входящих в их состав проекционных систем) и ось твэла ориентированы взаимно ортогонально. Использование трёх пар ПП измерения диаметров позволяет измерить отклонение от прямолинейности оси твэла на базе 250 мм.

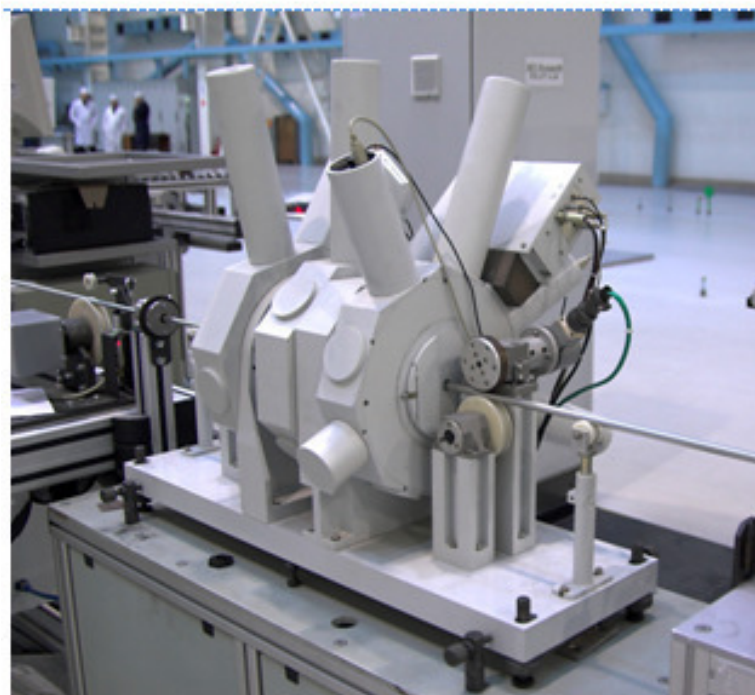


Рисунок 5.10 – Общий вид АКК геометрических параметров твэлов реактора ВВЭР-1000 типа «РАЗМЕР-06»

АКК «Размер-06» является базовым элементом локальной АСУКП твэлов, входящей в состав АСУТП линии СТ-60 по изготовлению твэлов ВВЭР-1000. Информационная совместимость АСУКП «Размер-06» и АСУТП линии СТ-60 достигается за счёт использования универсального протокола обмена данными OPC DA.

Информация, поступающая в АСУТП линии от АСУКП и обратно в АСУКП, имеет вид тэгов (специальные переменные, использующиеся в программных серверах передачи данных). Тэги сформированы в разные группы. В первую группу

входит информация, обеспечивающая совместную работу АСУТП линии и АСУКП (синхронизация, управление), например, выставление сигнала для АСУТП о готовности АСУКП к работе и разрешение приступить к работе со стороны АСУТП. Во вторую группу тэгов входят передаваемые из АСУТП параметры типа контролируемого твэла, например, допуски на изделие, координаты начала и конца зоны измерения. В третью группу включены результаты измерений геометрических параметров твэла. АСУКП «Размер-06» также может работать автономно, без связи с АСУТП линии. В этом случае, параметры типа контролируемого твэла и результаты измерений хранятся в компьютере АКК «Размер-06». В начале каждой смены автоматическому циклу процесса контроля предшествует процесс подготовки, наладки и настройки автоматизированного комплекса, выполняемого в ручном режиме. Подготовка заключается в проведении тестирования системы (рисунок 5.11).

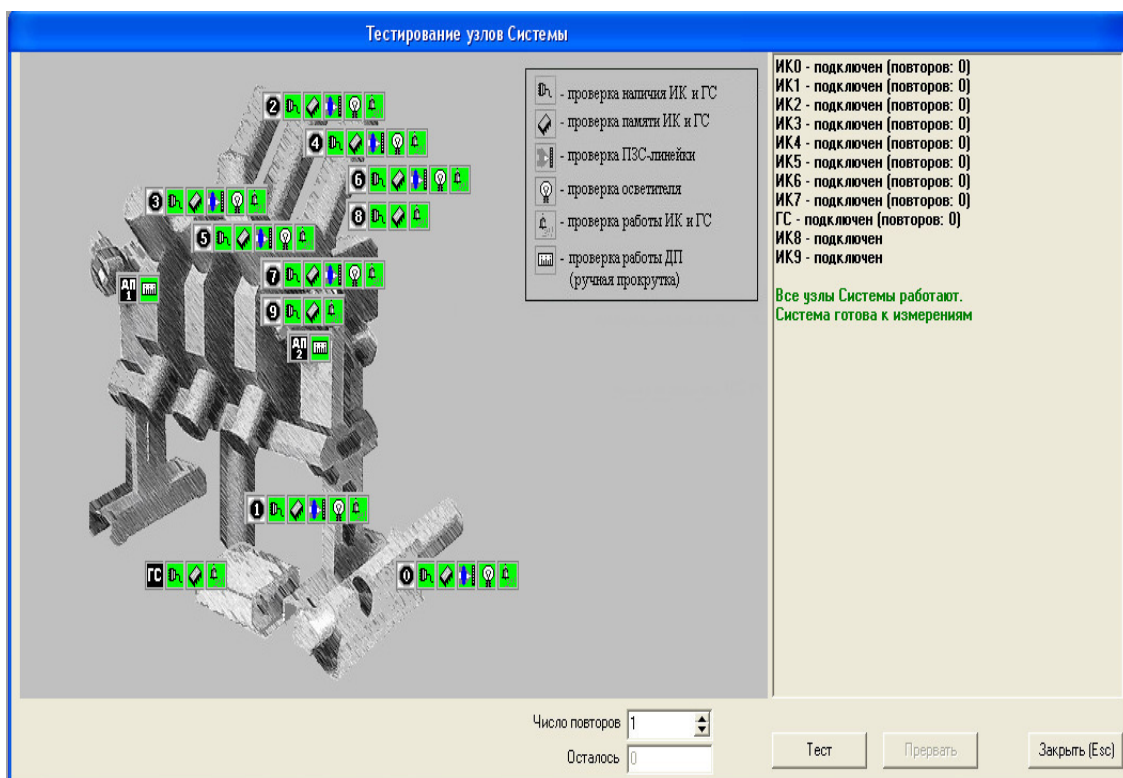


Рисунок 5.11 – Тестирование работоспособности узлов АКК «РАЗМЕР-06»

Затем проводится проверка ее метрологических характеристик комплекса по контрольным образцам (КО) (рисунок 5.12). В случае обнаружения неисправности при тестировании автоматизированного комплекса на экран монитора выдается сообщение о необходимости проведения наладки (ремонта) отмеченного узла. Если измерительные каналы не соответствуют метрологическим характеристикам, то проводится их настройка с помощью КО.

Опробование

Измерение ДИАМЕТРОВ, мм

Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Число измерений	
СОП 2	0.0012	0.0003	0.0020	0.0011	0.0007	0.0026	-0.0005	0.0006	0.0019	-0.0005	0.0005	0.0017	-0.0007	0.0004	0.0015	-0.0015	0.0006	0.0028	10

Погрешность измерений диаметров, мм: 0.0028

Измерение НЕСООБНОСТИ, мм

Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Число измерений	
СОП 7	0.0085	0.0000	0.0085	0.0035	0.0000	0.0035	0.0009	0.0000	0.0009	1

Погрешность измерений несоосности, мм: 0.0085

Измерение ПРОГИБА, мм

Ср. отклон. от номин.	СКО	Погреш. ность	Число измерений	
СОП 4	0.0015	0.0003	0.0021	10

Погрешность измерений прогиба, мм: 0.0021

Измерение ДЛИН, мм

Отклонение от номинала	СКО	Погрешность	Число измерений	
СОП 16	0.0106	0.0000	0.0106	1

Погрешность измерений длин, мм: 0.0106

Процент выполнения измерений

Калибровка измерителей диаметра

Закончить измерения

Отменить (Esc)

Рисунок 5.12 – Проверка метрологических характеристик АКК «РАЗМЕР-06»

В автоматическом режиме работы автоматизированного комплекса (рисунок 5.13) в составе линии, после измерения каждого твэла, данные выводятся на экран и передаются в АСУТП линии.

При обнаружении бракованных изделий система выдает команду на транспортирующий механизм направить изделие в накопитель брака. После того, как контроль всей партии твэлов закончится, изделия из накопителя брака подвергаются повторному контролю с ручной загрузкой на подающие ролики. Если

по результатам повторного контроля изделие бракуется вновь, то оно считается окончательно забракованным. Если же оно признается годным, то производится третий контроль, и окончательное решение принимается по итогам совпадения двух результатов контроля. Для исключения потери информации при ее передаче в АСУТП линии в АСУКП «Размер-06» ведется дублирующая база данных результатов измерений твэлов. Метрологическое обеспечение АКК «РАЗМЕР-06» включает в себя эксплуатационную документацию, программное обеспечение и комплект КО.

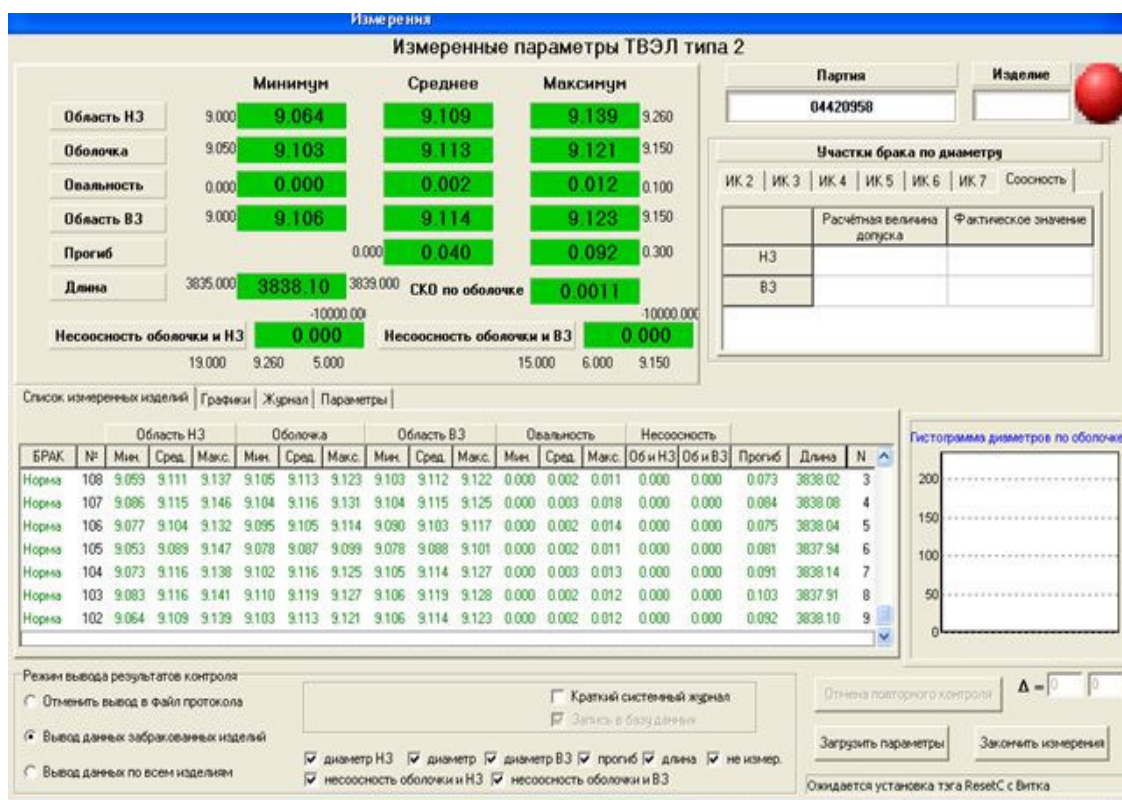


Рисунок 5.13 – Автоматический режим работы АКК «РАЗМЕР-06»

Комплект документации включает программу и методику метрологической аттестации и калибровки, техническую документацию на КО. Программное обеспечение включает режимы «Опробование» и «Калибровка».

Режим «Опробование» производится в начале каждой смены и включает измерение минимального набора КО, необходимого для подтверждения метрологических характеристик системы. Калибровка проводится один раз в год с

полным набором КО, включающим: три КО контроля диаметров на минимальное, номинальное и максимальное значения, с погрешностью по диаметру не более 2 мкм, три КО контроля отклонения от прямолинейности твэла выполнены в виде трёхзвенных коленвалов, у которых ось среднего цилиндра смещена от оси крайних цилиндров на 0,25 мм, 0,5 мм и 1,0 мм (погрешность изготовления не более 5 мкм), где в качестве КО с нулевым отклонением от прямолинейности при калибровке используется КО диаметра с номинальным значением; стандартные образцы длины, выполненные в форме, близкой к контролируемым изделиям, из того же металла, что и твэл (погрешность изготовления – 0,1 мм). Всего таких КО – четыре (по числу типов твэла).

Использование того же металла позволяет калибровать комплекс в диапазоне температур эксплуатации с приемлемой точностью. Самый длинный из контрольных образцов длины дополнительно является и КО «участки брака», для чего на нем сделаны проточки протяженностью 20 мм, 10 мм и 2 мм в начале, середине и конце КО. Погрешность длины каждой из проточек 50 мкм. Результаты калибровки системы выдаются в виде протокола, в режиме «Калибровка».

Перейдём к анализу погрешностей измерения геометрических параметров твэлов ВВЭР-1000 АКК «РАЗМЕР-06». Погрешность теневого метода измерения зависит от точности определения положения края цилиндрического объекта по его изображению. В результате исследований установлено, что основной вклад в общую погрешность измерения положения края $\Delta_{кр}$ вносят следующие составляющие погрешности: аппроксимации края $\Delta_{ап}$, aberrации проекционной системы $\Delta_{аб}$ и считывания изображения $\Delta_{сч}$. Погрешность аппроксимации $\Delta_{ап}$ возникает вследствие неточного приближения выходного сигнала $U(x)$, соответствующего изображению края объекта, линейной функцией (рисунок 5.14).

