

На правах рукописи



Вашук Сергей Петрович

**РАЗРАБОТКА ГЕРМЕТИЧНЫХ ВВОДОВ КОНТРОЛЬНЫХ
КАБЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность: 05.09.02 – Электротехнические материалы
и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Томск – 2014

Работа выполнена в лаборатории космического материаловедения научно-образовательного центра Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Амурский государственный университет»

Научный руководитель: Костюков Николай Сергеевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Михайлов Михаил Михайлович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
радиационного и космического
материаловедения
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Лапин Алексей Николаевич,
кандидат технических наук, ведущий
специалист научно-технического отдела
ЗАО Научно-производственная фирма
«Микран», г. Томск

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет»

Защита состоится «25» июня 2014 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу:
643050, г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ и на сайте
<http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «21» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10
д.ф.-м.н., профессор

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Экономическая потребность в относительно недорогой электроэнергии в России, а также за рубежом в настоящее время постоянно увеличивается.

В связи с этим строительство новых атомных станций, как одного из основных источников энергии является приоритетным в России. В настоящее время в Российской Федерации работает 31 блок АЭС общей мощностью 23242 МВт.

Одним из важнейших элементов в системе управления ядерным реактором являются герметичные вводы контрольных кабелей.

Актуальным является разработка теоретических моделей, методик и конструкций устройств герметичных кабельных вводов, отличающихся повышенной надежностью, отвечающим всем современным критериям безопасности. Многочисленными исследованиями показано, что это может быть достигнуто с помощью создания изделий, состоящих только из неорганических материалов.

В диссертации представлены разработки конструкций герметичных вводов контрольных кабелей на основе металлокерамических модулей, с применением кабелей с минеральной изоляцией и с металлической оболочкой. В устройстве герметичного ввода контрольных кабелей отсутствуют полимерные материалы, что придает повышенную надежность в аварийных ситуациях. Металлокерамическая основа обеспечивает защиту во время пожара и повышенного уровня радиации.

Таким образом, в настоящее время, в связи с повышением уровня требований к безопасности атомных станций, разработка герметичных вводов контрольных кабелей повышенной надежности является актуальной.

Цель диссертационной работы

Целью диссертации является разработка герметичных вводов контрольных кабелей повышенной надежности для атомных электростанций, обеспечиваемой применением в изделиях только неорганических радиационно стойких, огнестойких материалов и кабелей с металлической оболочкой и минеральной изоляцией.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить научную литературу по вопросам герметичных кабельных вводов, материалов и комплектующих для них.
2. Исследовать и подобрать материалы и комплектующие, обеспечивающие надежность изделия.
3. Разработать концепцию конструкции контрольных герметичных кабельных вводов металлокерамического исполнения.
4. Создать методики экспериментальных измерений и теоретических расчетов кабелей с минеральной изоляцией, применяемых в конструкции контрольных гермовводов.
5. Разработать методику и провести испытания гермовводов контрольных кабелей в режимах большой и малой аварии.

Объект исследования

Герметичные контрольные кабельные вводы.

Основная идея работы заключалась в разработке герметичных вводов контрольных кабелей повышенной надежности, состоящих только из металлокерамических элементов и кабелей с металлической оболочкой и минеральной изоляцией. Повышенная надежность изделия достигается за счет использования в конструкции материалов с высокой радиационной и огневой стойкостью.

Научная новизна работы

1. Впервые предложена разработка герметичных контрольных кабельных вводов повышенной надежности, имеющих металлокерамическую основу, кабели с металлической оболочкой и минеральной изоляцией. В разработке применены авторских свидетельства и патенты диссертанта.

2. Впервые разработана и апробирована методика испытания контрольных гермовводов в режимах большой и малой аварии, построенная на принципе одновременного комплексного воздействия на изделие всех основных факторов аварийной среды – повышенного давления, паровоздушной смеси, дезактивирующих растворов, повышенной температуры и радиации.

Практическая значимость

Спроектированы, изготовлены и испытаны опытные образцы герметичных вводов контрольных кабелей типа ВГКК, на которые выпущены отраслевые технические условия. Проект принят межведомственной комиссией из представителей федеральных министерств и ведомств и принят в производство в НПО «Красная Звезда» (протокол прилагается к диссертационной работе).

Показана высокая эффективность предложенной методики испытаний в режимах большой и малой аварий, которая учитывает одновременное комплексное воздействие всех основных факторов аварийной среды.

Созданные конструкции герметичных вводов контрольных кабелей повышенной надежности позволяют значительно увеличить уровень безопасности на атомных электростанциях за счет полного исключения из их состава полимерных материалов и применения жаростойких и радиационно стойких кабелей с минеральной изоляцией и металлической оболочкой.

Кроме использования данных конструкций для герметичного ввода контрольных кабелей в защитную оболочку атомных станций с реакторами ВВЭР, разработанные устройства могут быть предложены к применению и для ввода в любые герметичные объемы: на космических станциях, космических аппаратах, морских судах и др.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Герметичные контрольные кабельные вводы повышенной надежности конструируются из металлокерамики с применением кабелей с металлической оболочкой и минеральной изоляцией.