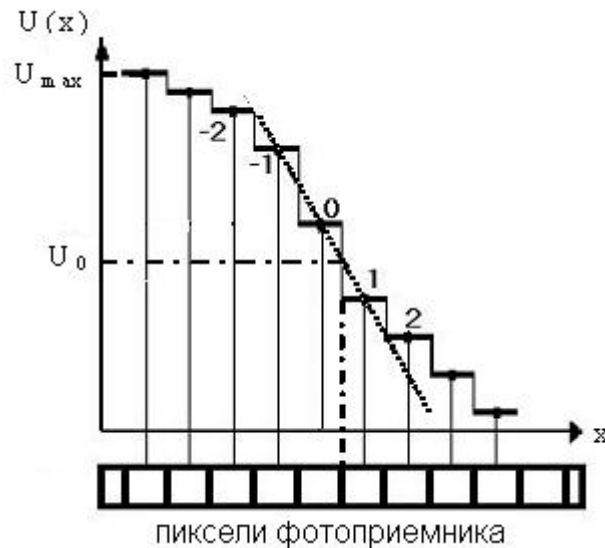


Рисунок 5.14 – Сигнал $U(x)$ от края цилиндра и линейная аппроксимация

Рассмотрены два способа уменьшения уровня $\Delta_{ап}$. Первый из них основан на предварительной свёртке сигнала с прямоугольной функцией. В работе [104] показано, что для заданной ширины края ΔN погрешность $\Delta_{ап}$ можно уменьшить путём выбора оптимальной ширины M прямоугольной функции и числа элементов аппроксимации N . Так, при $\Delta N = 3$, $M = 5$ и $N = 5$ эту погрешность можно довести до 1 мкм. Другой способ снижения погрешности – использование более сложных функций для аппроксимации изображения края цилиндра, в частности, кубического полинома. В этом случае погрешность $\Delta_{ап}$ не превышает $\pm 0,5$ мкм. Погрешность $\Delta_{аб}$ обусловлена, в основном, дисторсией оптической проекционной системы, описывающей отклонение координаты изображения края от действительного его положения на входе измерительного датчика. Поскольку разработка, производство и настройка оптической системы с низким уровнем aberrаций – процесс трудоёмкий, то рассмотрено два альтернативных способа коррекции aberrации: аппроксимацию дисторсии в виде полинома и формирование соответствующей корректирующей таблицы для последующей компенсации дисторсии. Экспериментально установлено, что использование первого способа коррекции позволяет снизить ошибку с ± 25 мкм до ± 5 мкм, а второго – до ± 1 мкм.

Погрешность считывания изображения $\Delta_{сч}$ обусловлена квантованием по уровню выходного сигнала аналого-цифровым преобразователем, а также неоднородностью чувствительности элементов фотоприёмника. В случае восьмиразрядного аналого-цифрового преобразователя и 1-процентного уровня неравномерности чувствительности (от максимального уровня сигнала), погрешность $\Delta_{сч}$ определения координаты края не превышает $\pm 0,5$ мкм.

С учетом проведенных выше оценок составляющих погрешности определения положения края цилиндра, суммарная погрешность измерения его диаметра (в расчет принимались два края) не превышает 2 – 2,5 мкм. На практике в работающих измерительных системах «Контроль», «Размер», «Размер-06», удалось достичь метрологических характеристик, приведенных в таблице 5.3). Относительно высокий уровень погрешности при измерении длины объясняется наличием нескольких типов заглушек твэлов с существенно отличающейся формой, что приводит к большим вариациям фронта теневого сигнала в измерителях длины.

Таблица 5.3 – Погрешности измерения геометрических размеров твэлов

Параметр	Погрешность, мм
Диаметр	0.003
Овальность	0.002
Отклонение от прямолинейности образующей оболочки	0.009
Положение участков брака по образующей оболочки	1.988
Длина	0.072
Несоосность оболочки с верхней и нижней заглушками	0.007

Для определения положения участков брака используются контактные измерители перемещений: угловые инкрементные датчики, жестко связанные с транспортной системой, которая протягивает твэлы через измерительную систему. Обеспечение высокой точности измерений по этим двум параметрам не требуется.

АКК «Размер-06», внедрённая в промышленную эксплуатацию составе технологической линии производства твэлов ВВЭР-1000 в ПАО «НЗХК» позволяет осуществлять высокопроизводительный сплошной контроль всех критических геометрических параметров твэла: наружных диаметров оболочек, отклонения от прямолинейности оболочки, соосности оболочки с заглушками, длины, положения и протяжённости участков с браком по диаметру вдоль оси твэла.

За время эксплуатации АКК «Размер - 06» проконтролированы десятки тысяч твэлов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 на соответствие их геометрических параметров технологическим требованиям производства. Ими укомплектованы тепловыделяющие сборки, которые работают в настоящее время на российских и зарубежных атомных электростанциях. АКК «РАЗМЕР» прошёл государственные испытания по утверждению типа средств измерений и внесён в Госреестр средств измерений РФ под № 56368-14. Результаты эксплуатации данного АКК «РАЗМЕР» и его перспективы развития изложены в работах [7, 108].

5.3 Автоматизированный комплекс контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000

В разделе 4.4 рассмотрен алгоритм контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС ВВЭР-1000. В основу данного алгоритма заложена оптикоэлектронная методика контроля измерения геометрических параметров дистанционирующих решёток (ДР) с использованием лазерно-измерительных головок и многоточечного структурного освещения объекта контроля. Там же приведены технические требования по контролю геометрических параметров ДР ТВС реактора ВВЭР-1000.

В данном разделе рассматривается конструкция АКК «РЕШЁТКА», которая реализует рассмотренный ранее алгоритм контроля геометрических параметров ДР ТВС реактора ВВЭР-1000. Общий вид конструкции АКК «РЕШЁТКА» представлен

на фотоснимке (рисунок 5.15). Далее рассмотрим режимы работы автоматизированного комплекса по контролю дистанционирующих решёток, форму представления результатов измерений и технические характеристики АКК «РЕШЁТКА».



Рисунок 5.15 – Общий вид АКК «РЕШЁТКА»

Конструктивно автоматизированный комплекс выполнен на основе базовой плиты, на которой размещены измерительный стол с контролируемой дистанционирующей решеткой и арка. На рисунке 5.16 представлена функциональная схема АКК «РЕШЁТКА»

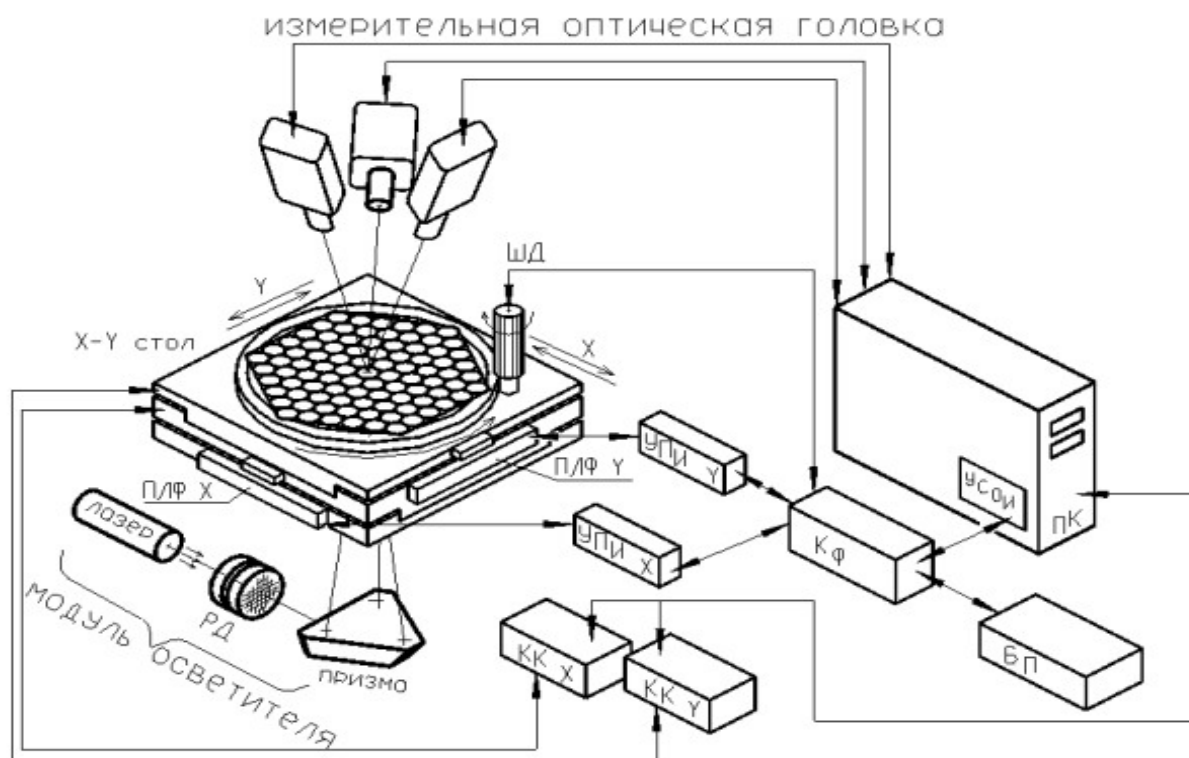


Рисунок 5.16 – Функциональная схема АКК «РЕШЁТКА».

РД – модуль решетки Дамманна; ШД – шаговый двигатель; КК X и КК Y – устройства контроля для X и Y координат; ПЛФ X и ПЛФ Y – оптико-электронные преобразователи линейного движения по X и Y координатам; УПИ X и УПИ Y – унифицированные цифровые преобразователи по X и Y координатам; КФ – функциональный контроллер; БП – источник питания; УСОИ – устройство для сбора и обработки данных; ПК – персональный компьютер.

АКК геометрических параметров дистанционирующих решёток ТВС ВВЭР-1000 типа «РЕШЁТКА» включает в себя специальную трехканальную лазерно-электронную измерительную головку для восприятия изображений отверстий ячеек и каналов (далее измерительная головка), сканирующий X-Y стол, электронику и программное обеспечение. Узел осветителя включает лазер, узел решетки Дамманна (РД) и специальную призму. Узел решетки Дамманна состоит из двух скрещенных решеток и предназначен для расщепления лазерного луча на 12×13 дифракционных порядков двухмерного светового распределения, которое дальше

разделяется призмой на три части с равными интенсивностями. В результате из призмы пучки выходят под углом 120° друг к другу в плоскости XY, и каждый пучок – под углом 30° к оси Z. Таким образом, формируются три набора матриц лазерного пучка (с периодами $\Delta_y = 0,2$ мм, $\Delta_z = 0,52$ мм), направленные под углом 30° на 30° внутренние поверхности контролируемой ячейки.

Приемный модуль представляет собой три идентичных проецирующих объектива и три ПЗС камеры. Считанное изображение оцифровывается и передается в управляющий компьютер через соответствующие видеобуферы SILIKON VIDEO MUX.

Измерительный стол (ИС) обеспечивает контролируемое перемещение дистанционирующей решетки в поле зрения оптико-электронного измерительного блока в направлении координат X и Y, а так же поворот дистанционирующей решетки в плоскости XY. В качестве измерительного стола выбран двухкоординатный X-Y столик типа OFL-2121SM, в который встроено поворотное устройство. Дистанционирующая решетка устанавливается в обойму поворотного устройства, приводимую в движение шаговым двигателем. Каретки столика приводятся в движение двумя шаговыми двигателями посредством ходовых винтов.

Шаговые двигатели в свою очередь связаны с управляющими контроллерами (УК) MCS-ST-48-PS, которые взаимодействуют с компьютером через последовательный порт RS-232. Для контроля величины и направления движения кареток на них конструктивно установлены фотоэлектрические преобразователи линейных перемещений, которые работают в комплекте с блоками унифицированного преобразователя импульсов, соединенными с контроллером функциональным (КФ), состоящим из двух идентичных плат - устройств сопряжения (УС). Одна из них управляет работой шагового двигателя устройства поворотного и производит обработку сигналов от блока по координате X, а другая по координате Y. Устройство сбора и обработки информации (УСОИ) предназначено для сбора данных с периферийных устройств по двум скоростным

последовательным каналам и их предварительной обработки с помощью микроконтроллера INTEL 80C188EB.

Программное обеспечение АКК «РЕШЁТКА» состоит из основной программы, программы для анализа статистики, собранной в ходе измерения решётки, программы для устройства сбора и обработки информации УСОИ. Основная программа, написанная на языке программирования Microsoft Visual C++ версии 5.0, работает под управлением операционной системы Windows. Она обеспечивает отображение на экране текущего состояния процессов в удобной для оператора форме. Для взаимодействия с оператором используется оконный, графический режим. В основной программе автоматизированного комплекса реализованы два режима: подготовительный и рабочий.

В подготовительном режиме (с участием оператора) производятся следующие операции: тестирование основных узлов комплекса, ввод параметров контролируемых дистанционирующих решеток и стандартных образцов, калибровка и метрологическая аттестация. Калибровка системы выполняется отдельно для каждого луча из структурного пучка. Рассмотрим отдельно единичный луч.

Можно заметить, что образ рассеянного излучения лежит на некоторой прямой в плоскости матрицы видеокамеры. На первом этапе находятся коэффициенты этой прямой в системе координат видеокамеры. Затем по методу наименьших квадратов находим коэффициенты A и B для приближения зависимости между образом рассеянного излучения и пятном на поверхности контролируемого объекта с помощью следующей дробно рациональной функции:

$$\Delta X = A\Delta\chi(1 + B\Delta\chi)^{-1},$$

где:

$\Delta\chi$ - смещение образа рассеянного излучения вдоль соответствующей прямой на камере;

ΔX – смещение пятна на поверхности контролируемого объекта вдоль луча.

Далее, зная параметры луча в пространстве, можно рассчитать 3D координаты пятна на поверхности.

Режим измерения позволяет автоматически измерить геометрические параметры контролируемой дистанционирующей решетки, а также визуализировать результаты измерений и состояния «годен/брак» по каждому из параметров и выдавать протоколы измерения и контроля в краткой или полной форме. При измерении элементов дистанционирующей решетки используется следующий алгоритм контроля: позиционирование измеряемого элемента дистанционирующей решетки (границ обода, ячейки или каналные отверстия) относительно системы считывания, передача оцифрованных изображений от 3-х телекамер в управляющий компьютер, обработка полученных данных. Последнее включает растровую обработку изображения, идентификацию светового пятна и восстановление формы поверхности, используя квадратичную форму трех переменных X , Y , Z . Эти вопросы более подробно изложены в работе [35]. Пример изображения типичной ячейки, образованной при многоточечном структурном освещении и записанной ПЗС камерой, представлен на рисунке 5.17. Растровое изображение ячейки, обработанное на компьютере, показано на рисунке 5.18.

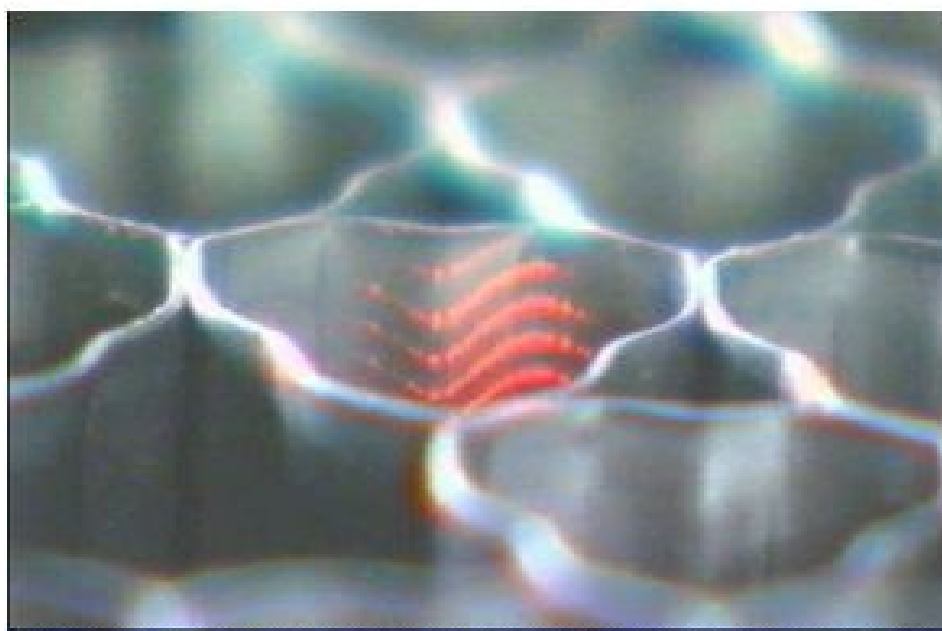


Рисунок 5.17 – Изображение ячейки под многоточечным структурным освещением

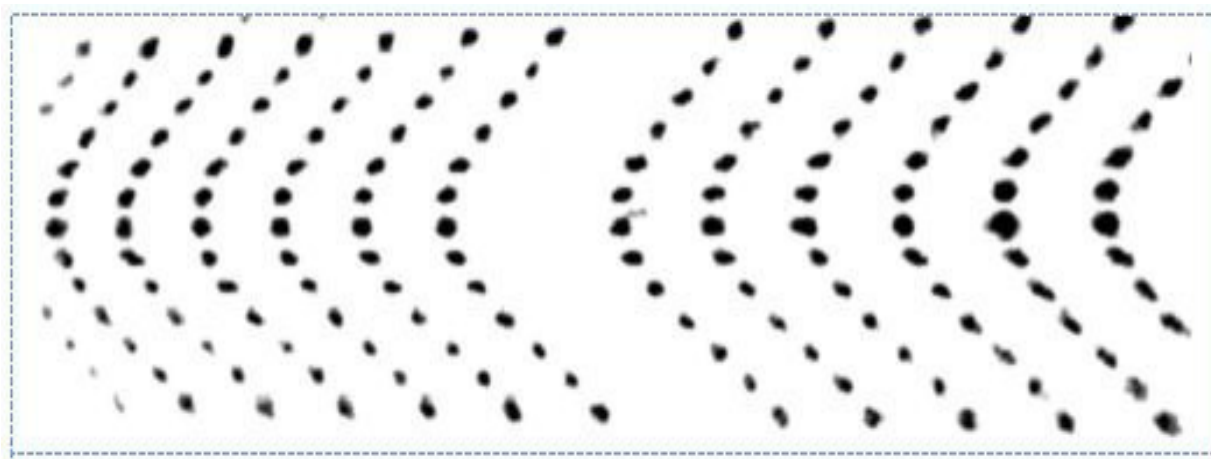


Рисунок 5.18 – Растровое изображение ячейки после цифровой обработки

Измерение начинается с процедуры определения положения стола. Для этого производится последовательное измерение трех реперных цилиндров, установленных на поворотном узле. Определив их координаты, программа совмещает центр решетки с осью системы считывания.

Таким образом, определяется начало прямоугольной системы координат, в которой определение размеров «под ключ» производится в два этапа. Сначала определяются координаты нечетных граней обода решетки (по 6 замеров на каждой грани), а затем после поворота решетки на 60^0 измеряются координаты четных граней, с помощью которых вычисляются требуемые размеры.

При определении геометрии отверстия под канал производится поворот решетки относительно исходного (базового) положения на 60^0 и осуществляется 6 подъездов к элементам отверстия. По координатам пятен на поверхностях строятся интерполянты этих поверхностей. Затем в 16 сечениях по вертикали определяются диаметры вписанных окружностей. В качестве результата измерения выбирается минимальный диаметр.

Определение геометрии ячеек осуществляется после поворота решетки в базовое положение и коррекции обратного поворота по реперным цилиндрам. Считывание информации о размере ячейки осуществляется за 1 переезд в точку, соответствующую центру ячейки по чертежу. После считывания трех изображений

цилиндрических поверхностей ячейки производится анализ их качества и в случае плохого качества, т.е. при заметном отклонении положения решетки от центра диапазона измерения головки, производится повторный ввод изображения с последующим вычислением наименьшего диаметра вписанной окружности.

В рабочем режиме предусмотрены три способа визуализации результатов измерения и контроля. Первый из них предусматривает отображение диаметров в виде картограммы дистанционирующей решетки с цветовым выделением ячеек и канальных отверстий. При втором способе визуализации отображаются смещения центров ячеек и канальных отверстий $S^{(q)}$ в виде картограммы дистанционирующей решетки с векторами, выходящими из центров ячеек и отверстий под канал. Модуль векторов и их направления в соответствующем масштабе иллюстрируют смещения, а цвет – принадлежность полю допуска.

В качестве примера, иллюстрирующего этот режим работы комплекса, приведены результаты измерения смещения ячеек $S^{(q)}$ дистанционирующей решетки, которая была подвергнута сильной деформации, как показано на рисунке 5.19. Такая форма отображения весьма полезна при анализе качества изготовления решетки.

И, наконец, при отображении межцентровых расстояний $L^{(k)}$, на экране виден «скелет» решетки: пунктирные линии, соединяющие чертежные центры ячеек и канальных отверстий, обозначают нормальные ситуации (в допуске), а сплошными линиями выделяются расстояния между ячейками, выходящие за поле допуска.

В качестве примера на рисунке 5.20 представлен результат измерения межцентровых расстояний L между ячейками.

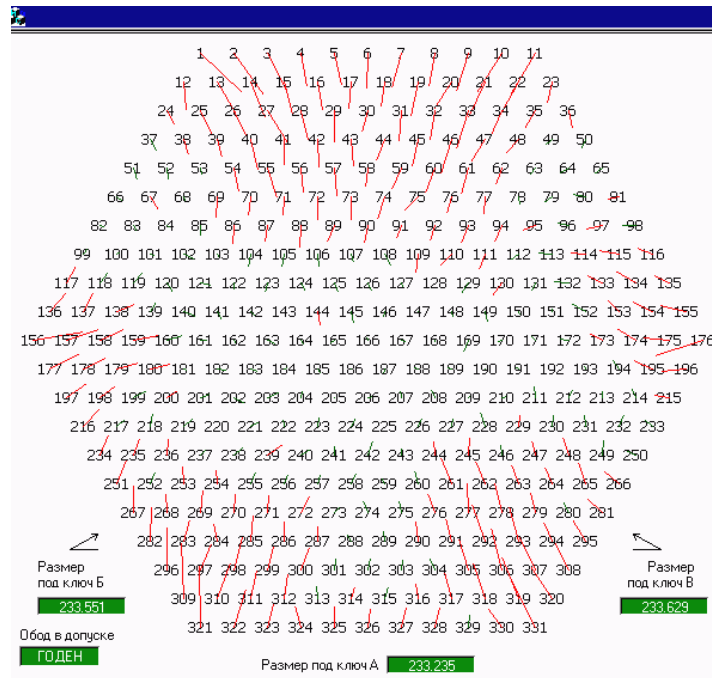


Рисунок 5.19 – Векторная картограмма, иллюстрирующая смещение ячейки дистанционирующей решетки после сильной искусственной деформации

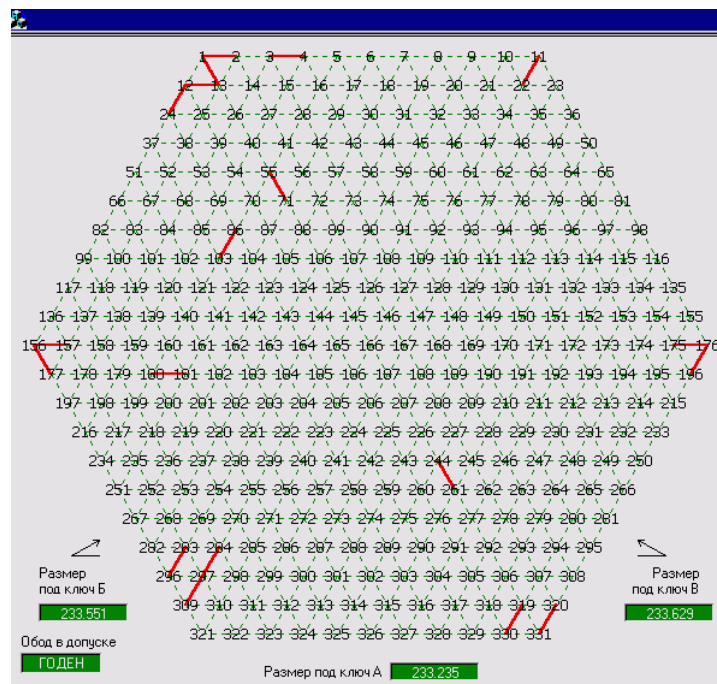


Рисунок 5.20 – Результат измерения межцентровых расстояний между ячейками

Указанные выше способы отображения информации предусматривают контроль индивидуальных размеров и трехмерной конфигурации любой ячейки или отверстия под канал. Результат измерения одной из ячеек приведен на рисунке 5.21.

Здесь представлены массивы диаметров $D_c(j)$ и координат центров $X_c(j)$, $Y_c(j)$ вписанных окружностей по 16 сечениям и построенные по этим значениям 2D графики и 3D конфигурация ячейки. Кроме этого, на экране монитора дается информация о среднем, минимальном и максимальном диаметрах вписанных окружностей, а также признаки годности следующих параметров: принадлежность центров вписанных окружностей цилиндру (полю допуска) и принадлежность вписанных окружностей полуму цилиндру (нижнему и верхнему допускам).

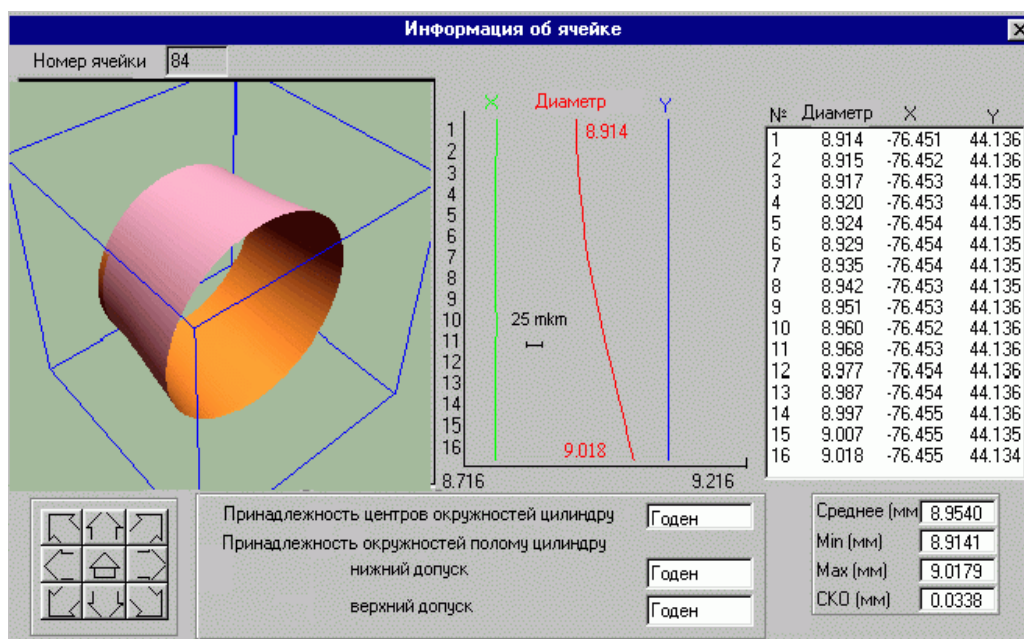


Рисунок 5.21 – Результат измерения одной ячейки решетки, включая 3D изображение, диаметры $D_c(j)$ и координаты центров $X_c(j)$, $Y_c(j)$

Далее остановимся на метрологическом обеспечении АКК «РЕШЁТКА». Комплекс имеет в своём составе стандартные образцы (СОП) размеров «под ключ» и диаметров. СОП размеров «под ключ» имеет вид шестигранника с параметрами

$B_1=B_2 = 233,440$ мм, $B_3 = 233,430$ мм. В режиме калибровки комплекс по размерам B_1 , B_2 и B_3 определяет коэффициенты пересчета, связывающие линейные размеры по координатам X и Y с дискретами шаговых двигателей и стеклянных линеек. Погрешность позиционирования составляет 1 мкм.