2. Методика испытаний гермовводов в режимах большой и малой аварий должна строиться на принципе одновременного воздействия на изделие всех основных факторов аварийной среды – повышенного давления, паровоздушной смеси, дезактивирующих растворов, повышенной температуры и радиации.

Личный вклад автора

Автору диссертационной работы принадлежит ведущая роль в выборе направления исследования, он лично разработал концепции конструкций гермовводов контрольных кабелей с минеральной изоляцией, технологию сборки и изготовления гермовводов, провел основные испытания опытных образцов герметичных вводов ВГКК, в том числе в режимах большой и малой аварии и на пожар; диссертант лично провел анализ и обобщение результатов. Основные результаты концепции конструкций контрольных гермовводов, основанной на применении металлокерамических модулей и кабелей с минеральной изоляцией и металлической оболочкой, изложенные в диссертации, получены лично автором.

Таким образом, вклад автора является определяющим и заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования: от постановки задач, их экспериментальной, теоретической и практиче-

ской реализации до обсуждения результатов в научных публикациях и докладах и их внедрения в производство.

Коллективом авторов получены авторские свидетельства на изобретения и патенты [7, 8, 9, 10, 11] по конструкциям гермовводов, в создании которых автор диссертации принимал непосредственное участие в качестве соавтора.

Апробация работы

Результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на: Третьей международной школе – симпозиуме «Физика и химия твердого тела», Благовещенск, ДВО АН СССР, 1991; Четвертой международной школе – симпозиуме «Физика и химия твердого тела», Благовещенск, АНЦ ДВО РАН, 1994; Пятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», Благовещенск, 2008; Международном Конгрессе «Атомэкспо 2010», Москва, 2010; Международной конференции поставщиков атомной отрасли «Атомэксп 2010», Москва, 2010; на открытом научном семинаре НОЦ АмГУ, Благовещенск, 2013; Второй Международной научно-практической конференции «Россия и Китай: новый вектор развития социально-экономического сотрудничества», Благовещенск, 2013.

Публикации

Результаты диссертации изложены в 18 основных печатных работах, в том числе: 1 препринт [1], 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ [2, 3], 3 статьи в материалах общероссийских международных конференций [4, 5, 6], 5 авторских свидетельств и патентов на изобретения [7, 8, 9, 10, 11], 3 статьи в сборниках международных школ симпозиумов [13, 14, 16].

Объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Основной текст диссертации изложен на 112 страницах, работа проиллюстрирована 27 рисунками и 13 таблицами. Список литературы состоит из 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, сформированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Развитие представлений о герметичных кабельных вводах для атомных станций» обобщен отечественный и зарубежный опыт разработок герметичных кабельных вводов.

К настоящему времени сложились три основных направления разработок по герметичным кабельным вводам: на основе полимерных составляющих (фирмы «Конекс», «Окситроль», «Элокс»), на основе керамических составляющих (российские силовые гермовводы ВГУ разработанные в НПО Электрокерамика); с использованием стекла (фирма «Шот»). Показано, что практический опыт использования герметичных кабельных вводов выявил наибольшую надежность изделий, имеющих в своем составе только металлокерамические элементы. Это подтверждается большим положительным опытом эксплуатации силовых герметичных кабельных вводов типа ВГУ, разработанных коллективом ученых московского Института электрокерамики. Обосновывается необходимость разработки аналогичных силовым металлокерамическим гермовводам контрольных гермовводов, имеющих в своем составе только металлокерамические элементы.

Важность выбранного исследования заключается в необходимости разработки контрольных герметичных кабельных вводов, которые за счет применения только радиационно стойких и пожаростойких металлокерамических материалов и кабелей с металлической оболочкой с минеральной изоляцией будут способны выдержать длительное воздействие радиационного излучения, а также предотвратить проникновение пожара через локализирующую систему защитного контура реактора.

Вторая глава «Методика электрических измерений и расчетов электромагнитных параметров контрольных гермовводов ВГКК для АС с применением кабелей марки КМЖ» посвящена обоснованию конструкций герметичных кабельных вводов на базе кабелей марок КМЖ и разработке методик электрических измерений и расчетов электромагнитных параметров кабельной цепи применительно к контрольным гермовводам. Параметры кабелей с минеральной изоляцией сильно отличаются от параметров стандартных кабелей, поэтому необходима методика их расчета, основанная на учете

особенностей конструкции предлагаемых гермовводов. Суть расчетов состоит в том, чтобы рассмотреть возможность применения для контрольных гермовводов кабелей с металлической оболочкой и минеральной изоляцией марки КМЖ, рассчитать в какой степени влияет такая вставка на параметры сигналов кабельных цепей. Волновое сопротивление и затухание в кабелях марки КМЖ отличается от параметров кабелей, подключаемых к гермовводам. Поэтому необходимо было провести измерения электрических характеристик кабелей и рассчитать электромагнитные параметры электрических цепей с применением кабелей КМЖ.