Предусмотрены также два СОП размеров «под ключ» с параметрами, соответствующими нижнему и верхнему технологическим размерам решетки. Стандартные образцы диаметров представляют собой набор 10 полых цилиндров, закрепленных на шестигранной платформе. Внутренние диаметры шести цилиндров соответствуют диаметрам вписанных окружностей в ячейку, а оставшихся четырех цилиндров – в отверстие под канал. Калибровка проводится по СОП с номинальным диаметром $D_{ном} = 9.024$ мм. Четыре СОП служат для воспроизведения нижнего и верхнего технологических размеров, а также для проверки диапазона измерения диаметров ячеек.

В ходе приёмочных испытаний АКК «РЕШЁТКА» проведено определение метрологических характеристик по аттестованным стандартным образцам. Проведены испытания на надёжность в течение 72 ч непрерывной работы устройства в режиме контроля штатных изделий, специально подготовленных для проведения испытаний. Установлены следующие точностные характеристики, сведённые в таблицу 5.4. Можно видеть, что достигнутые точностные характеристики в 2-3 раза лучше тех, что установлены в технических требованиях на контроль геометрических параметров ДР ТВС ВВЭР-1000, которые обсуждены в разделе 4.4 работы.

Таблица 5.4 – Точностные характеристики АКК «РЕШЕТКА»

Контролируемые параметры	Погрешность измерения, мм
Диаметр ячейки, Δd	0,016 мм
Отверстие под канал, ΔD	0,018 мм
Смещение центра, ΔL	0,015 мм
Размер «под ключ», ΔK	0,032 мм

Таким образом, рассмотрена конструкция АКК «РЕШЁТКА», измерительным узлом которой является специальная трехканальная лазерно-электронная измерительная головка для получения изображений ячеек и отверстий под канал при их структурном освещении. В состав конструкции входит сканирующий X-Y стол, электронные узлы и программное обеспечение. Автоматический режим измерения дает возможность определения геометрических параметров дистанционирующей решетки при контроле и визуализации результатов измерения, а также фиксации состояния «годен/брак» относительно каждого параметра с последующей выдачей протоколов измерения и контроля, как в краткой, так и в полной формах.

Созданное программное обеспечение предусматривает три способа визуализации результатов измерения: в виде цветной и векторной картограмм для отображения соответственно диаметров и смещения центров ячеек и канальных отверстий, а также в виде картограммы скелетного типа для отображения межцентровых расстояний ячеек решетки. Существенно то, что АКК «РЕШЁТКА» позволяет контролировать индивидуальные размеры и 3D конфигурацию любой ячейки или отверстия канала, используя измерительную информацию о диаметрах и координатах их центров вписанных окружностей в 16 поперечных сечениях. В результате промышленного тестирования установлено, что погрешности измерения для диаметра ячейки, отверстия канала и сдвига центра не превышали 18 мкм. Что касается общих размеров «под ключ», их погрешности были менее 32 мкм. Время контроля геометрических параметров дистанционирующей решетки составляет 12–30 мин, в зависимости от режима измерения, что почти в 20 раз ниже, чем время контроля тех же параметров на контактных координатно-измерительных машинах.

АКК «РЕШЁТКА» прошёл полный цикл производственных испытаний на ОАО «НЗХК» и принят в промышленную эксплуатацию в 2010 г. Конструкция и алгоритм функционирования АКК «РЕШЁТКА» защищены патентом РФ [92]. Результаты эксплуатации и перспективы развития данного комплекса изложены в работе [109]

5.4 Автоматизированный комплекс контроля сплошности столба топливного слоя твэлов ВВЭР-1000

В разделе 4.2 главы 4 настоящей работы рассмотрена методика и алгоритм контроля сплошности топливного столба твэлов ВВЭР-1000 с применением гамма-абсорбционного радиометрического метода контроля. В настоящем разделе рассмотрим конструкцию и технические характеристики АКК сплошности топливного столба твэлов ВВЭР-1000 типа КСИГ.

На фотоснимке (рисунок 5.22) дан общий вид АКК сплошности топливного столба твэлов типа КСИГ. На рисунке 5.23 представлена функциональная схема АКК типа КСИГ.



Рисунок 5.22 – Общий вид АКК типа КСИГ

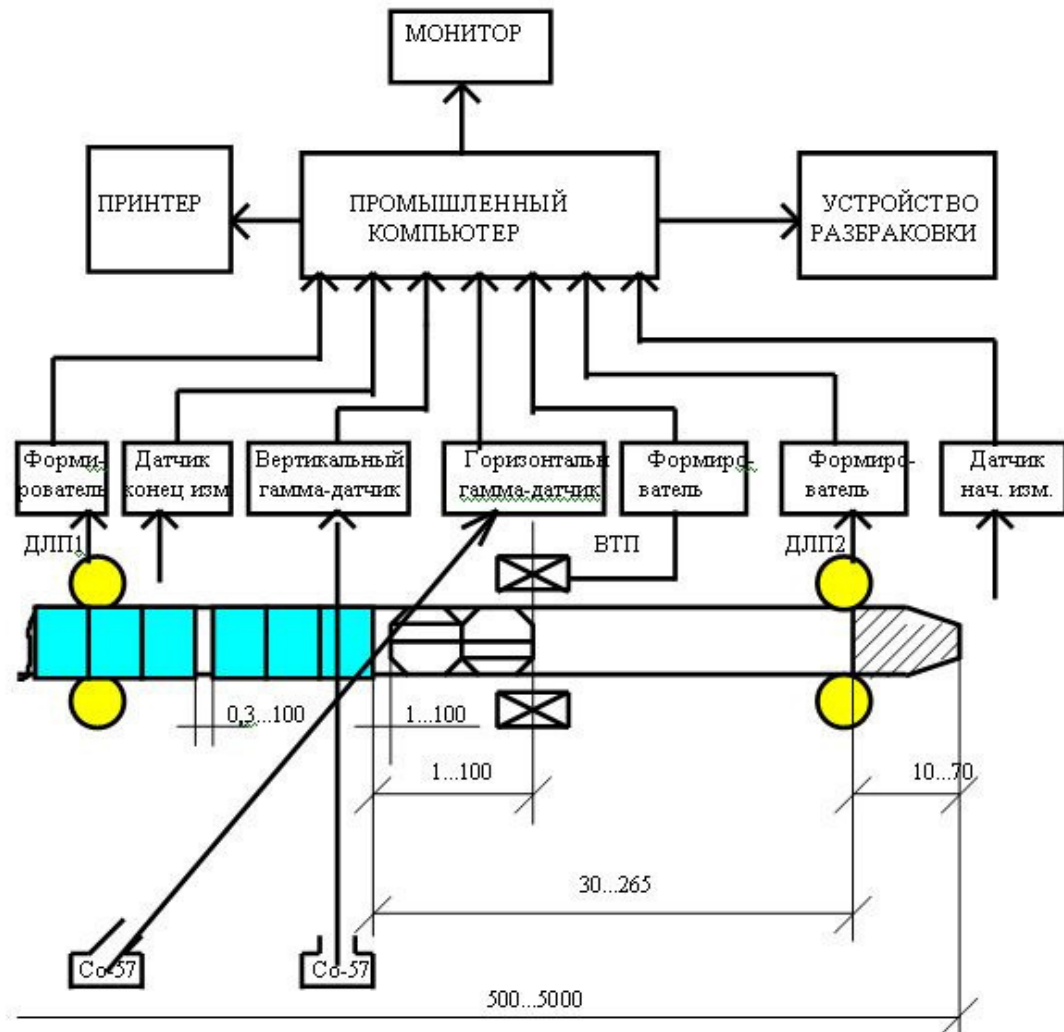


Рисунок 5.23 – Функциональная схема АКК типа КСИГ

Комплекс имеет два измерительных канала – горизонтальный и вертикальный. Каждый измерительный канал снабжён источником Co^{57} и сцинтилляционным детектором. Оси двух измерительных каналов направлены перпендикулярно друг другу. Такое расположение измерительных каналов обеспечивает надёжный контроль дефектов сплошности топливного столба ТВЭЛов реактора ВВЭР. Для точной фиксации перемещения ТВЭЛА используются датчики линейных перемещений ДЛП1 и ДЛП2. Для измерения положения фиксаторов топливного столба ТВЭЛА, имеющих вид разрезной нержавеющей втулки, применяется вихретоковый преобразователь (ВТП). В настоящее время чаще используется

пружинный фиксатор и необходимость в вихретоковом преобразователе отпадает. На рисунке 5.24 представлена структурная схема АКК типа КСИГ.

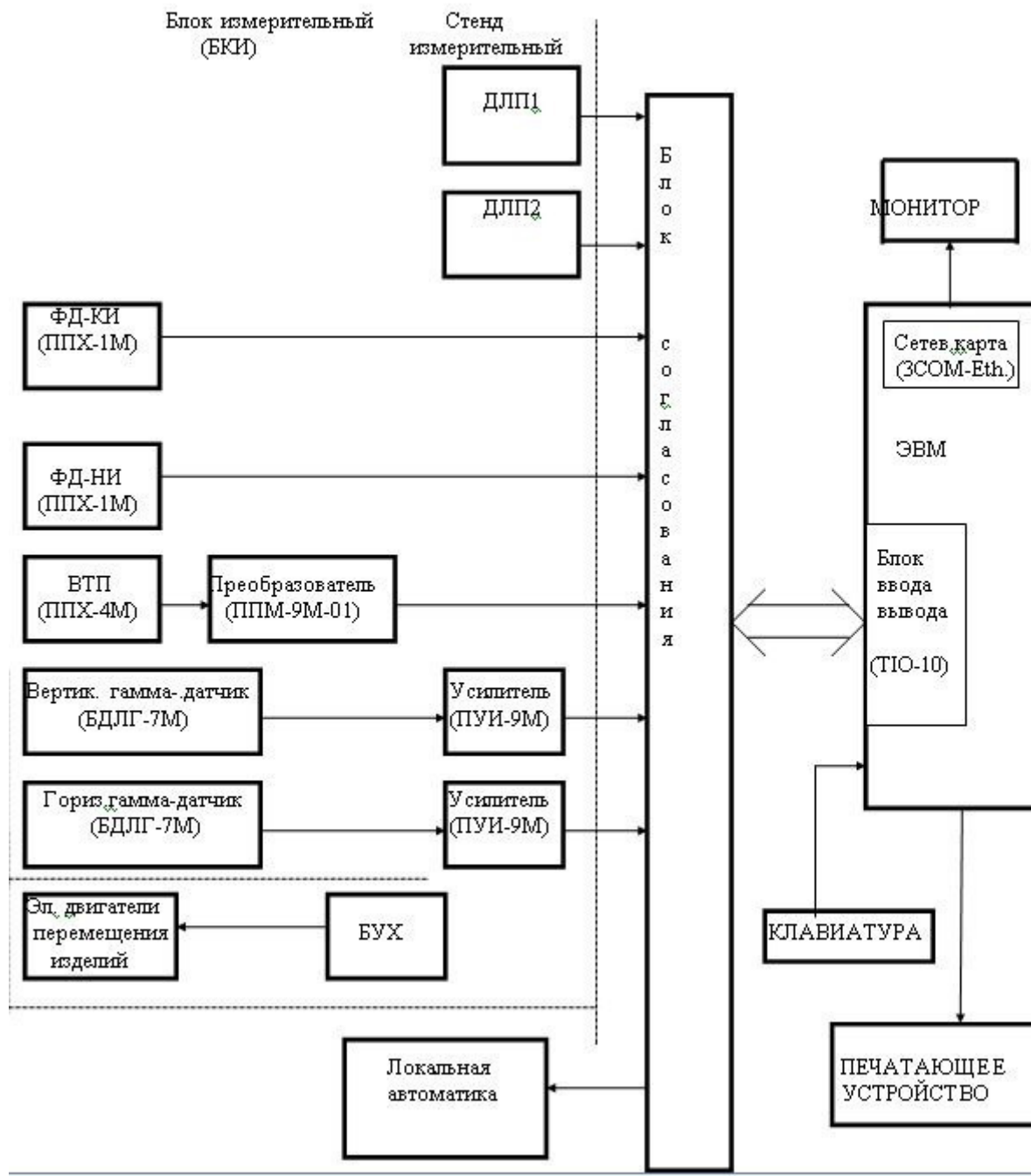


Рисунок 5.24 – Структурная схема АКК типа КСИГ

В конструкции данного автоматизированного комплекса используются в основном стандартные, унифицированные технические средства электроники, автоматики и вычислительной техники. В качестве устройства связи

измерительного канала с компьютером применено устройство фирмы National Instruments типа ТЮ-10. Компьютер, который входит в состав автоматизированного комплекса, выполнен в промышленном варианте эксплуатации. Программное обеспечение автоматизированного комплекса позволяет проводить обработку поступающей информации в реальном масштабе времени, проводить статистическую обработку результатов измерения и передавать необходимую информацию в виде выходных документов по контролю твэла оператору или в виде файлов на верхний уровень АСУТП технологической линии.

Технические характеристики АКК КСИГ

1. Диапазоны измерения контролируемых параметров:

- компенсационного зазора, ммот 30 до 1500;
- единичного зазора, ммот 0,3 до 100;
- суммы единичных зазоров, превышающих заданное значение, мм... от 0 до 100;
- зазора между втулочным фиксатором и таблеткой, мм от 1 до 100;
- расстояния от края втулочного фиксатора до таблетки, мм от 1 до 100;
- длина компенсирующей части пружинного фиксатора, ммот 30 до 150;
- длины топливного столба, ммот 10 до 6500.

2. Предел допускаемой погрешности измерения контролируемых параметров:

- компенсационного зазора в диапазоне от 30 до 300 мм, мм $\pm 2,0$;
- максимального единичного зазора (зазор таблетка-таблетка, таблетка-заглушка и столбик-таблетка) в диапазоне от 0,3 до 5 мм, мм..... $\pm 0,3$;
- суммы единичных зазоров, превышающих заданное значение в диапазоне от 0 до 25 мм, мм..... $\pm 1,5$;
- зазора между втулочным фиксатором и таблеткой в диапазоне от 1 до 5 мм, мм $\pm 1,0$;
- расстояния от края втулочного фиксатора до таблетки в диапазоне от 1 до 30 мм, мм $\pm 1,0$;
- длины компенсирующей части пружинного фиксатора в диапазоне от 30 до 150 мм, мм $\pm 1,5$;
- длины топливного столба в диапазоне от 10 до 4000 мм, мм $\pm 3,0$.

3. Вероятность обнаружения в компенсационном зазоре единичной крошки объемом более 8 мм^3 с доверительной вероятностью 0,95, не менее.....0,8.
4. Вероятность регистрации зазоров, заполненных крошкой на 50% по объему (треугольных сколов размером 7,6мм x 7,6мм), не менее.....0,8.
5. Производительность, изд./ч., не менее90.
6. Скорость перемещения изделия, мм/с, не более.....140.
7. АКК КСИГ-12СТ имеет три режима работы:
 - "Контроль" – режим контроля изделий с предварительной проверкой работоспособности установки на стандартном образце предприятия (СОП-С);
 - "ППР" – режим планово-профилактических работ, обеспечивающий автоматизированную настройку порогов срабатывания и коррекцию систематических поправок на стандартных образцах;
 - "Метрологическая аттестация" – режим автоматизированной проверки метрологической исправности на стандартных образцах.
8. Печать результатов контроля осуществляется в двух режимах:
 - "Брак" – режим распечатки параметров забракованных изделий;
 - "Полный" – режим распечатки параметров всех изделий.
9. Среднее время восстановления, ч, не более.....2.
10. Средняя наработка на функциональный отказ, ч, не менее.....1000.
11. Средняя наработка на ошибку программного обеспечения, ч, не менее.....1000.
12. Средняя наработка на метрологический отказ, ч, не менее.....750.
13. Срок службы АКК КСИГ, лет.....6.
14. Время установления рабочего режима, мин, не более.....15.
15. Полная мощность, потребляемая АКК КСИГ, ВА, не более.....1500.

АКК контроля сплошности топливного столба твэлов ВВЭР-1000 типа КСИГ внедрён в промышленную эксплуатацию на ПАО «НЗХК» в составе технологических линий производства твэлов ВВЭР-1000. Алгоритм

функционирования и конструкция АКК типа КСИГ защищены 2 патентами РФ [13, 14].

5.5 Автоматизированные комплексы контроля внешнего вида твэлов реактора типа ВВЭР

В разделе 4.5 рассмотрен алгоритм комплексного контроля дефектов внешнего вида твэлов реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-440. В данном разделе показано, как для решения задачи сплошного контроля дефектов внешнего вида твэлов предлагается одновременно использовать вихретоковую и оптикоэлектронную методику контроля

Для реализации предложенного алгоритма контроля были разработаны АКК типа «ВИТОК», работающий по вихретоковой методике контроля дефектов внешнего вида твэла и АКК типа «ПРОФИЛЬ», работающий по оптикоэлектронной методике измерения глубины и формы дефектов. Физическая сущность данных методик рассмотрена в разделе 2.3.2. В настоящем разделе рассмотрим подробнее конструкцию и технические характеристики этих автоматизированных комплексов контроля внешнего вида твэлов типа ВВЭР.

5.5.1 Автоматизированный комплекс контроля дефектов внешнего вида поверхности твэлов «ВИТОК»

Рассмотрим конструкцию, технические характеристики и режимы работы АКК типа «ВИТОК». Общий вид конструкции АКК «ВИТОК» дан на рисунке 5.25. Все основные узлы конструкции автоматизированного комплекса смонтированы на столе, на котором соосно смонтированы протяжка левая (далее – протяжка 1), устройство контроля вихретоковое и протяжка правая (далее – протяжка 2).

Протяжки обеспечивают прием изделия с рольганга 1, равномерное перемещение изделия через устройство контроля вихретоковое и передачу его на рольганг 2.

Рольганг 1 и рольганг 2 не входят в состав установки, а являются частью технологической линии. На протяжке 1 установлен датчик наличия изделия Д1, а на протяжке 2 – Д2.

Для вращения тянущих роликов в каждой протяжке смонтирован мотор-редуктор. Передвижение изделия производится при вращении тянущих роликов и прижиме изделия к ним роликами при помощи пневмопривода. Для определения координат дефектов на каждой из протяжек установлен преобразователь угловых перемещений, вал которого механически связан с прижимным роликом протяжки. Внутри стола установлен блок предварительной обработки информации устройства вихретокового контроля. Кроме того, в столе смонтировано пневматическое оборудование для управления пневмоприводами протяжек и два преобразователя частоты для управления электродвигателями мотор-редукторов.

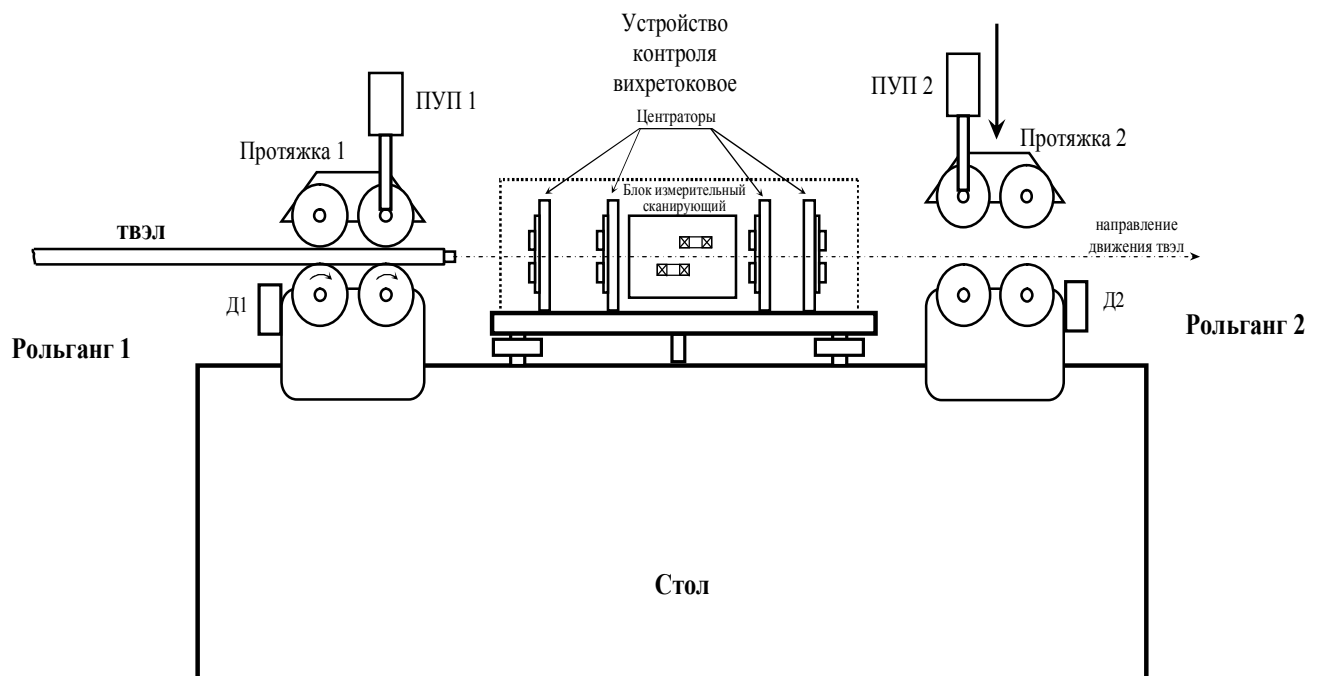


Рисунок 5.25 – Общий вид АКК типа «ВИТОК»

Установка имеет два режима работы: «Комплексный» и «Автономный». Комплексный режим предназначен для работы установки в автоматическом цикле контроля внешнего вида и обмена информацией с АСУТП. Автономный режим предназначен для автономной работы установки и выполнения операций под управлением оператора и состоит из подрежимов:

- «Контроль» - для автоматического поиска дефектов внешнего вида изделий по мере их поступления на установку;
- «Калибровка» для определения метрологических характеристик установки и проведения калибровки (аттестации) установки в соответствии с программой и методикой метрологической аттестации и калибровки;
- «Настройка» для настройки и тестирования программно-аппаратной части установки;
- «Диагностика» для проверки работоспособности установки и ее метрологической исправности.

Структурная схема АКК «ВИТОК» приведена на рисунке 5.26. В исходном состоянии изделие (ТВЭЛ) в установке отсутствует, о чем сигнализируют датчики наличия изделия Д1 и Д2, пневмоприводы протяжек находятся в верхнем положении. Датчики Д3 и Д4 сигнализируют, что на столе выгрузки изделия нет и накопитель брака не переполнен.

Моторы-редукторы протяжек и электродвигатель блока измерительного сканирующего, находящегося в составе устройства контроля вихретокового, остановлены. Блок предварительной обработки информации включен. После включения установки проводится диагностика ее работоспособности.

Оператор устанавливает стандартный образец дефектов рабочий (СОП-Р) в зону первой протяжки, производится автоматический контроль СОП-Р, в результате которого должно быть обнаружено 3 дефекта, которые нанесены на СОП-Р. Если диагностика комплекса успешно пройдена, то выдается сообщение о готовности комплекса к работе, в противном случае необходимо провести настройку комплекса.

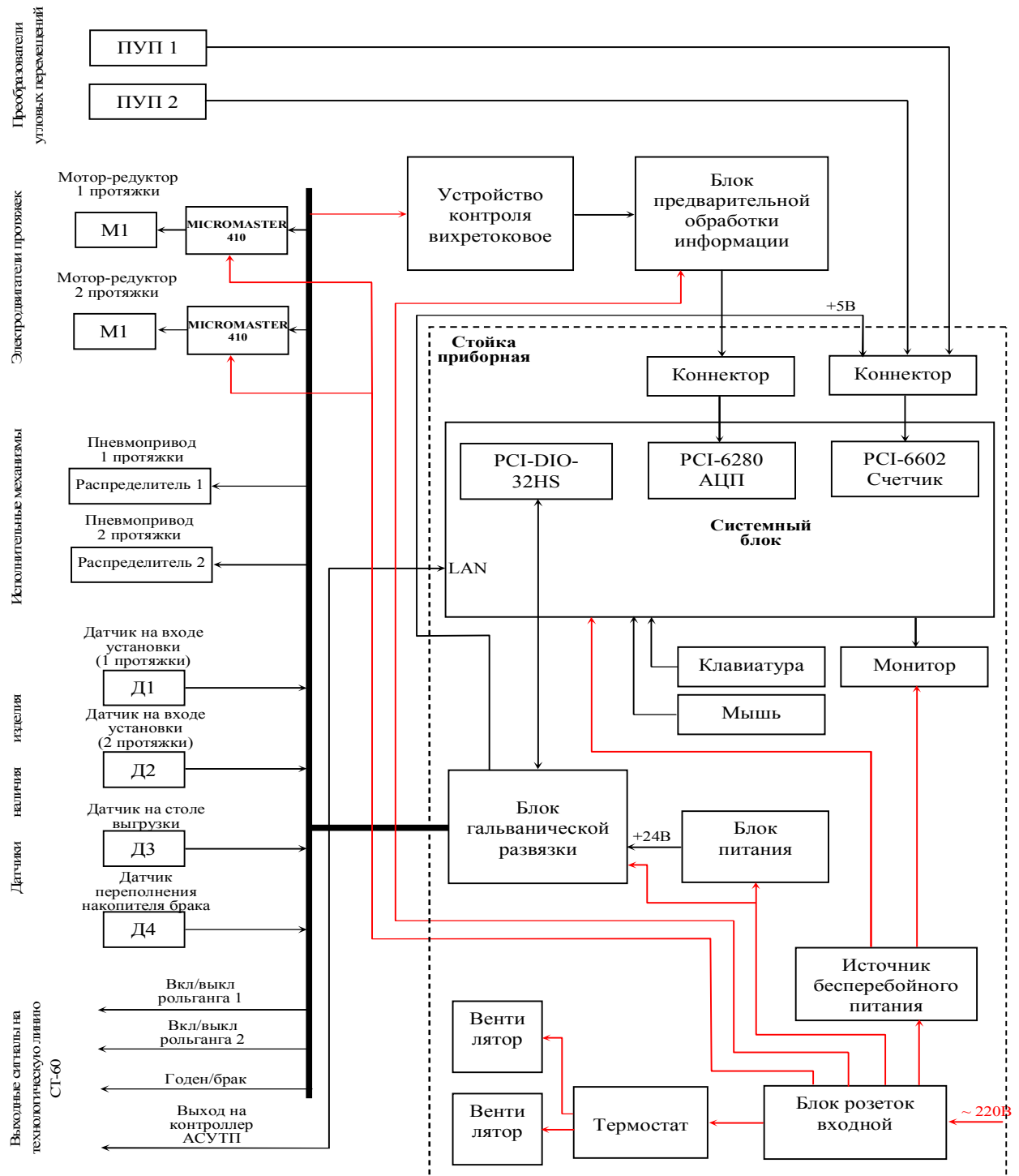


Рисунок 5.26 – Структурная схема АКК «ВИТОК»

Работа комплекса по контролю дефектов производится по следующему алгоритму. Запускаются мотор-редукторы протяжек и электродвигатель блока измерительного, сканирующего и выдается сигнал включения рольганга 1. При

поступлении изделия в установку включается датчик наличия изделия Д1 и после входа твэла в зону первой протяжки рольганг 1 отключается, включается пневмопривод протяжки 1, твэл прижимается к тянущим роликам протяжки и движется через позицию контроля. Для центрирования контролируемого изделия относительно оси блока измерительного сканирующего предназначены четыре центрирующего устройства контроля вихретокового (рисунок 5.25).