Для расчета электрических параметров отрезков кабелей в гермопроходке, через которые должны передаваться импульсы с коротким фронтом или сигналы при высокой частоте, а также для оценки возможных помех в гермопроходке при передаче таких сигналов необходимо знать емкость кабелей C , тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, волновое сопротивление Z , коэффициент затухания α и относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r .

В кабеле марки КМЖ-7×2,5 в качестве внутренней жилы коаксиального кабеля использовали центральную токопроводящую жилу, а в качестве внешнего провода – 6 наружных проволок, соединенных вместе. Экспериментально показано, что подсоединения 6 жил к оболочке не влияет на результаты измерения всех параметров (по сравнению с измерениями, при которых внешняя оболочка не соединена с 6 жилами). Измерения волнового сопротивления и коэффициента затухания проводятся методом четвертьволновой короткозамкнутой линии [I, II] при частоте 22,4 МГц. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета по экспериментальным данным.

Марка кабеля	C_p , пФ/м	$\operatorname{tg} \delta$	Z , Ом	α , дБ/м	$\epsilon_r^{1/2}$	ϵ_r
КМЖ-1×4	475	0,0008	15	0,012	2,15	4,6
КМЖ-7×2,5	228	0,0016	32	0,0045	2,20	4,8

Для сравнения был произведен теоретический расчет параметров кабеля КМЖ 1х4. Измерения геометрических размеров кабеля следующие: $d=2,2$ мм; $D_e = 3,8$ мм; толщина оболочки $\Delta=0,36$ мм;

электрическое активное сопротивление оболочки $R_{об.}=3,72 \cdot 10^{-3}$ Ом/м.

При подстановке экспериментально измеренных $\varepsilon_r=4,6$ и $\varepsilon_r^{1/2}=2,15$ в формулы получим $C_p=472$ пФ/м, $Z=15,2$ Ом. Таким образом, расчетные параметры соответствуют экспериментально измеренным.

Теоретический расчет затухания α в коаксиальном кабеле производится по формулам [I, II]

$$\alpha = \alpha_m - \alpha_e, \quad (1)$$

$$\alpha_m = \frac{6 (f \cdot \varepsilon_r)^{-1/2} \cdot \left(1 + \frac{D_e}{d}\right) \cdot 10^{-3}}{D_e \cdot \ln \left(\frac{D_e}{d}\right)} \quad (2)$$

$$\alpha_e = 28,8 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_r^{-1/2} \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где α_m – затухания в металлических элементах; α_e – затухание в диэлектрике при $f=22$ МГц.

При подстановке данных для кабеля КМЖ-1×4 получим $\alpha \approx \alpha_m = 0,0083$ дБ/м. Величиной затухания α_e в данном случае можно пренебречь.

В системе электрических соединений для АЭС предусмотрена общая точка заземления экранов кабелей, которая изолирована от защитной оболочки АС и корпусов гермовводов (и внешних проводников-оболочек кабелей КМЖ). Предложено следующее решение, новизна которого оформлена в качестве патента [11]: соединить экраны кабелей с помощью дополнительной жилы в гермопроходке, как показано на рис. 1.

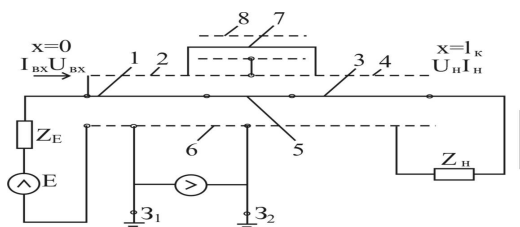


Рис. 1. Общая схема соединений и заземлений для экранированного кабеля

Жилы кабелей 1 и 3 соединяются с помощью жилы 5 отрезка кабеля в гермопроходке. Оболочка кабеля в гермопроходке электрически соединена с корпусом гермопроходки и заземлена в точке 3_2 . Экраны 2 и 4 кабелей соединены в гермопроходке через жилу 7 дополнительного кабеля в гермопроходке; оболочка 8 этого кабеля соединена с корпусом гермопроходки.

Разрабатываются методика расчетов помех в одножильном и двухжильном экранированном кабеле и примеры конкретных расчетов, применительно к разрабатываемой конструкции гермоввода.

В результате расчетов делается вывод: при повышенной частоте напряжение помехи на оболочке кабеля КМЖ будет близким к нулю, так как затухание токов высокой частоты в стальном корпусе гермозоны и гермопроходки очень велико. Поэтому напряжение экранов жил кабелей и общих экранов кабелей при высокой частоте будет близким к нулю и металлическую оболочку кабелей КМЖ можно рассматривать как продолжение экранов кабелей. Следовательно, по высокой частоте более 10 кГц разрыва экранов в гермопроходке не существует.

При промышленной частоте раздельное заземление экранов кабелей через дополнительную жилу в гермопроходке приводит к появлению на нагрузке дополнительного напряжения помехи: для одножильных кабелей не более 0,2 мВ и для двухжильных кабелей – не более 0,01 мВ при напряжении помехи на корпусе гермопроходки 10В. Такой уровень дополнительных помех на несколько порядков ниже уровня передаваемых сигналов и не может влиять на правильное функционирование всей электрической цепи.