В блоке измерительном сканирующем при помощи электродвигателя вокруг изделия (в плоскости, перпендикулярной оси твэла) вращаются два измерительных вихретоковых накладных преобразователя. Начинается опрос вихретоковых преобразователей блока измерительного сканирующего и преобразователя угловых перемещений (далее – ПУП) 1. Аналоговые сигналы с вихретоковых преобразователей поступают в блок предварительной обработки информации, расположенный в столе, и далее через коннектор – на плату АЦП, а цифровые сигналы с ПУП1 и ПУП2 через коннектор – на плату счетчиков. Обе платы установлены в системном блоке ЭВМ.

Когда изделие достигает датчика наличия изделия Д2, включается пневмопривод протяжки 2, отключается пневмопривод протяжки 1, включается рольганг 2 и производится опрос ПУП 2. Дальнейшее перемещение изделия производится при помощи протяжки 2. При выходе изделия за пределы Д2 пневмопривод протяжки 2 отключается, твэл продолжает двигаться при помощи рольганга 2. Прекращается опрос всех датчиков установки и производится обработка полученной измерительной информации, при наличии дефектов на поверхности изделия определяются их координаты, выдается сигнал «Годен/Брак». При достижении изделием датчика Д3 отключается рольганг 2. Производится опрос датчиков Д3 и Д4 и если на столе выгрузки изделия нет и накопитель брака не переполнен (сигналы с датчиков отсутствуют), то выдается сигнал для включения рольганга 1.

В целях повышения надежности установки во всех режимах работы производится отключение электродвигателя блока измерительного сканирующего

при перерывах в контроле изделий более 10 мин. Автоматическое включение электродвигателя производится при поступлении сигнала с Д1.

Технические характеристики АКК «ВИТОК».

1. Диаметр контролируемого изделия, мм..... $9,1^{+0,08}_{-0,05}$
2. Вероятность выявления искусственных дефектов глубиной 0,05 мм:
 - продольной риски протяженностью 3 мм с углом раскрытия 60° ,
не менее.....0,95;
 - поперечной риски протяженностью 3 мм с углом раскрытия 60° ,
не менее.....0,95;
 - сферической вмятины радиусом 10 мм, не менее.....0,95.
3. Производительность контроля, твэл/час, не менее.....60.
4. Время установления рабочих характеристик установки, мин, не более.....5.

АКК контроля дефектов внешнего вида твэлов реакторов ВВЭР «ВИТОК» после приёмочных испытаний принят в эксплуатацию в технологической линии производства твэлов на ПАО «НЗХК».

5.5.2 Автоматизированный комплекс контроля внешнего вида поверхности твэлов «ПРОФИЛЬ»

После контроля твэлов на вихретоковом АКК «ВИТОК» большая часть твэлов, которая не имеет дефектов внешнего вида, поступает по технологической линии на следующую операцию.

Часть твэлов, которые после проведённого контроля были предварительно отбракованы за счёт наличия у них на наружной поверхности механических дефектов, превышающих допустимый уровень, поступают на оптикоэлектронный АКК «ПРОФИЛЬ». На данном автоматизированном комплексе твэлы проходят контроль участков, координаты которых отмечены на вихретоковом АКК «ВИТОК», на наличие недопустимых дефектов наружной поверхности твэла.

Оптическая интерференционная методика измерения глубины и формы механических дефектов внешнего вида твэлов типа ВВЭР, реализованная в АКК

типа «ПРОФИЛЬ» рассмотрена в разделе 2.3.2 главы настоящей работы. В настоящем разделе рассмотрим конструкцию комплекса, его технические характеристики и режимы работы. Общий вид конструкции АКК «ПРОФИЛЬ» представлен на фотоснимке (рисунок 5.27).



Рисунок 5.27 - Общий вид конструкции АКК «ПРОФИЛЬ»

В состав конструкции АКК «ПРОФИЛЬ» входят компьютер, монитор, блок оптико-механический и блок электронный (на снимке слева-направо). Оптико-механический блок является основным узлом комплекса. В нем на основании смонтирован узел оптического интерферометра, видеокамера, преобразователь линейных перемещений, шаговый двигатель и на передней стенке установлен лоток с фиксатором твэла. Лоток с фиксатором представлен на рисунке 5.28. Контролируемый твэл устанавливается в лоток таким образом, чтобы дефект на поверхности твэла был в поле зрения видеокамеры в измерительном плече оптического интерферометра. Так как координаты дефекта известны то правильная установка твэла в лотке не вызывает больших затруднений. Твэл в лотке

закрепляется специальным фиксатором. После этого начинается процесс измерения глубины и формы дефекта.

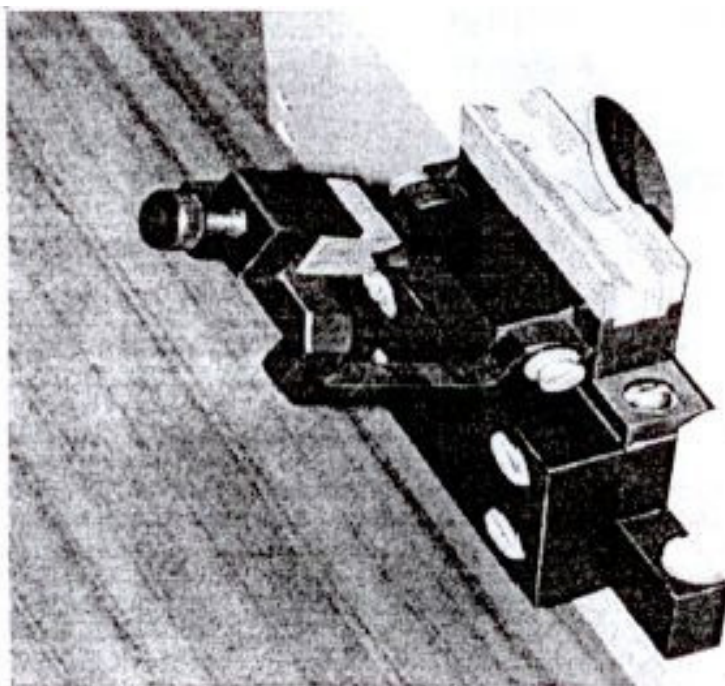


Рисунок 5.28 – Лоток с фиксатором твэла

Интерферометр установлен на оптическом столике, который может перемещаться ближе или дальше от твэла с помощью редуктора, соединённого с шаговым двигателем. Перемещение интерферометра контролируется преобразователем линейных перемещений с погрешностью ± 1 мкм. В процессе сканирования поверхности дефекта, на каждом шаге перемещения интерферометра, полученное видеокамерой типа ТМ 1010 «Pulnix» оцифрованное изображение измеряемой поверхности передаётся в видеопамять граббера типа IMAQ PCI-1422, установленного в слоте шины PCI компьютера. После специальной программной обработки этого изображения измерительный комплекс получает изолинию глубины дефекта, соответствующую текущему шагу сканирования.

Блок электронный смонтирован в корпусе промышленного исполнения модели RACK-220 CHASSIS. Он осуществляет управление блоком оптико-механическим в

соответствии с командами, формируемыми управляющей программой комплекса, которая загружена в компьютер, а также принимает и выполняет команды оператора комплекса. Блок электронный имеет в своём составе: устройство управления осветителем объекта, устройство управления фазовым модулятором, контроллер шагового двигателя, унифицированный преобразователь импульсов, концентратор и источник питания.

АКК «ПРОФИЛЬ» имеет следующие режимы работы: поверка и тестирование, измерение, работа с базой данных, администрирование. Режим поверки и тестирования позволяет оператору убедиться в исправности основных узлов комплекса, а также провести поверку или калибровку измерительного канала комплекса с помощью трех аттестованных калибров в соответствии с программой поверки (калибровки) комплекса. Режим измерение – это основной режим работы комплекса, в результате которой производится измерение глубины механического дефекта оболочки твэла и вывод его объёмного изображения на экран или печать компьютера. Режим работы с базой данных связан с архивированием результатов измерений, статистикой и возможностью получить подробный протокол измерения дефекта. Режим администрирования предназначен для обеспечения конфиденциальности информации, изменения списка пользователей, которые могут изменять исходные данные по контролю, корректировать базу данных результатов контроля.

Технические характеристики АКК «ПРОФИЛЬ»

1. Размер зоны контроля, не менее мм²(2,3·2,3)
2. Диапазон измерения глубины дефектов, мкмот 10 до 200
3. Предел допускаемой абсолютной погрешности, мкм± 5
4. Среднее время измерения одного участка, не более, с..... 15
5. Потребляемая мощность, не более, В·А.....750
6. Среднее время наработки на отказ, не менее, ч.....500
7. Средний срок службы, не менее, лет5

АКК дефектов внешнего вида твэлов типа ВВЭР «ПРОФИЛЬ» успешно внедрён в эксплуатацию в технологическом процессе производства твэлов ВВЭР-1000 на ПАО «НЗХК». АКК «ПРОФИЛЬ» выдержал государственные испытания по определению типа средств измерений и внесён в Госреестр средств измерений под № 24403-03.

В заключение к данной главе необходимо отметить, что автор работы принял также непосредственное участие в разработке и внедрении следующих АКК критических параметров твэлов в технологический процесс производства:

- автоматизированные комплексы контроля давления гелия под оболочкой твэла ВВЭР-1000 типа ДГТ-1 и УЗКД в линиях выходного контроля [20, 29].
- автоматизированные комплексы контроля качества сварных соединений в твэлах ВВЭР-1000 типа АКС-7, АКС-8 [68, 109].
- рентгеновский томограф для контроля сварных швов твэлов реактора ВВЭР-1000 [52, 63].

На этапе эксплуатации данных АКК автор провел методическую работу по обеспечению надежной работы сложных автоматизированных комплексов в условиях их трехсменной работы [110].

Основные перспективы дальнейшего развития АКК критических параметров ядерного топлива связаны с разработкой новых специальных первичных преобразователей (детекторов) излучений, методик и алгоритмов комплексного контроля параметров твэлов и развитием теории взаимодействия проникающих полей с веществом, технических средств вычислительной и микропроцессорной техники, систем управления и локальной автоматики, а также совершенствованием принципов построения АКК.

5.6 Выводы по главе 5

В результате разработки конструкций специальных радиометрических, оптикоэлектронных, вихретоковых первичных преобразователей, дифракционно-оптических элементов, микропроцессорных устройств управления созданы АКК критических параметров ядерного топлива, которые внедрены в эксплуатацию в технологическом процессе производства твэлов. Данные опытные образцы АКК критических параметров твэлов способны осуществлять высокопроизводительный сплошной контроль критических параметров твэлов в технологических линиях производства и встроены в АСУТП производства твэлов:

1. Внедрён автоматизированный комплекс контроля толщины слоёв твэлов промышленного реактора типа МПК-3.
2. Внедрён автоматизированный комплекс контроля сплошности топливного столба твэлов реакторов типа ВВЭР типа КСИГ.
3. Внедрён автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров твэлов типа ВВЭР типа «РАЗМЕР»
4. Внедрён автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000.
5. Внедрён сплошной контроль дефектов внешнего вида твэлов реактора ВВЭР-1000 с помощью автоматизированных комплексов типа «ВИТОК» и «ПРОФИЛЬ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Итоги исследования

1.1. На основе результатов внедрения специальных первичных преобразователей, устройств микропроцессорной, измерительной техники и алгоритмов их функционирования впервые предложены основные принципы построения автоматизированных комплексов контроля критических параметров твэлов и тепловыделяющих сборок для их сплошного контроля в составе технологических линий производства ядерного топлива.

1.2. Разработан алгоритм функционирования системы управления комплексным контролем механических дефектов наружной поверхности твэлов ВВЭР-1000 с совместным использованием разработанных для этой цели вихрековых и оптикоэлектронных первичных преобразователей измерительных каналов.

1.3. Разработаны блок специальных первичных преобразователей с устройством их автоматической регулировки и алгоритм их функционирования в автоматизированной системе управления многоканальным радиометрическим контролем толщины слоев твэлов промышленного реактора.

1.4. Предложены алгоритм функционирования и структурная схема элементов конструкции автоматизированной системы управления контролем сплошности топливного столба твэлов реакторов типа ВВЭР, отличающаяся более высокой надёжностью выявления дефектов сплошности топливного столба.

1.5. Предложены алгоритм функционирования и структурная схема элементов конструкции автоматизированной системы управления контролем геометрических параметров дистанционирующих решёток тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000, отличающаяся использованием дифракционного оптического элемента Дамманна и лазерной измерительной головки.

1.6. Разработан и внедрён в промышленную эксплуатацию автоматизированный комплекс контроля толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэлов промышленного реактора типа МПК-3.

1.7. Внедрены в промышленную эксплуатацию автоматизированные комплексы «ВИТОК» и «ПРОФИЛЬ» для высокопроизводительного контроля дефектов наружной поверхности твэлов реактора ВВЭР-1000.

1.8. Внедрены в промышленную эксплуатацию в составе автоматизированной линии выходного контроля твэлов ВВЭР-1000 АКК геометрических размеров типа «РАЗМЕР», автоматизированный комплекс контроля сплошности топливного столба «КСИГ-12», автоматизированные комплексы контроля давления гелия внутри твэла типа ДГТ-1 и УЗКД.

1.9. Внедрён в промышленную эксплуатацию автоматизированный комплекс контроля дистанционирующих решёток ТВС реактора ВВЭР-1000 типа «РЕШЁТКА».

1.10. Внедрён в промышленную эксплуатацию рентгеновский томограф для контроля сварных швов твэлов ВВЭР-1000.

1.11. АКК типов «РАЗМЕР», «ПРОФИЛЬ» и рентгеновский томограф контроля сварных швов прошли государственные испытания определения типа измерений и внесены в Госреестр средств измерений РФ.