Информационные или управляющие сигналы передаются по кабельной цепи из «чистой» зоны в «грязную» или в обратном направлении в виде импульсов с коротким фронтом, а также с применением гармонических колебаний высокой частоты. В этом случае кабельную цепь следует рассматривать как линию с распределенными параметрами. В средней части кабельной цепи в гермопроходке вставлен отрезок кабеля КМЖ-1×4 или КМЖ-7×2,5 длиной 1,5м. При передаче импульсов реализуются симметричные параметры цепи и в гермопроходке используется кабель КМЖ-2×1,5. Необходимо было определить, насколько изменяется общее затухание в кабельной цепи и ее входное сопротивление, если вставить в ее средней части отрезок кабеля КМЖ длиной 1,5м (или 0,8м) без применения устройства для согласования волновых сопротивлений основного кабеля и кабеля КМЖ.

Разрабатывается методика данного расчета применительно к гермовводу с контрольными кабелями типа КМЖ-1×4 или КМЖ-7×2,5. В результате расчетов делаются следующие выводы: При частоте менее 10^6 Гц величина $e^{-\gamma_2 l_2}$ близка к 1, поэтому амплитуда отраженной волны на стенках кабелей будет небольшой и влияние

гермопроходки на общее затухание колебаний линии, и ее входное сопротивление будет невелико, следовательно, в дальнейшем рассмотрим линию без согласующих устройств.

При минимальной величине фронта импульса $1 - 1,5$ мкс допустимо применять для гермопроходки двухжильный кабель марки КМЖ без согласующих устройств по волновому сопротивлению. Этот же вывод справедлив и для схем с применением радиочастотных кабелей при частоте $1 - 1,5$ МГц. При более высоких частотах следует применять системы с согласованием волновых сопротивлений кабелей РК и КМЖ.

Рассматриваются гермопроходки с кабелями КМЖ- 1×4 и КМЖ- $7 \times 2,5$, используемыми как коаксиальные радиочастотные кабели. В случае использования гермопроходки для присоединения к коаксиальным кабелям предлагается следующее решение: при использовании кабеля КМЖ- $7 \times 2,5$ в качестве внутреннего проводника коаксиального кабеля используется центральная жила, а 6 внешних жил используются как его внешний провод. В этом случае цепь экранов кабельной линии не соединяется с корпусом гермопроходки.

В результате расчетов делается вывод: кабели с металлической оболочкой и магнезиальной изоляцией марок КМЖ по электромагнитным параметрам допустимо применять для гермовводов контрольных кабелей атомных станций.

Глава третья «Выбор основных конструкций герметичных вводов контрольных кабелей» посвящена выбору основных конструктивных решений для гермовводов контрольных кабелей с применением изобретений и патентов диссертанта и с учетом расчетов, сделанных по методикам, изложенных во второй главе и выбора материалов (излагается в пятой главе). Предлагаемые конструкции проходок типа ВГКК [15], спроектированы на основе конструктивных решений диссертанта.

Предлагается конструкция гермоввода контрольных кабелей типа ВГКК-1 [1, 2, 15] с использованием изобретения диссертанта а. с. № 1833022 «Герметичный ввод» [7], состоящего в следующем.

Устройство (рис. 2) содержит металлический корпус 1, герметизированный с обеих сторон фланцами 2.

Внутри корпуса расположен элемент биологической защиты 3. С торцов корпус закрывается защитными кожухами 4, предназначенными для защиты узлов герметизации от механических и тепловых воздействий.

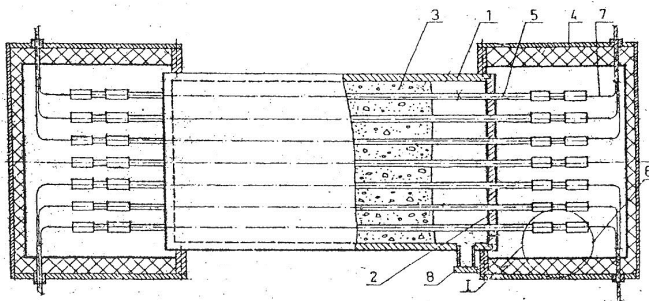


Рис. 2. Герметичный ввод контрольных кабелей

Через элемент 3 пропущены изолированные электрические проводники 5, представляющие собой отрезки кабеля с жаростойкой минеральной изоляцией в металлической оболочке типа КМЖ. Отрезки кабеля 5 пропущены в отверстия фланцев 2 и металлической оболочкой припаяны или приварены к фланцам 2. Каждый конец отрезка кабелей 5 очищен от изоляции и с обеих сторон загерметизирован во внутреннем пространстве защитного кожуха 4 с помощью металлокерамического модуля 6, из которого выходит жила 7 кабеля. Для контроля герметичности гермоввода служит штуцер 8.

Использование проводников в виде отрезков кабелей с минеральной изоляцией и металлической оболочкой даже в случае разгерметизации соединения жилы кабеля с металлическим модулем не приводит к разгерметизации всего устройства, так как наличие металлической оболочки кабеля позволяет герметично соединить его с фланцами корпуса, а минеральная изоляция кабеля послужит адсорбирующим фильтром от радиоактивных загрязнений.

Особенностью созданного устройства гермоввода является то, что он полностью состоит из негорючих огнестойких и радиационно стойких неорганических материалов и металлов. В проходках применены кабели с минеральной изоляцией, медная или стальная оболочка которых соединяется пайкой твердым припоем с фланцами. Двойная герметизирующая система обеспечивает высокую надежность изделия в случае пожара, сейсмических воздействий и разгерметизации тепло-выделяющих элементов атомного реактора.

Далее предлагается конструкция с использованием изобретения диссертанта [11], гермоввода с экранированными кабелями, принципиальная схема которого приведена на рис. 3. [1, 2, 15].

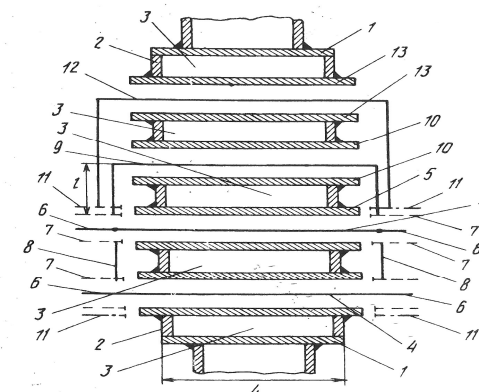


Рис. 3. Герметичный ввод

Герметичный ввод содержит металлический корпус 1, к торцам которого присоединены фланцы 2 и в котором размещена биологическая защита 3. Через отверстия фланцев 2 и через отверстия в биологической защите 3 пропущены проводники, жилы 4 которых окружены минеральной изоляцией в металлической оболочке 5. Металлическая оболочка 5 припаяна или приварена к фланцам 2 корпуса 1. Жила 4 проводника гермоввода соединена с жилой 6 подводящих кабелей. Жилы 6 подводящего кабеля окружены экранами 7. Экраны жил подводящего кабеля соединены между собой проводником 8, соединенным с жилой 9 проводника 10 гермоввода. В некоторых случаях проводником 8 может служить жила 9 одного из кабелей гермоввода, имеющего большую длину, чем жилы других кабелей гермоввода.

В случае наличия общего экрана 11 всех жил подводящего кабеля необходимо соединить этот экран проводником с жилой 12 другого проводника 13 гермоввода. Соединение экранов жил подводящих кабелей проводником между собой и соединение его с одной из жил проводника гермоввода с соблюдением условия $l > 0,1/L$ обеспечивает гальваническое соединение экранов жил подводящих кабелей с обеих сторон гермоввода без соединения экранов к корпусу гермоввода, что позволяет обеспечить помехозащищенность подводящих экранированных кабелей, а следовательно, и помехозащищенность всей кабельной сети.

В заключительном разделе третьей главы предлагается конструктивное решение гермовводов термопарных кабелей типа ВГКК – 3[1, 2, 15]. Описывается конструктивное решение по гермовводам термопарных кабелей, выполненное с использованием изобретения

диссертанта [9] и заключающееся в следующем. Особенностью данной конструкции в том, что в качестве проводников в ней используются термопарные кабели с металлической оболочкой и минеральной изоляцией типа КТМС (ХК) 2х0,9 или КТМС (ХА) 2х0,9, концы которых герметизируются двухканальными металлокерамическими изоляторами или стеклотаблетками на основе ситалла. С целью получения спая, сохраняющего герметичность, в качестве герметика концов термопарного кабеля используют предварительно спеченную по керамической технологии таблетку ситалла с отверстиями для жил кабеля, затем, таблетку полностью расплавляют в защитной атмосфере или в вакууме.

В результате применения серии изобретений диссертанта, выполненных в соавторстве с доктором технических наук, профессором Н. С. Костюковым и другими авторами [7, 8, 9, 10, 11], были созданы образцы гермовводов, состоящие из негорючих огнестойких и радиационно стойких неорганических материалов и металлов. В проходках применены кабели с минеральной изоляцией, медная или стальная оболочка которых соединяется пайкой твердым припоем с фланцами. Двойная герметизирующая система обеспечивает высокую надежность изделия в случае пожара, сейсмических воздействий и разгерметизации тепловыделяющих элементов атомного реактора.

В четвертой главе «Методика испытаний гермовводов режимах большой и малой аварий» описывается разработанная автором, совместно с учеными Узбекской Академии наук, Института Ядерной физики (г. Улугбек) методика проведения испытаний герметичных кабельных вводов в режимах большой и малой аварий [14, 18]. Отличительной особенностью данной методики от рекомендуемых методов гостовских испытаний состоит в том, что изделие подвергается, как и в реальных условиях аварии, комплексному одновременному воздействию радиоактивного излучения, повышенной температуры, давления, влажности и дезактивирующих растворов.

Испытательная камера (рис. 4) снабжена нихромовым нагревательным элементом, намотанным на корпус камеры и теплоизолированным асбестом. В центр камеры введен термодатчик (термопара) типа ХА. Редуктор позволяет в процессе испытаний поддерживать заданное давление (разряжение). Используя РНО-250, включают печь, создают требуемую испытательную температуру внутри камеры, которую регистрируют автоматически, используя прибор автоматического следящего уравнивания типа КСП-4. Перед установкой на облучение ввод прогревают в течение 60 мин.