1.12. АКК «МПК-3», «РЕШЁТКА», «КСИГ-12», «ВИТОК» и «ПРОФИЛЬ» защищены патентами РФ на изобретение.

1.13. В результате внедрения АКК критических параметров твэлов в технологический процесс производства ядерного топлива на ПАО «НЗХК» осуществлен сплошной контроль критических параметров твэлов ВВЭР-1000 и получен экономический эффект, в котором личный вклад автора составляет 50 миллионов. рублей.

2. Рекомендации

2.1 Внедрение АКК геометрических параметров твэлов и ТВС реактора ВВЭР-1000 типа «РАЗМЕР» и РЕШЁТКА» показало эффективность измерения геометрических размеров в реальном времени с помощью различных оптоэлектронных первичных преобразователей, дифракционных элементов, устройств лазерной и микропроцессорной техники, что дает возможность уйти от альтернативного контроля критических геометрических параметров. Это позволяет иметь полный паспорт ТВС с действительными размерами и предоставляет возможность проводить более точный расчет активной зоны реактора. Данный опыт можно использовать при выпуске твэлов и ТВС для других типов реакторов.

2.2. Внедрение АКК контроля дефектов внешнего вида твэлов ВВЭР-1000 типа «ВИТОК» и «ПРОФИЛЬ» обеспечивает их сплошной контроль, что значительно повышает безопасность эксплуатации твэлов в реакторе. Целесообразно внедрить такой комплексный контроль и на предприятии, которое выпускает циркониевые трубы для изготовления твэлов.

3. Перспективы дальнейшей разработки темы

3.1. В настоящее время РОСАТОМ проводит перспективную работу по подготовке производства твэлов на основе МОХ-топлива, когда для изготовления топливных таблеток используют смесь оксидов плутония и урана. При выпуске твэлов с МОХ-топливом для контроля их качества можно использовать АКК «РАЗМЕР», «РЕШЁТКА», «ВИТОК», «ПРОФИЛЬ» и «КСИГ-12», после дополнительной проработки их элементов конструкции и алгоритмов функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штань А.С. Методы и средства неразрушающего контроля при производстве твэлов и ТВС АЭС.- Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия «Радиационная техника», 1984, вып. 1 (27), с. 3–8.
2. Штань А.С. Развитие методов и средств контроля качества твэлов АЭС. – ВАНТ. Сер. «Радиационная техника», 1987, вып. 1 (34), с. 3–5.
3. Franklin D., Noble D., Machiels A. e.a. – Advances in light water reactor fuels. – Trans. ANS, 1987, v.55, p. 255 – 257.
4. Афанасьев В.Н., Беспярых А.С., Силецкая М.А. и др. Формирование модульной базы агрегатного комплекса средств контроля твэлов АЭС. – ВАНТ. Сер. «Радиационная техника», 1987, вып. 1 (34) с. 6– 8.
5. Штань А.С., Афанасьев В.Н. Агрегатный комплекс средств промышленного контроля твэлов АЭС. – ВАНТ. Сер. «Радиационная техника» , 1985, вып.2(30), с. 148 – 159.
6. Технические условия на твэл 0401.36.04.000ТУ.
7. I.I.Loktev, A.V..Strukov, Y.K.Karlov, e.a.. Nuclear fuel with elevated characteristics be fabricated efficient process – Proceedings of Topfuel 2012, Manchester, UK, September, 02–06, 2012.
8. Cohen P. Water Coolant Technology of Power Reactors, ANS, 1985.
9. Semenov B.A. Nuclear Power in Soviet Union, IAEA Bulletin, Vol.25, No. 2, p. 47-59, 1983.
10. Доллежалъ Н.А. Графитовый пароводный энергетический реактор в СССР, Атомная энергия т.5 , вып.20 , с. 385-390, 1981.
11. Габараев Б.А., Лопаткин А.В., Третьяков И.Т. и др. Исследовательские реактора – взгляд в будущее. Атомная энергия, т.103, вып.1, с. 70-72, 2007.
12. Власов В.А., Тихомиров И.А., Локтев И.И. Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции. Издательство ТПУ, Томск, 2006.

13. Карлов Ю.К., Рожков В.В., Шерашов С.А. и др. Способ контроля сплошности топливного столба твэлов. Патент РФ № 2172529 от 20.10. 1999.
14. Карлов Ю.К., Макаров В.И., Рожков В.В., и др. Устройство контроля сплошности топливного столба. Патент РФ № 2222063 13.12.2001.
15. Karlov Y.K . Makarov V.I., Rozhkov V.V., e.a. Radiation control of fuel stack contiuty. – Proceedings of the 8th European Conference on Non Destructive Testing, Barselona, June, 17–21, 2002.
16. Бушуев А.В. Методы измерения ядерных материалов. МИФИ, Москва, 2001.
17. Жуков Ю.А., Петров А.Н., Батуев В.И. и др. Устройство ультразвукового контроля линии. Патент РФ № 218103 20.01.2004.
18. Ермолов И.Н., Останин Ю.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. Высшая школа, Москва, 1988.
19. Лавренюк П.И., Карлов Ю.К., Чугуй Ю.В. и др. Современные оптические и рентгеновские системы контроля изделий атомной промышленности. Атомная энергия, 1998г., т.85, вып.5, с. 416-419.
20. Карлов Ю.К., Кулешов В.К. Неразрушающий контроль давления гелия в твэлах для реактора типа ВВЭР. Приборы, 2013, №10(160) с. 26-32.
21. Карлов Ю.К., Макаров В.И., Рожков В.В. и др. Способ контроля наружной поверхности тепловыделяющего элемента. Патент РФ № 2235999, 05.08. 2002.
22. Карлов Ю.К., Козлов С.И., Яковлев В.Н. и др. Расчёт коэффициента неравномерности топливного слоя твэлов атомных реакторов. Технический прогресс в атомной промышленности. Серия «ТВЭЛЫ», 1985, вып.1(8), с. 82-84.
23. Карлов Ю.К., Жуков Ю.А., Исаков В.Б. и др. Автоматизация проверки метрологической исправности систем неразрушающего контроля. ВАНТ. Серия «Радиационная техника», 1987, вып.1(34), с. 45-46.
24. Карлов Ю.К. Применение кремниевых полупроводниковых детекторов для измерения толщины герметизирующих оболочек твэлов. Технический прогресс в атомной промышленности. Серия «ТВЭЛЫ», 1984г., вып.3(6), с. 84.
25. Карлов Ю.К., Абиралов Н.К., Горбуль Б.Н. Устройство для измерения

толщины ТВЭЛОВ. Патент РФ № 2069838, 25.04.1994.

26. Карлов Ю.К., Горбуль Б.Н. Автоматизированный комплекс контроля твэлов. Технический прогресс в атомной промышленности. Серия «Твэлостроение», 1988, вып.2(22), с. 105-107.

27. Карлов Ю.К., Алещенко А.А., Горбуль Б.Н. и др. Устройство контроля толщины внутренней оболочки ТВЭЛОВ. Патент РФ № 2079172, 31.01.1994.

28. НП 082-07 Правила ядерной безопасности реакторных установок.

29. Жуков Ю.А., Карлов Ю.К., Рожков В.В. Создание и внедрение комплексов неразрушающего контроля ядерного топлива для реакторов различного назначения. ВАНТ Серия Техническая физика и автоматизация, 2005, вып.59, часть 2, с. 94-96.

30. Karlov Y.K., Zhukov Y.A. , Rozhkov V.V.. Non destructive test means at NCCP inc. during nuclear fuel fabrication for multipurpose reactors. – Proceedings of the 15th World Conference on Non Destructive Testing, .Roma, October, 15–20, 2000.

31. Райли Д., Смит Х. и др. Пассивный неразрушающий контроль ядерных материалов. Москва, БИНОМ, 2000.

32. Фролов В.В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. Москва, Энергоатомиздат, 1989.

33. Горский В.В. Неразрушающий контроль при производстве твэлов для PWR в Испании. Атомная техника за рубежом. №8, 1999. с. 16-21.

34. Yu.V. Chugui. “Information, optical and laser technologies”– Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, № 4, pp. 1-13, 1997.

35. V.V. Vertoprakhov, V.V. Krikliiviy. “The multipoint structured light method for 3D measurements: algorithms and application”. - Proceeding of 6-th ISMQC IMEKO Symposium “Metrology for Quality Control in Production” (Vienne, Austria, 8-10 September), pp. 681-687, 1998.

36. H.Damman, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, Korolkov et al. “Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure” – Appl. Opt., 38 pp. 1295-1301, 1999.

37. Сысоев Е.В., Голубев И.В., Чугуй Ю.В., Шахматов В.А. Оптические интерференционные технологии, элементы и системы.- Автометрия, 2004, т.40, №5, с. 7-13.

38. Пастушин В.В., Новиков А.Ю., Демидов А.А., Демидов Д.А. и др. Теплофизическая автоматизированная система неразрушающего контроля давления газа в твэлах энергетических ядерных реакторов.- Контроль. Диагностика. 1998, №4, с. 27-31.

39. Пастушин В.В., Новиков А.Ю., Зеленчук А.В., Бибилашвили Ю.К. Теплофизические средства неразрушающего исследования герметичности и параметров газа в твэлах реакторов - Атомная энергия , 1996 , 80 (1), с. 20-26.

40. Кузелев Н.Р. «Неразрушающий контроль и оперативная диагностика в атомной отрасли ». Новые промышленные технологии , 2004, №2, с. 11.

41. Markgraf J.F.W., e.a. “Non-destructive determination of fission gas release in ramplested LWR fuel rods” In: Post Irradiation Examination and Experience, IAEA, Vienna, 1985, pp. 241-254.

42. Горский В.В. Применение гадолия в легководных реакторах.- Атомная техника за рубежом, 1987, №3, с. 3-11.

43. Горский В.В. Уран-гадолиниевое оксидное топливо. Неразрушающий контроль содержания Gd_2O_3 в твэлах с таблетками (U , Gd) O_2 - Атомная техника за рубежом , 1990, №1 стр. 3-8.

44. A. Domingo, J.M. Jimenez, J.I. Ortiz – ENUSA, Spain. Elektromagnetic and Gamma Scanning Inspection of Nuclear Fuel Rods at ENUSA . – Proceedings of the 7th European Conference on Non Destructive Testing, Copenhagen, May, 26–29 мая 1998.

45. Карлов Ю.К. Экспериментальные исследования опытных систем неразрушающего контроля оксида гадолия в снаряжённом твэге. – Доклад на 1-й конференции SibTest « Инновации в неразрушающем контроле», Алтай, 25-28 июля 2011.

46. Никитенко Н.Ф., Кукса Н.Н., Штань А.С., Виниченко П.Г. Комбинированный оптико-электромагнитный дефектоскоп для обнаружения

дефектов поверхности твэлов. – ВАНТ. Серия Радиационная техника, 1987, вып. 1(34), с. 35-40.

47. Сухоруков В.В. ИНТРОН-ПЛЮС 25 лет на рынке НК, полёт нормальный. – В мире неразрушающего контроля №4(62), 2013, с. 38-39.

48. Таточенко А.К. “Радиоактивные изотопы в приборостроении”. Атомиздат. 1960.

49. Шумиловский И.И., Мельтцер Л.З. “Основы теории устройств автоматического контроля с использованием радиоактивных изотопов”. АН СССР. 1959.

50. Штейнбок Н.И. “Применение радиоактивных излучений в измерительной технике”. Машгиз. 1960.

51. Верховский Б.И. “Применение радиоактивных изотопов для контроля производственных процессов”. АН СССР. 1959.

52. Жуков Ю.А., Карлов Ю.К., Обидин Ю.В. и др. Компьютерная панорамная томография промышленного применения. Дефектоскопия, №9, 2008.

53. Ермолаев Б.И. “Обратное рассеяние бета-излучения и его использование в контрольно-измерительной аппаратуре”. ВИНТИ. 1958.

54. Давлетчин И.И., Машинин В.А., Правиков А.А. Радиационная техника, Атомиздат, 1967, вып.1, с. 114–157.

55. Булатов Б.П. и др. “Альбедо гамма-излучения”. Атомиздат. 1968.

56. Сторм Э., Исраэль Х. “Сечения взаимодействия гамма-излучения”. Атомиздат. 1973.

57. Von Albert Ott “Neue Erkenntnis bei radiometrischen Messung von Schichtdicken”//Chem. Ing. Techn. v.46, №19. 1974, pp. 48–57.

58. Von Albert Ott “Schichtdicken während des Schichtaufbaues und Messung der Abscheidegeschwindigkeit”//Chem. Ing. Techn. v.46, №19. 1974, pp. 64-70.

59. Правиков А.А. “Радиационная техника”, вып.1, Атомиздат. 1967, с. 157–161.

60. Вартанов Н.А., Самойлов П.С. Прикладная сцинтилляционная гамма-спектрометрия. Москва, Атомиздат, 1969.