Далее, используя баллон со сжатым воздухом (азотом), редуктор БКО-25, манометр типа МО-250, либо форвакуумный насос типа ВН-461М и вакуумметр, создают в камере требуемое давление (разряжение). Трубопровод камеры снабжён штуцером, места сочленения тщательно уплотнены. Откачка воздуха из камеры или создание избыточного давления производится до загрузки ввода в сухой водозащитный канал кобальтовой (Co-60) гамма-установки с диаметром гамма-облучателя 300 мм. Измерение электрического сопротивления изоляции вводов класса напряжения до 400В проводят мегомметрами постоянного тока при номинальном напряжении.

Испытания на электрическую прочность изоляции проводят на АИИ-70 с контролем параметров. Затем камеру с вводом, тельфером опускают в канал гамма установки на требуемый уровень радиации и выдерживают в течение времени, согласно требований технического задания.

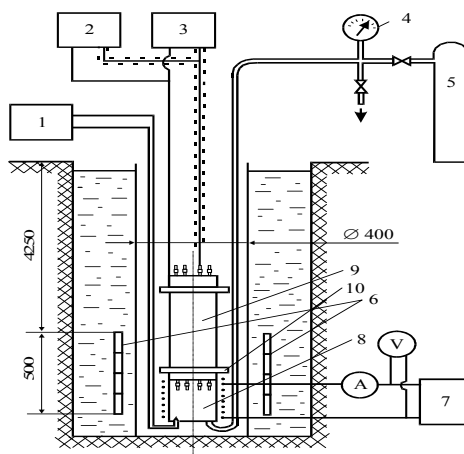


Рис. 4. Испытательная камера: 1 – система измерения температуры; 2, 3 – устройства для измерения токов утечки и электрической прочности; 4 – манометр; 5 – баллон со сжатым воздухом; 6 – радиоизотопные излучатели Co^{60} ; 7 – система нагрева.

Опытные образцы гермовводов для АЭС «Хурагуа» успешно прошли испытания на вышеописанной установке, что подтверждает надежность разработанной диссертантом конструкции. Создана методика, учитывающая одновременное воздействие факторов радиации, повышенной температуры и дезактивирующих растворов, позволяющая оценить соответствие поставляемых на АС изделий необходимым уровням безопасности для всех режимов эксплуатации АС.

В пятой главе «Исследование и испытания материалов и гермовводов» проанализированы материалы, используемые для изготовления герметичных кабельных вводов, обосновывается выбор комплектующих материалов на основе металлокерамических элементов и описываются проведенные испытания, подтвердившие надежность выбранных конструкций. Выбор материалов и элементов конструкции герметичных кабельных вводов был определен техническим заданием на разработку. Основные требования заключались в том, что изделие должно было обладать повышенной радиационной стойкостью при гамма – излучении (интегральная доза радиации с учетом всех аварий $5 \cdot 10^8$ рад), состоять из негорючих материалов, обладающих химической устойчивостью при высоких температурах (стандартный режим пожара до 1000C°), выдерживать воздействие дезактивирующих растворов и других факторов.

При рассмотрении проблемы радиационной стойкости материалов были проанализированы исследования различных авторов, в том числе выполненные под руководством профессора Н. С. Костюкова.

При выборе изоляционных материалов были рассмотрены три основные группы: керамические материалы, материалы, имеющие стеклянную составляющую и материалы на основе полимеров. Можно обратить внимание на несколько недостатков конструкций, использующих полимеры. Гермовводы подвергаются постоянному воздействию гамма – излучения, кислорода, влаги, воздушной среды, механических и электрических напряжений, а также температурному воздействию. Причем действие излучения на полимерные материалы в комплексе с вышеперечисленными факторами ускоряет негативные процессы, происходящие в полимерах. Герметизирующие узлы под воздействием гамма излучения с течением времени теряют свою герметичность, вследствие того, что начинают происходить процессы деструкции, сшивания, образования внутримолекулярных связей, распада и образования сопряженных двойных связей, процессы радиационного окисления и изменения кристалличности. Происходит образование свободных радикалов, обладающих повышенной активностью. Облучение полимерных материалов происходит в среде кислорода, что снижает механическую прочность и ускоряет деструкцию, в результате которой происходит разрыв главных цепей полимерных молекул и разрывы внутри и межмолекулярных химических связей в пространственно – сшитых полимерах.

В отличии же от полимеров, гамма – излучение практически не оказывает влияния на стекло, керамику и металлы. Но использование

стеклянной герметизации улов в гермовводах имеет недостаток слабой защищенности от механического воздействия, что быстро приводит к потере герметичности изделия или узла.

Из анализа практических и теоретических исследований указанных выше трех групп материалов, сравнивая данные доз гамма-излучений, после которых начинается значительное снижение на 25% электрофизических свойств материалов: для керамики, стекла, полимеров и металлов, можно сделать вывод, что радиационная стойкость керамических материалов и металлов на несколько порядков выше.

Для выбора концевых кабельных керамических изоляторов были проведены исследования [13] нескольких видов металлокерамических узлов (МКУ), изготовленных на основе высокоглиноземистых керамик ГБ-7, микролит, УФ-46, 22ХС. МКУ исследовались до после воздействия гамма облучения дозой $5 \cdot 10^8$ рад в паровоздушной среде с добавлением дезактивирующей смеси при температуре 150°C и давлении 0,5 МПа. В результате исследований было установлено, что МКУ на основе керамик типа Микролит и 22ХС дают более высокую вакуумную плотность (до 85%) по сравнению с МКУ на основе керамики УФ-46, где вакуумная плотность меньше (на 7–8%). Электрическое сопротивление изоляции МКУ в обычных условиях является достаточно высоким $5 \cdot 10^{12}$ – $5 \cdot 10^{13}$ Ом. После воздействия гамма – облучения дозой $5 \cdot 10^8$ рад величина электрического сопротивления изоляции меняется незначительно. При помещении в паровоздушную среду и создания режимов большой и малой аварии сопротивление МКУ резко уменьшается до 10^5 – 10^6 Ом, при этом МКУ полностью сохраняют герметичность. На основе данных исследований установлено, что более высокими характеристиками обладают металлокерамические изоляторы на основе керамики Микролит и 22ХС.

Поэтому, проанализировав материалы исследований, для увеличения надежности конструкций гермовводов были выбраны комплектующие, состоящие только из металлокерамических модулей. В состав материалов для гермовводов типа ВГКК вошли различные виды сталей (например, сталь 3), припои на основе серебра и меди (например, ПСР-72), кабели с медной или стальной оболочкой и минеральной изоляцией (типа КМЖ), керамические изоляторы (на основе керамики УФ-46 и 22ХС). Кроме хорошей стойкости к гамма-излучению, указанные материалы обладают высокой огнестойкостью, в отличие от полимерных составляющих, которые при повышенных температурах начинают разлагаться, выделяя токсические вещества.

Правильность выбора материалов для элементов конструкций герметичных кабельных вводов было подтверждено комплексом необходимых испытаний. Испытания партии гермовводов типа ВГКК проводились с целью оценки соответствия гермовводов конструкторской и технологической документации, ТУ [15] с учетом требований ГОСТ 15963 «Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические требования и методы испытаний».

Испытаниям подвергалась партия опытных образцов гермовводов в количестве 20 шт. Среди основных испытаний, выполненных диссертантом были: контроль герметичности, сопротивления изоляции, испытания на огнестойкость в режиме пожара, радиационные испытания, испытания в режиме большой и малой аварии. Также гермовводы подвергались испытанию на старение тепловым методом, электрическим испытаниям, механическим испытаниям, на сейсмические воздействия испытания на виброустойчивость и другие.

Протоколы испытаний были приняты и зачтены межведомственной комиссией из представителей федеральных министерств (копия протокола дается в приложении к диссертационной работе), что подтверждает надежность разработанных конструкций. Разработка была принята для производства в НПО «Красная Звезда», г. Москва (копия протокола прилагается к диссертационной работе).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны конструкции герметичных вводов контрольных кабелей для атомных станций с использованием патентов и авторских свидетельств [7, 8, 9, 10, 11], отличающиеся повышенной надежностью за счет применения только металокерамических модульных составляющих, что значительно повысило уровень радиационной и пожаростойкости. Надежность конструкции подтверждается комплексом проведенных испытаний, принятых межведомственной комиссией из представителей федеральных министерств и ведомств. Разработка была принята для производства в НПО «Красная Звезда».

2. Разработана методика экспериментальных измерений и теоретических расчетов для конструкций герметичных вводов контрольных кабелей с минеральной изоляцией, применяемых при проектировании, для конструкций без экранировки жил, с экраном, замкнутым на корпус, без замыкания на корпус и для коаксиальных цепей.

3. Разработана методика проведения испытаний герметичных кабельных вводов в режимах большой и малой аварии, позволяющая учитывать при испытаниях факторы одновременного воздействия радиации, изменения давления, влажности, температуры и дезактивирующих растворов. По данной методике были проведены испытания, показавшие высокую надежность комплектующих материалов и изделия.

Основные публикации по теме диссертации

Препринт

1. Ващук, С. П. Герметичные вводы контрольных кабелей для АЭС / Н. С. Костюков, С. Д. Холодный, С. П. Ващук, Г. И. Пакулов // ДВО АН СССР: Благовещенск. 1990. – 68 с.

В изданиях, рекомендованных ВАК

2. Ващук, С. П. Герметичные кабельные вводы для АЭС / Н. С. Костюков, С. П. Ващук, Г.И. Пакулов, С. Д. Холодный // Атомная энергия. – 1993. – Т. 75. – Вып. 6. – С. 487–490.

3. Ващук, С. П. Расчет электромагнитных параметров гермовводов АЭС с применением кабелей марки КМЖ / С. П. Ващук, Н. С. Костюков, С. Д. Холодный // Кабели и провода. – 2011. – № 201103. – С. 28–33.