61. Балдин С.А., Вартанов Н.А., Матвеев В.В. и др. Прикладная спектрометрия с полупроводниковыми детекторами. Москва, Атомиздат, 1974, 320с.
62. Васильева Э.Ю., Майоров А.Н. Применение ЭВМ-томографии для контроля твэлов. Атомная энергия, 1979, вып.46, №6, с. 403-406.
63. Воробьев В.В., Карлов Ю.К., Обидин Ю.В. и др. Рентгеновская томографическая станция контроля сварных соединений ТВЭЛов. Датчики и системы. №2, 1999, с. 6-9.
64. Клемпнер К.С., Чередниченко И.М. Вероятностный анализ при проектировании радиоизотопных приборов. Москва, Атомиздат, 1971.
65. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. Москва, Атомиздат, 1974.
66. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. Москва, Металлургия, 1985.
67. Пронякин В.Т., Рыбаков Н.К., Панченко Ю.Н. Ультразвуковая дефектометрия сварных соединений тонкостенных изделий. Дефектоскопия, 1999, №5, с. 18-22.
68. Александров А.Б., Жуков Ю.А., Васюков В.Н., Грузман И.С., Карлов Ю.К., Спектор А.А. Автоматическое обнаружение непроваров и газовых пар при ультразвуковом контроле сварных швов циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов. Дефектоскопия, 2004, №4, с. 20-27.
69. Марков А.А., Захарова О.Ф., Мосягин В.В. Применение развертки типа «В» для обнаружения трещин в зоне отверстий болтовых стыков железнодорожных рельсов. Дефектоскопия, 1999, №6, с. 78-92.
70. Павлов С.В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследования облучённого топлива ядерных реакторов. Димитровград, ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013.
71. Аблеев А.Н., Ануфриев Б.Ф., Халфин Т.М. Автоматизированная система контроля давления и состава газа в твэлах ядерных реакторов. Москва, Юбилейный сборник трудов МИФИ, 2002, с. 73-74.
72. Богомоллов Е.Н., Зенкова Д.Ф., Карлов Ю.К., Чугуй Ю.В. и др. Оптико-цифровые системы контроля геометрических размеров длинномерных оболочек твэлов. ВАНТ Серия Радиационная техника, вып.1(34), 1987, с. 33-39.

73. Белоглазова В.А., Битюцкий О.И., Гущина А.А., Карлов Ю.К., Кривенков Б.Е. и др. Оптико-электронное устройство бесконтактного контроля геометрических параметров ТВЭЛ. Автометрия, т.40, №2, 2004, с. 82-93.
74. Карлов Ю.К., Кулешов В.К. Комплексный контроль дефектов внешнего вида твэлов ВВЭР-1000. Приборы, №10(160), 2013, с. 21-25.
75. .Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.3. Электромагнитный контроль. Практическое пособие под редакцией В.В. Сухорукова. Москва, Высшая школа, 1992, 321с.
76. Незарушающий контроль. В 5 кн. Кн.4. Контроль излучениями. Практическое пособие под редакцией В.В. Сухорукова. Москва, Высшая школа, 1992, 321с.
77. Карлов Ю.К., Кулешов В.К. Незарушающий контроль давления гелия в твэлах для реактора типа ВВЭР. Приборы, 2013, №10, с. 26-32.
78. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин В.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов.- Москва, Энергоатомиздат, 1996.
79. Острейковский В.А. Теория систем.- Москва, Высшая школа, 1997.
80. Окунев Ю.Б., Плотников В.Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи.- Москва, Связь, 1976, 184с.
81. Рейнгольд Л.Д. Структурирование информации. Системный подход. - Москва, Наука, 2004, 200с.
82. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем.- Москва, Мысль, 1978.
83. Bertalanffy L. von. A General System Theory- A Critical Review// General System. Vol.VII. 1962, p. 1-20.
84. Фишер Дж., Гетланд Х. Электроника - от теории к практике.- Москва, Энергия, 1980, 400с.
85. Незарушающий контроль. Справочник в 8т. под общей редакцией В.В.Клюева, т.3 И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге – Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение, 2006, 864с.

86. Неразрушающий контроль. Справочник в 8т. под общей редакцией В.В.Клюева, т.5, кн.1 В.П. Вавилов – Тепловой контроль. Москва, Машиностроение, 2006, 679с.
87. CAMAC. A Modular Instrumentation System for Data Handling. EUR-4100. 1972.
88. Ядерное приборостроение. Вып.26. Атомиздат. 1974.
89. Карлов Ю.К. Разработка измерительного комплекса для твэлов ВВР-МЗ, ВВР-М5 - В сб. докладов 2-й отраслевой конференции по унификации научно-исследовательских твэлов. 1981, с. 32-34.
90. Битюцкий О.И., Вертопрахов В.В., Гушина А.А., Карлов Ю.К. и др. Трёхмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решёток ядерных реакторов. Автометрия, т.39, №5, 2003, с. 4–19.
91. Завьялов П.С., Зарубин М.Г., Карлов Ю.К. и др. Устройство для контроля дистанционирующих решёток. Патент РФ № 2334944 от 17.07. 2006.
92. Ярута С.П., Усачёв П.А. Принципы создания адаптивного контроля технологических процессов для станков с ЧПУ.- Современные научные исследования и инновации. №4, 2012, с. 12-16.
93. Donahue E.J. Applications of adaptive control in the aerospace industry.- SME Paper MS76.274.
94. Терехов В.А., Антонов В.Н., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах.- Москва, Наука, 1981, 384с.
95. Шевчук В.П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем.- Москва. Физматлит, 2011, 320с.
96. Бородин И.Ф., Кириллин Н.И. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов.- Москва. Колос, 1977.
97. Пугачев А.В. Чувствительность радиоизотопных способов контроля. Москва, Атомиздат, 1976.

98. Кимель Р.Н., Машкович В.П. Защита от ионизирующего излучения. Москва, Атомиздат, 1972 , 312с.
99. Кононов Б.А. Дефектоскопия быстрыми электронами. Москва, Атомиздат. 1979, 80с.
100. Румянцев С.В., Парнасов В.С. Применение бета-толщиномеров покрытий в промышленности. Москва, Атомиздат. 1980.
101. Крейндли И.И. и др. Радиационная техника, вып. №13, Атомиздат, 1976 , с. 100-109.
102. Шепке Р., Померны Б. Измеритель толщины покрытий. Патент ПНР №327703. 1973.
103. Асосков А.Д., Кохов Е.Д. и др. Разработка метода и аппаратуры для контроля сплошности столба топлива в ТВЭЛах.- ВАНТ. Серия: Радиационная техника. Вып. 1(27), 1984, с. 69-73.
104. Богомоллов Е.Н., Василец Н.В., Кривенков Б.Е., Чугуй Ю.В. и др. Фотодиодный оптикоэлектронный измеритель размеров «Сенсор»- Автометрия, № 5, 1989, с. 83–91.
105. Горский В.В. Неразрушающий контроль содержания делящихся материалов и гадолиния в твэлах LWR – Атомная техника за рубежом, 1983, №9, с. 3–9.
106. ГОСТ 8.009-84 Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений.
107. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений.
108. Гущина А.А, Завьялов П.С., Карлов Ю.К., Чугуй Ю.В. и др. Внедрение контрольно-измерительных систем «РАЗМЕР-06» и «РЕШЁТКА-Н» в ОАО «НЗХК». Система контроля геометрических размеров твэла «РАЗМЕР»-06 – Доклад на научно-технической конференции ОАО «ТВЭЛ» (НТК 2010) Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты, разработки, опыт эксплуатации и направления развития. ОАО « ВНИИНМ» г. Москва, 17-19 ноября 2010.

109. Абиралов Н.К., Вихрюк С.И., Голубцова Л.М., Карлов Ю.К. и др. Способ контроля качества сварных швов тепловыделяющего элемента. Патент РФ №2234150 по заявке № 2002114875 от 05.06.2002.

110. Карлов Ю.К., Кулешов В.К., Шумихин В.Ф. Организация службы неразрушающего контроля качества. – Томск, Издательство Томского политехнического университета, 2017, 222 с.



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД
ХИМКОНЦЕНТРАТОВ»

Россия 630110, г. Новосибирск, улица Б. Хмельницкого, дом 94
телефон: (383) 274-81-54, 274-83-46 / факс: (383) 274-30-71
E-mail: nzhk@nccp.ru. / www.nccp.ru

26.04.2013 21/59-31/ *3728*

СПРАВКА

В технологическом процессе производства цехов № 1, № 3, № 10 ОАО «НЗХК» были внедрены изобретения по патентам, где соавтором является Карлов Юрий Кимович:

1. «Устройство для измерения толщины слоёв твэлов», п. № 206 9328 от 25.04.94г.;
2. «Устройство для измерения толщины внутренней оболочки твэлов», п. № 2079172 от 31.01.94г.;
3. «Способ контроля сплошности топливного столба твэла», п. № 2172579 от 20.10.99;
4. «Способ прокатки и термообработки слитков из урана», п. № 2210441 от 02.04. 2001г.;
5. «Способ контроля качества сварных соединений тепловыделяющего элемента», п. № 2234150 от 05.06.2002г.;
6. «Способ контроля наружной поверхности тепловыделяющего элемента», п. № 2235999 от 05.02.2002г.;
7. «Автоматизированная установка для ультразвукового контроля изделий», п. № 2187104 от 07.07. 99г.;
8. «Устройство контроля дистанционирующих решёток», п. № 2334944 от 17.07.06г.

В результате внедрения данных изобретений получен экономический эффект в размере 50 млн. рублей (личный вклад соавтора).

И.о. заместителя генерального директора
по развитию и инновациям



26.04.13

А.В.Струков

Ведущий инженер по патентной
и изобретательской работе

[Signature]

25.04.2013

Е.А. Гурьянова



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД
ХИМКОНЦЕНТРАТОВ»

Россия 630110, г. Новосибирск, улица Б. Хмельницкого, дом 94
телефон: (383) 274-81-54, 274-83-46; факс: (383) 274-30-71
E-mail: n3k@n3k.ru / www.n3k.ru

от 06.03.2018 № 21/55-22/6059-БК

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ПАО «НЗХК»

А.В. Жиганкин

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Карлова Юрия Киновича

На Новосибирском заводе Химконцентратов в период с 1986 года по 2010 год в технологический процесс производства для обеспечения выходного контроля готовой продукции были внедрены в промышленную эксплуатацию следующие автоматизированные комплексы:

1. В цехе №1

- автоматизированный комплекс многоканального контроля толщины оболочек и неравномерности поверхностной плотности топливного слоя твэлов типа «МПК-3»;
- автоматизированный комплекс контроля геометрии твэлов типа «БЛИК».

2. В цехе № 10

- автоматизированный комплекс контроля сплошности топливного столба твэлов типа «КСИГ-12»;
- автоматизированный комплекс контроля геометрических размеров твэла типа «РАЗМЕР-06»;
- автоматизированный комплекс контроля дефектов внешнего вида твэла типа «ВИТОК»;
- автоматизированный комплекс контроля глубины механических дефектов наружной поверхности твэла типа «ПРОФИЛЬ»;
- автоматизированный комплекс контроля давления гелия под оболочкой твэла типа «ДГТ-1»;
- автоматизированные комплексы контроля качества сварных швов твэла типа АКС-7 и АКС-8;
- рентгеновская томографическая станция контроля сварных швов;
- автоматизированный комплекс контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток типа «РЕШЕТКА».

3. Автоматизированные комплексы указанных типов внедрены в эксплуатацию на основании решений приборных комиссий в соответствии с требованиями СТП-117 Системы менеджмента качества ПАО «НЗХК».

Заместитель генерального директора –
главный инженер ПАО «НЗХК»

С.А. Буймов



«УТВЕРЖДАЮ»



директор департамента образования
Государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

д.т.н., профессор

Троян П.Е.

«12» 12 2018 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
докторской диссертации Карлова Ю.К.

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Телевидение и управление», д.т.н., с.н.с. Газизов Т.Р., доцент кафедры «Телевидение и управление», руководитель магистерской программы «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе» к.т.н. Куксенко С.П., настоящим актом подтверждаем внедрение результатов исследований по докторской диссертации Карлова Ю.К. в учебный процесс радиотехнического факультета ТУСУРа магистерской программы «Электромагнитная совместимость в топливно-энергетическом комплексе».

Методики, алгоритмы, элементы и устройства комплексов для контроля параметров твэлов, с учетом анализа специфики объектов атомного комплекса и проблемы обеспечения электромагнитной совместимости, использованы в лекциях по дисциплине «Электромагнитная совместимость оборудования атомных электростанций» для магистрантов групп 117-М2, 118-М2.

Лекции и практический опыт автора работы позволили более качественному освоению компетенций магистерской программы.

Заведующий кафедрой

«Телевидение и управление», д.т.н., с.н.с.

Т.Р. Газизов

Доцент кафедры

«Телевидение и управление», к.т.н.

С.П. Куксенко

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор ТУСУРа
 по научной работе и инновациям
 Кандидат В.М. Рулевский
 01 2019 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
 Карлова Юрия Кимовича

Комиссия в составе:

руководителя проекта ФЦП 34/17, г.н.с. Научно-исследовательской
 лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость
 радиоэлектронных средств» (НИЛ «БЭМС РЭС»), д.т.н., доц. Т.Р. Газизова,
 ответственного исполнителя проекта ФЦП 34/17, заведующего НИЛ
 «БЭМС РЭС», д.т.н., доц. А.М. Заболоцкого,
 руководителя направления проекта ФЦП 34/17, с.н.с. НИЛ
 «БЭМС РЭС», к.т.н. С.П. Куксенко

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в ходе
 выполнения в ТУСУРе для АО «Информационные спутниковые системы»
 имени академика М.Ф. Решетнева» проекта ФЦП 34/17 «Теоретические и
 экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети
 высоковольтного электропитания для космических аппаратов»,
 выполняемого в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и
 разработки по приоритетным направлениям развития научно-
 технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о
 предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0172, следующих
 результатов диссертационной работы Карлова Ю.К.:

1. Алгоритм для реализации метрологической устойчивости в
 автоматизированном комплексе неразрушающего контроля толщин оболочек
 и поверхностного слоя. Этот результат отражен в пп. 1.1.2 тома 1 отчета по
 этапу 1 (за 2017 г.) о прикладных научных исследованиях указанного
 проекта. Результаты позволили выбрать и обосновать направления
 исследований по мониторингу параметров оптимальной сети
 высоковольтного электропитания космических аппаратов.

2. Технические решения по неразрушающему контролю
 (томографические методы измерения, ультразвуковые методы контроля,
 теневой метод ультразвукового контроля). Эти результаты отражены в п. 9.4
 отчета по этапу 2 (за 2018 г.) о прикладных научных исследованиях
 указанного проекта. Результаты позволили предложить пути надлежащего
 контроля качества и параметров силовой шины электропитания
 космического аппарата.

 Т.Р. Газизов  А.М. Заболоцкий  С.П. Куксенко