В материалах международных конференций

4. Ващук, С. П. Гермовводы контрольных кабелей ВГКК для атомных электростанций / С. П. Ващук, Н. С. Костюков // Сборник трудов Пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». – Изд-во АмГУ. – Благовещенск. – 2008. – С. 283 – 285.

5. Ващук, С. П. Герметичные кабельные вводы повышенной надежности для атомных электростанций и особенности их испытаний в аварийных режимах / С. П. Ващук, Н. С. Костюков, В. А. Охотников, А. М. Пасько // Материалы Конгресса «Атомэкспо 2010». М. 2010. С. 66–68.

6. Ващук, С. П. Герметичный кабельный ввод для атомных станций. / С. П. Ващук, Н. С. Костюков // Материалы конференции Форума поставщиков атомной отрасли «Атомекс 2010». – М., 2010. – С. 27–28.

Авторские свидетельства и патенты

7. Авторское свидетельство СССР SU 1833022. Герметичный ввод / Костюков Н. С., Павлов Д. В., Антонова Н. П., Цуркан Л. М., Ващук С. П. – № 4485949/07; Заявл. 03.10.88.

8. Патент на изобретение RU 2030049. Герметичный ввод экранированных кабелей / Костюков Н.С., Ващук С. П., Берковский Э. Я., Щеглова М. Д., Антонова Н. П. – №4835121/07; Заявл. 27.04.90 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1995. – № 6.

9. Патент на изобретение RU 2030050. Способ заделки концов термопарных кабелей гермовводов / Костюков Н. С., Певзнер Г. З., Савосько Р. В., Курганская И. Ю., Ващук С. П. – №4858225/07; Заявл. 20.08.90 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1995. – № 6.

10. Патент на изобретение RU 2022383. Герметичный ввод / Калашников В. Г., Еранская Т. Ю., Костюков Н. С., Калашникова А. Н., Ващук С. П. – №4955616/07; Заявл. 12.05.91 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1994. – № 20.

11. Патент на изобретение RU № 2030001. Герметичный ввод / Холодный С. Д., Костюков Н. С., Ващук С. П., Данилюк В. И. – №4859223/07; Заявл. 20.08.90 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1995. – № 6.

Другие публикации

12. Ващук, С. П. Герметичные вводы контрольных кабелей (ГВКК) для атомных станций / Н. С. Костюков, С. П. Ващук, Г. И. Пакулов // Сборник «Разработки ДВО АН СССР».- Владивосток, 1990.

13. Ващук, С. П. Исследование металлокерамических соединений на основе высокоглинозёмистых керамик, изготовленных различными способами / Н. С. Костюков, С. П. Ващук, Х. Нурматов, М. А. Мухамеджанов // Физика и химия твёрдого тела. Тезисы докладов Третьей Международной школы-симпозиума. – Благовещенск, 1991. – С. 6–7.

14. Ващук, С. П. Испытания гермовводов контрольных кабелей для АЭС в режимах большой и малой аварии / С. П. Ващук, Н. С. Костюков, М. И. Муминов, М. А. Мухамеджанов, Х. Нурматов // «Физика и химия твердого тела». Тезисы докладов Третьей Международной школы-симпозиума. АНЦ ДВО РАН. – Благовещенск, 1991. – С. 81.

15. Технические условия ТУ 7434-4740909-001-92Э / Вводы герметичные контрольных кабелей типа ВГКК для АЭС. // Т. Ю. Еранская, А. М. Пасько, С. П. Ващук, Г. И. Пакулов, Г. Г. Охот-

никова, Т. Ю. Головки. – Благовещенск: ИТЦ АмурНЦ ДВО РАН, 1992. – 62 с.

16. Вашук, С. П. Теоретическое обоснование конструктивных решений гермовводов серии ВГКК для АЭС / С. Д. Холодный, Н. С. Костюков, С. П. Вашук // «Физика и химия твёрдого тела»: Сб. докладов Четвертой Международной школы-симпозиума. – Благовещенск: АНЦ ДВО РАН, 1994. – С. 72–93.

17. Вашук, С.П. Расчет гибкой вставки в жиле гермоввода / С. Д. Холодный, Н. С. Костюков, С. П. Вашук // Вестник АмГУ. – 2012. – Выпуск № 59. – С. 43–45.

18. Вашук, С. П. Об установлении соответствия герметичных кабельных вводов и другого оборудования нормам безопасности на атомных станциях // А. М. Пасько, С. П. Вашук, Г. И. Пакулов // Вестник АмГУ. – 2013. – Выпуск 61. – С. 26–28.

Цитируемая литература:

I. Привезенцев, В. А. Основы кабельной техники / В. А. Привезенцев, И. И. Гроднев, С. Д. Холодный, И. Б. Рязанов // под ред. Привезенцева В.А. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.

II. Гроднев, И. И. Коаксиальные кабели связи / И. И. Гроднев, П. А. Фролов // 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь. 1983. – 208 с.

Подписано к печати 16.04.2014. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,16.

Заказ 315-14. Тираж 110 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ.** 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru