

Министерство образования и науки Российской Федерации

*Амурский государственный университет*

Н.С. Костюков, С.Д. Холодный, Т.Ю. Еранская,  
В.А. Демчук, В.А. Охотников, С.П. Ващук

# РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ

*Монография*

Часть II

Благовещенск

Издательство АмГУ

2014

УДК 621.3.002.3

ББК 31.231

К72

*Рекомендовано*

*ученым советом Амурского государственного университета*

*Рецензенты:*

*В.И. Верещагин – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии силикатов и наноматериалов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Заслуженный деятель науки РФ;*

*М.М. Михайлов – д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией радиационного и космического материаловедения Томского гос. университета систем управления и радиоэлектроники, Заслуженный деятель науки РФ.*

Костюков, Н.С. и др.

К72 Радиационно стойкие керамические изоляторы: монография. Часть II / Н.С. Костюков, С.Д. Холодный, Т.Ю. Еранская, В.А. Демчук, В.А. Охотников, С.П. Ващук. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 208 с.

Монография посвящена принципам и основам конструирования радиационно стойких проходных металлокерамических изоляторов и созданным на их основе герметичным кабельным вводам, предназначенным для прохода проводников через защитные оболочки атомных станций, а также боксы морских судов и космических аппаратов. Рассматриваются конструкции и технология изготовления герметичных вводов силовых, контрольных кабелей и кабелей систем управления и защиты (СУЗ). Приведены сведения о конструкциях и технологии изготовления изоляторов для исполнительных механизмов СУЗ, подверженных воздействию излучений.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, занимающихся проектированием, расчетом и технологией изготовления герметичных металлокерамических изоляторов и герметичных кабельных вводов, а также студентов вузов электротехнических специальностей.

ББК 31.231

ISBN 978-5-93493-213-9

© Костюков Н.С., Холодный С.Д. Еранская Т.Ю.,  
Демчук В.А., Охотников В.А., Ващук С.П.  
© Амурский государственный университет, 2014

**ГЛАВА 6.**  
**РАБОТА ГЕРМОВВодОВ С КАБЕЛЯМИ КМЖ**  
**ПРИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ [54, 68, 122]**

**6.1. Методика экспериментальных измерений и теоретических расчетов электрических параметров кабелей марок КМЖ-1×4 и КМЖ-7×2,5**

Для расчета электрических параметров отрезков кабелей в гермовводе, через которые должны передаваться импульсы с коротким фронтом или сигналы при высокой частоте, а также для оценки возможных помех в гермовводе при передаче таких сигналов необходимо знать емкость кабелей, тангенс угла

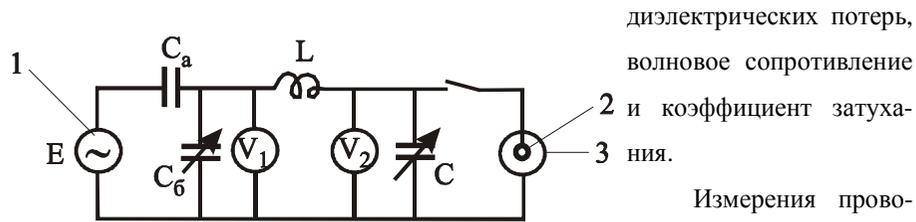


Рис. 6.1. Схема измерений с применением прибора Е 4-4.

Принципиальная схема измерений приведена на рис. 6.1.

От генератора 1 напряжение высокой частоты  $f$  подается через емкостный делитель напряжения ( $C_a, C_6$ ) на последовательный резонансный контур ( $L, C$ ). Напряжение на контуре контролируется вольтметром  $V_1$  на заданном постоянном уровне. Последовательный резонанс определяется по максимуму показаний вольтметра  $V_2$ , шкала которого градуирована в единицах добротности  $Q = V_2/V_1$ .

Для измерений емкости и  $tg \delta$  оболочка 3 отрезка кабеля, длиной  $l \approx 0,5-1$  м подключается к заземленному электроду прибора. Жила 2 подключается к переменному конденсатору  $C$  с градуированной шкалой (от 30 до 450 пФ).

При постоянной частоте производится измерение  $C_1$  и  $Q_1$  без кабеля и  $C_2$  и  $Q_2$  с подключенным кабелем.

Емкость отрезка кабеля и единицы длины кабеля равна

$$C_x = C_1 - C_2, \quad C_p = C_x/l \quad (6.1)$$

Значение  $tg \delta$  изоляции определяем по формуле

$$tg \delta = \frac{C_1}{C_1 - C_2} \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 \cdot Q_2} \quad (6.2)$$

Для измерения емкости выбирают частоту 50-500 кГц, при которой длина отрезка кабеля много меньше длины волны при этой частоте.

В кабеле КМЖ-7×2,5 в качестве внутренней жилы коаксиального кабеля использовали центральную проволоку, а в качестве внешнего провода – 6 наружных проволок, играющих роль внешнего провода коаксиального кабеля. Такая конструкция позволяет получить коаксиальный гермоввод, у которого внешний провод не соединен с корпусом гермоввода и стальной обшивкой защитной оболочки АЭС. Подсоединение 6 проволок к оболочке кабеля не влияет на результаты измерений.

Измерение волнового сопротивления и коэффициента затухания производили методом четвертьволновой линии [62, 63]. Жилы отрезка кабеля длиной  $l \approx 1,5$  замыкают с дальнего конца.

Сначала устанавливают конденсатор  $C$  прибора в среднее положение шкалы. Подключают образец кабеля и изменением частоты генератора 1 на рис. 6.1 устанавливают положение резонанса. Отключают кабель и устанавливают положение резонанса подстройкой конденсатора  $C$ .

Далее снова подключают кабель и добиваются положения резонанса изменением частоты, отключают кабель и устанавливают резонанс изменением емкости  $C$  и т.д. В конечной стадии измерений подключение кабеля не должно изменять положение резонанса.

Волновое сопротивление кабеля  $Z$ , Ом и затухание  $\alpha$ , дБ/м определяем по формулам

$$Z = \frac{1}{(4f \cdot l \cdot C_p)},$$

$$\alpha = 8,69 \frac{\pi \cdot C_{рез} (Q_1 - Q_2)}{2l^2 C_p \cdot Q_1 \cdot Q_2}, \quad (6.3)$$

где  $C_{pez}$  – емкость по шкале прибора в конечной стадии измерений на четверть-волновой линии;  $Q_1$  и  $Q_2$  – добротности без кабеля и с подключенным кабелем.

Коэффициент укорочения длины волны в кабеле по сравнению с длиной волны в вакууме:

$$\sqrt{\varepsilon} = 3 \cdot 10^8 / (4 \cdot f \cdot l), \quad (6.4)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная изоляции кабеля.

Результаты расчетов по экспериментальным данным приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

**Параметры кабелей с минеральной изоляцией**

Марка кабеля	Параметры					
	$C_p$ , пФ/м	$tg \delta$	$Z$ , Ом	$\alpha$ , дБ/м	$\sqrt{\varepsilon}$	$\varepsilon$
КМЖ-1×4	475	0,0008	15	0,104	2,15	4,6
КМЖ-7×2,5	228	0,0016	32	0,039	2,2	4,8

Параметры кабелей можно получить расчетными методами

$$C_p = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 / \ln(D/d), \quad (6.5)$$

$$Z = (60/\sqrt{\varepsilon}) \ln(D/d),$$

где  $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $d$  и  $D$  – диаметры жилы и по изоляции, мм.

Измерения геометрических размеров кабеля показали, что они отличаются от размеров, указанных в технических условиях:  $d=2,2$  м;  $D=3,8$  мм; толщина оболочки  $\Delta=0,4$  мм; электрическое активное сопротивление оболочки  $R_{об}=3,72 \cdot 10^{-3}$  Ом/м. При подстановке значения  $\varepsilon=4,6$  в формулы (6.4) и (6.5) получим  $C_p=472$  пФ/м,  $Z=15,2$  Ом. Таким образом, расчетные параметры соответствуют экспериментальным данным.

Затухание рассчитываем по формулам  $\alpha = \alpha_M + \alpha_D$

$$\alpha_M = \frac{6 \sqrt{f \cdot \varepsilon} (1 + D/d) \cdot 10^{-3}}{D \ln(D/d)}, \quad (6.6)$$

$$\alpha_D = 28,8\pi f \sqrt{\varepsilon} tg \delta \cdot 10^{-6}, \quad (6.7)$$

где  $\alpha_M$  и  $\alpha_D$  – затухание в металлических проводниках и диэлектрике, дБ/км.

При подстановке  $f=22 \cdot 10^6$  1/с;  $D=3,8$  мм;  $d=2,2$  мм;  $\varepsilon=4,6$ ;  $tg \delta \approx 10^{-3}$  получим для кабеля КМЖ-1×4  $\alpha_M \approx 79$ ,  $\alpha_D \approx 3,5$ ,  $\alpha \approx 83$  дБ/км. Расчетное значение несколько меньше полученного экспериментального (табл. 6.1).

**6.2. Системы заземления экранов и помехозащищенность кабельных сетей**

В системе электрических соединений для АЭС предусмотрена общая точка заземления экранов кабелей, которая изолирована от защитной оболочки АЭС и корпусов гермовводов. Между корпусом гермоввода 9 и экраном кабеля 2 может возникнуть напряжение помехи  $U_{но}$ , как показано на рис. 6.2. Экраны подводящих кабелей 2 и 4 соединены с помощью токовода 7, который является жилой дополнительного кабеля КМЖ.

Оболочки кабелей 6 и 8 соединены с корпусом гермоввода 9. На рис. 6.2 показана передача электрического сигнала на одной жиле кабелей 1 и 3. Напряжение от источника сигналов  $E$  с внутренним сопротивлением  $Z_E$  подается на вход кабеля (координата  $x=0$ ). На входе кабеля возникает входное напряжение  $U_{вх}$  и ток  $I_{вх}$ . Входное сопротивление  $Z_{вх} = U_{вх} / I_{вх}$ . В конце кабельной линии при  $x=l_k$  подсоединено сопротивление нагрузки  $Z_H$ , на котором при токе нагрузки  $I_H$  возникает напряжение  $U_H$ , причем  $Z_H = U_H / I_H$ .

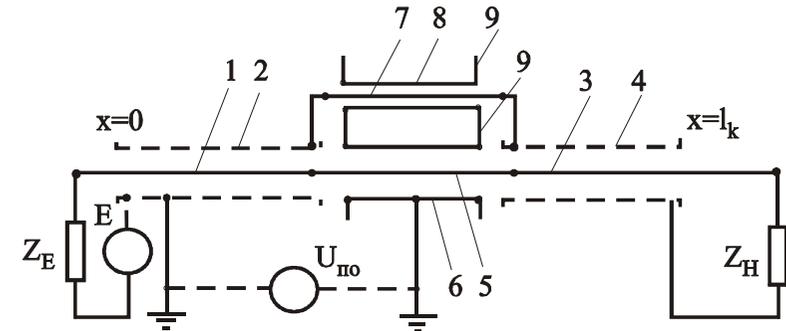


Рис. 6.2. Общая схема устройства передачи информации по гермовводам.

Если имеется напряжение помехи  $U_{но}$ , то между жилой кабеля 3 и его экраном 4 возникнет напряжение помехи  $U_n$ , приложенное к сопротивлению нагрузки  $Z_n$ .

Следует отметить, что помехи от токов высокой частоты в корпусе гермоввода не учитываются, так как токи высокой частоты сильно затухают в стальном корпусе гермоввода.

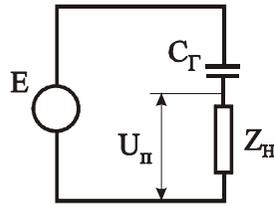


Рис. 6.3. Схема для расчета помех в одножильном гермовводе.

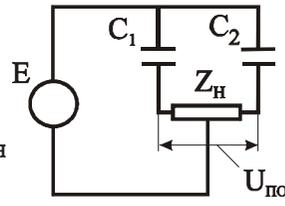


Рис. 6.4. Схема для расчета помех в симметричном гермовводе.

В примере расчета напряжения помех при промышленной частоте примем округленно емкость единицы длины кабеля КМЖ  $C_p=500$  пФ, а сопротивление нагрузки 100 Ом и  $U_{no}=10$  В. Эквивалентные схемы для расчета напряжения помех одножильного и двухжильного кабеля приведены на рис. 6.3 и 6.4. Ток от воздействия напряжения  $U_{no}$  протекает через емкость  $C_T$  жила-оболочка отрезка кабеля КМЖ и далее по жиле 3 и сопротивлению нагрузки  $Z_H$ , причем  $1/(\omega C_T) \gg Z_H$  тогда получим расчетные формулы ( $E=U_{no}$ )

$$U_n/U_{no} = Z_H j \omega C_T l, \quad (6.8)$$

$$|U_n/U_{no}| = |Z_H| \omega C_T l, \quad (6.9)$$

где  $l \approx 1,5$  м – длина кабеля КМЖ.

Подставив исходные данные, получим

$$|U_n/U_{no}| = 100 \cdot 314 \cdot 500 \cdot 10^{-12} \cdot 1,5 = 2,4 \cdot 10^{-5}$$

Если  $U_{no}=10$  В, то  $U_n=2,4 \cdot 10^{-4}$  В, что много меньше передаваемых полезных сигналов.

Для соединения двухжильных кабелей (скрученные пары) используем двухжильный кабель КМЖ-2×1,5. На рис. 6.4:  $C_1$  – емкость между первой жилой кабеля КМЖ и оболочкой кабеля и подсоединенной к ней второй жилой, а  $C_2$  емкость между второй жилой и оболочкой с первой жилой. Средняя точка  $Z_H$  в симметричной системе может считаться заземленной. Нетрудно показать, что напряжение помехи на  $Z_H$  определяется формулой

$$|U_n/U_{no}| = \frac{|Z_H|}{2} \omega (C_1 - C_2) l \quad (6.10)$$

Коэффициент асимметрии по емкостям  $K_{ac} = 2(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$ , тогда

$$|U_n/U_{no}| = K_{ac} Z_H \omega l (C_1 + C_2)/4 \quad (6.11)$$

Если  $U_{no}=10$  В,  $K_{ac}=0,1$ ,  $C_1+C_2=1500 \cdot 10^{-12}$  Ф, то  $U_n \approx 1,2 \cdot 10^{-6}$  В.

### 6.3. Расчет электромагнитных параметров кабельной цепи при высокой частоте с применением кабелей КМЖ

**Расчет затухания кабельной цепи с вставкой кабеля КМЖ в гермоввод.** Информационные или управляющие сигналы передаются по кабельной цепи из «чистой» зоны в «грязную» зону или в обратном направлении в виде импульсов с коротким фронтом или с применением гармонических колебаний высокой частоты. В этом случае кабельную цепь следует рассматривать как линию с распределенными параметрами. В средней части кабельной цепи в гермовводе вставлен отрезок кабеля КМЖ-1×4 или КМЖ-7×2,5 длиной  $l=1,5$  м (или 1,1 м). При передаче импульсов используются подводящие кабели с симметричными параметрами (в виде скрученных пар с экранами) и кабели КМЖ-2×1,5.

Необходимо определить, насколько изменяются общее затухание в кабельной цепи и ее входное сопротивление, если в ее средней части вставить отрезок кабеля КМЖ. В симметричной схеме волновое сопротивление подводящего кабеля  $130 \pm 20$  Ом, входное напряжение  $12 \pm 2$  В. Напряжение на нагрузке – 4 В. Фронт импульсов – 0,1-1 мкс, а длина импульса  $2 \pm 1$  мкс. Частота следования импульсов – от 0,1 до  $5 \cdot 10^4$  1/с. На приемнике фронт импульса не должен превышать 1 мкс, амплитуда – не менее 4 В. Длина подводящих кабелей – до 500 м.

В схеме с коаксиальными кабелями подводящие кабели имеют волновое сопротивление 75 Ом, кабель КМЖ-7×2,5 – 32 Ом и КМЖ-1×4 – 15 Ом. Соответственно затухание на частоте 22 МГц для КМЖ-7×2,5  $\alpha=0,0045$  Неп/м и для КМЖ-1×4  $\alpha=0,012$  Неп/м (по результатам измерений табл. 6.1).

Схема линии передачи составной кабельной линии приведена на рис. 6.5. На участках линии до гермоввода и после него (длины  $l_1$  и  $l_3$ ) волновое сопротивление равно  $Z_1$  и постоянная распространения электромагнитной волны  $\gamma_1$ . На участке гермоввода с длиной  $l_2$  волновое сопротивление  $Z_2$  и постоянная распространения волны  $\gamma_2$  (кабель КМЖ). Сопротивление нагрузки  $Z_H=Z_1$ .

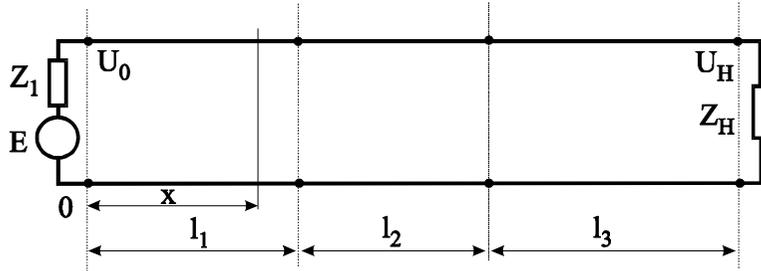


Рис. 6.5. Схема для расчета кабельной цепи при высокой частоте.

Для трех участков запишем уравнения напряжения и тока в комплексной форме [62, 68]

$$U^{(1)} = a_1 e^{-\gamma_1 x} + b_1 e^{\gamma_1 x}, \quad (6.12)$$

$$I^{(1)} = \frac{a_1}{Z_1} e^{-\gamma_1 x} - \frac{b_1}{Z_1} e^{\gamma_1 x} \quad (6.13)$$

$$U^{(2)} = a_2 e^{-\gamma_2 x} + b_2 e^{\gamma_2 x}, \quad (6.14)$$

$$I^{(2)} = \frac{a_2}{Z_2} e^{-\gamma_2 x} - \frac{b_2}{Z_2} e^{\gamma_2 x}, \quad (6.15)$$

$$U^{(3)} = a_3 e^{-\gamma_1 x} + b_3 e^{\gamma_1 x} \quad (6.16)$$

$$I^{(3)} = \frac{a_3}{Z_1} e^{-\gamma_1 x} - \frac{b_3}{Z_1} e^{\gamma_1 x} \quad (6.17)$$

Произвольные постоянные  $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$  определяются из граничных условий. Координата  $x$  отсчитывается от начала каждого участка. Запишем условия на концах трех линий. Напряжение и ток на входе линии 1 равны  $U_0$  и  $I_0$ .

При  $x=0$

$$U_0 = a_1 + b_1, \quad (6.18)$$

$$I_0 = \frac{a_1}{Z_1} - \frac{b_1}{Z_1}. \quad (6.19)$$

При  $x=l_1$  получим для участка  $l_1$

$$U_{1,2}^{(1)} = a_1 e^{-\gamma_1 l_1} + a_2 e^{\gamma_1 l_1} \quad (6.20)$$

$$I_{1,2}^{(1)} = \frac{a_1}{Z_1} e^{-\gamma_1 l_1} - \frac{a_2}{Z_1} e^{\gamma_1 l_1} \quad (6.21)$$

При  $x=0$  на участке 2 получим

$$U_{2,1}^{(2)} = a_2 + b_2, \quad (6.22)$$

$$I_{2,1}^{(2)} = \frac{a_2}{Z_2} - \frac{b_2}{Z_2} \quad (6.23)$$

Для стыка участков 2 и 3 для линии 2

$$U_{2,3}^{(2)} = a_2 e^{-\gamma_2 l_2} + b_2 e^{\gamma_2 l_2}, \quad (6.24)$$

$$I_{2,3}^{(2)} = \frac{a_2}{Z_2} e^{-\gamma_2 l_2} - \frac{b_2}{Z_2} e^{\gamma_2 l_2} \quad (6.25)$$

Для стыка участков 2 и 3 для линии 3

$$U_{3,2}^{(3)} = a_3 + b_3, \quad (6.26)$$

$$I_{3,2}^{(3)} = \frac{a_3}{Z_1} - \frac{b_3}{Z_1} \quad (6.27)$$

Приравняем (6.20) и (6.22), (6.21) и (6.23), (6.24) и (6.26), (6.25) и (6.27).

На дальнем конце линии 3  $Z_H=Z_1$ , поэтому  $b_3=0$ .

После алгебраических преобразований получим

$$a_3 = \frac{U_0 e^{-\gamma_2 l_2} (1 - K_{or})}{Sh(\gamma_1 l_1) (1 + K_{or} e^{-2\gamma_2 l_2}) Z_1 / Z_2 + Ch(\gamma_1 l_1) (1 - K_{or} e^{-2\gamma_2 l_2})}. \quad (6.28)$$

Коэффициент отражения

$$K_{or} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6.29)$$

Если участок линии 2 отсутствует, то на длине  $l_1$  получим напряжение

$$U_{11} = U_0 e^{-\gamma_1 l_1}. \text{ Дополнительное затухание вследствие влияния гермоввода}$$

$$\Delta a = \ln \frac{U_0}{U_{11} - |a_3|} \quad (6.30)$$

Если значения  $l_1$  и  $l_3$  равны по 500 м, то  $Sh \gamma l_1 \cong \frac{1}{2} e^{\gamma l_1}$  и  $Ch \gamma l_1 \cong \frac{1}{2} e^{\gamma l_1}$ .

Формулу (6.28) представим в виде

$$a_3 = U_0 e^{-\gamma l_1} K_3 e^{-\gamma l_2}, \quad (6.31)$$

$$K_3 = \frac{2(1 - K_{от})}{(Z_1/Z_2 + 1) + K_{от}(Z_1/Z_2 - 1) e^{-2\gamma l_2}} \quad (6.32)$$

**Определение зависимости коэффициента распространения электромагнитной волны и затухания от частоты.** Коэффициент распространения электромагнитной волны определяем по формуле

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (6.33)$$

Этот коэффициент определим в виде слагаемых

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (6.34)$$

Коэффициент затухания при частоте меньше 25 МГц определяется в основном затуханием, обусловленным активным сопротивлением жил. Для коаксиального кабеля его определяют по формуле (6.6). Значение  $\alpha$  возрастает с увеличением частоты пропорционально  $\sqrt{f}$ , так как по такой зависимости возрастает сопротивление жил.

Коэффициент  $\beta$  рассчитываем по формуле

$$\beta \cong \omega \sqrt{\epsilon} / C_0, \quad (6.35)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $C_0 = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме.

При частоте 0,1 МГц и более  $\beta \gg \alpha$ . По экспериментальным данным в кабелях КМЖ  $\sqrt{\epsilon} = 2,15$ .

Длина электромагнитной волны в кабеле

$$\lambda = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon} f} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (6.36)$$

В табл. 6.2 приведены результаты расчета для коэффициента  $\beta_2$  в кабелях КМЖ. Для сравнения приведен также коэффициент затухания  $\alpha$  в кабеле

КМЖ-1×4. В этой же таблице приведены результаты расчетов дополнительного затухания для вставки кабеля КМЖ-1×4 по формуле (6.32).

Из этой таблицы видно, что при частоте меньше 1 МГц дополнительное затухание от гермоввода можно не учитывать. Это соответствует передаче импульсов с фронтом 1 мкс.

При более высоких частотах в результате отражения волны на стыках кабелей возникает заметное дополнительное затухание.

Таблица 6.2

Результаты расчета затухания в кабелях

Параметр	Частота $f$ , МГц			
	0,1	1	11,7	23,2
$\alpha_2$ , Неп/м	$8,06 \cdot 10^{-4}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$8,75 \cdot 10^{-3}$	0,0124
$\beta_2$ , Неп/м	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,045	0,525	1,05
$2\beta_2 l_2$ ( $l_2=1,5$ м)	0,0135	0,135	1,57	3,14
$\beta_2 l_2$	0,007	0,07	0,785	1,57
$\cos(-2\beta_2 l_2)$	1	0,99	0	-1
$\sin(-2\beta_2 l_2)$	$\cong 0$	-0,135	-1	0
$\cos(-\beta_2 l_2)$	1	1	0,705	0
$\sin(-\beta_2 l_2)$	$\cong 0$	-0,07	-0,705	-1
$ K_3 $	1	1	0,655	0,55
$ K_3 e^{-\beta_2 l_2} $	1	1	0,655	0,55
Приращение затухания, дБ $\Delta a = -20 \lg  K_3 $	$\cong 0$	$\cong 0$	2,37	5,2

Учитываем, что  $e^{-jx} = \cos(-x) + j \cdot \sin(-x)$ .

Общее затухание при передаче по кабельной цепи не должно быть больше значения, определяемого по формуле

$$a = \alpha l = 20 \lg \frac{U_0}{U_H} \cong 20 \lg \frac{12}{4} = 9,5 \text{ дБ} \quad (1,1 \text{ Неп}).$$

При длительности фронта импульса 1 мкс полоса пропускания должна быть не менее  $f_{np} = 10^6$  1/с, поэтому расчеты проводим для этой частоты.

По справочным данным подводящие кабели марки РК и РД имеют коэффициент затухания при частоте 10 МГц  $\alpha \cong 0,01-0,02$  дБ/м. При частоте 1 МГц  $\alpha \cong 0,003-0,007$  дБ/м. При суммарной длине кабелей  $l_1 + l_3 = 1000$  м получим

$a=3-7$  дБ. Дополнительное затухание от гермовводов при частоте 1 МГц невелико и его можно не учитывать.

В качестве подводящих кабелей при передаче импульсов применяют пары из кабеля марки КПоБОВ. Затухание симметричного кабеля рассчитаем по известной формуле (Неп/м)

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6.37)$$

где  $R, G$  – активное сопротивление жил и проводимость изоляции;  $L, C$  – индуктивность и емкость кабеля.

При частотах менее 25 МГц основной вклад в затухание вносит первое слагаемое в формуле (6.37). Активное сопротивление переменному току (Ом/м)

$$R = 0,167 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \left( \frac{K_C}{d} + \frac{4K_0}{D} \cdot \frac{a^2 \cdot D^2}{D^4 - a^4} \right), \quad (6.38)$$

где  $K_C$  и  $K_0$  – коэффициенты скрутки и оплетки;  $a$  – расстояние между проводниками, мм;  $d$  – диаметр проводника, мм;  $D$  – диаметр экрана пары, мм.

Для кабеля КПоБОВ:  $d=0,94$  мм (сечение  $0,7$  мм<sup>2</sup>),  $a=0,8$  мм,  $D=4,4$  мм,  $K_C=1$ ,  $K_0=1$  при  $f=10^6$  1/с. Получим  $R=0,184$  Ом/м. Волновое сопротивление  $Z \cong \sqrt{L/C} = 130$  Ом.

$$\alpha \cong 0,184 / (2 \cdot 130) = 0,000735 \text{ Неп/м} (0,0064 \text{ дБ/м}).$$

Рассчитаем затухание и волновое сопротивление кабеля КМЖ-2×1,5. Геометрические размеры:  $d=1,38$  мм,  $D=6,8$  мм,  $a \cong (D-2d)/2 = 2$  мм. Рассчитаем параметры кабеля при частоте  $f=10^6$  1/с. Активное сопротивление по (6.38)

$$R = 0,167 \cdot 10^{-3} \sqrt{10^6} \left[ 1/1,38 + (1/6,8) \cdot 2^2 \cdot 6,8^2 / (6,8^4 - 2^4) \right] = 0,123 \text{ Ом/м}$$

Волновое сопротивление определим по формуле ( $\sqrt{\epsilon} = 2,15$ )

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left( \frac{2a}{d} \cdot \frac{D^2 - a^2}{D^2 + a^2} \right) \quad (6.39)$$

Получим  $Z=49$  Ом. Если учесть, что фактическая толщина изоляции меньше указанной в ТУ получим приблизительно  $Z \cong 40$  Ом. По формуле (6.37)

$$\alpha \cong \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{2Z} = \frac{0,123}{2 \cdot 40} = 0,00154 \text{ Неп/м} (0,0134 \text{ дБ/м})$$

Значения коэффициента фазы  $\beta_2$  для всех марок кабелей соответствуют данным табл. 6.2. Для всех кабелей  $\alpha_2 \ll \beta_2$ . Поэтому выводы, которые следуют из табл. 6.2, одинаковые для всех кабелей. При частоте меньше 1 МГц затухание, вносимое гермовводом, невелико и им можно пренебрегать.

При частотах 10-25 МГц следует ожидать дополнительное затухание, вносимое гермовводом, приблизительно соответствующим данным табл. 6.2.

#### Влияние гермовводов на входное сопротивление кабельной цепи.

Входное сопротивление определяем по формулам (6.12) и (6.13)

$$U_0 = a_1 + b_1, \quad b_1 = U_0 - a_1, \quad I_0 = (a_1 - b_1)/Z_1, \quad I_0 = (2a_1 - U_0)/Z_1$$

$$Z_{\text{вх}} = U_0 / I_0 = \frac{Z_1}{2a_1/U_0 - 1} \quad (6.40)$$

Значение  $a_1$  получим из системы уравнений (6.12)-(6.27)

$$a_1 = \frac{0,5 \cdot U_0 e^{\gamma l_1} \left[ (1 + K_{\text{от}} e^{-2\gamma l_2}) Z_1/Z_2 + (1 - K_{\text{от}} e^{-2\gamma l_2}) \right]}{\text{Sh}(\gamma l_1) (1 + K_{\text{от}} e^{-2\gamma l_2}) Z_1/Z_2 + \text{Ch}(\gamma l_1) (1 - K_{\text{от}} e^{-2\gamma l_2})} \quad (6.41)$$

Если длина подводящего кабеля  $l_1$  (или  $l_3$ ) велика, то  $\text{Sh}(\gamma l_1) \cong \text{Ch}(\gamma l_1) \cong \frac{1}{2} e^{\gamma l_1}$  и тогда  $a_1 \cong 1$  и  $Z_{\text{вх}} \cong Z_1$ , то есть входное сопротивление равно волновому сопротивлению кабеля  $Z_1$ . При коротких отрезках подводящих кабелей следует рассчитывать значение  $Z_{\text{вх}}$  по формулам (6.40) и (6.41).

Если  $\gamma l_1$  стремится к нулю, то  $\text{Sh} \gamma l_1 \cong 0$  и  $\text{Ch} \gamma l_1 \cong 1$ . Тогда

$$a_1 \cong \frac{U_0}{2} \left( \frac{Z_1}{Z_2} \frac{1 + K_{\text{от}} e^{-2\gamma l_2}}{1 - K_{\text{от}} e^{-2\gamma l_2}} + 1 \right) \quad (6.42)$$

При частотах  $f < 10^6$  1/с значение  $\beta_2 l_2 / \omega < 0,1$  и тогда  $e^{-2\gamma l_2} \cong 1$ . В этом случае  $Z_{\text{вх}} \cong Z_3 \cong Z_1$ . При частотах  $10^7$  1/с и более затухание  $\alpha_1$  увеличивается и  $e^{-\gamma l_1}$  стремится к нулю. Тогда  $Z_{\text{вх}} \cong Z_1$ .

Таким образом наличие вставки из кабеля КМЖ длиной до 1,5 м при частотах  $f < 10^6$  с<sup>-1</sup> слабо влияет на общее затухание и волновое сопротивление кабельной цепи. При более высоких частотах гермоввод в виде кабеля КМЖ вносит дополнительное затухание, соответствующее данным табл. 6.2.

**ГЛАВА 7.**  
**ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ**  
**МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ УЗЛЫ**  
**В ПОЛЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Энергетические реакторы АЭС представляют собой мощные источники гамма-нейтронного излучения. Энергия выделяющихся нейтронов в таких реакторах лежит в широком интервале значений. Плотность потоков нейтронов в активных зонах достигает  $10^{17}$ - $10^{18}$   $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ , а рабочие температуры в зависимости от типа реактора – 600°C и более. В результате влияния реакторного излучения конструкционные материалы могут изменять свои свойства, вплоть до разрушения. Это выдвигает проблему обеспечения атомной энергетики материалами и изделиями, эксплуатационно-устойчивыми в условиях воздействия ионизирующего излучения. Создание надежных герметизирующих электроизоляционных узлов, используемых в системах управления и защиты (СУЗ) реакторов для подачи электрических потенциалов и токов в рабочую полость реактора, – один из важных разделов рассматриваемой проблемы.

Указанные узлы в общем случае представляют собой неразъемные металлодиэлектрические конструкции, имеющие недостаточную радиационную стойкость. Металлостеклянные узлы, например, разгерметизируются уже при интегральном потоке нейтронов  $10^{17}$  нейтр./ $\text{м}^2$ . Натекание происходит и через стекло, и через соединения металл-стекло. Как показали исследования последних лет, наиболее радиационно стойкими диэлектриками являются высокоглиноземистые керамические материалы. В литературе широко представлены результаты исследований влияния различных эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов на основные параметры керамических материалов и изделий, содержащих соединения металл-керамика.

### **7.1. Условия эксплуатации узлов в энергетических реакторах АЭС**

За счет ослабления в материалах активной зоны теплоносителя и отражателя плотность потока нейтронов за корпусом реактора снижается на два-три

порядка. Поэтому материалы и конструкции, расположенные вблизи корпуса, например, элементы системы теплоносителя первого контура, за срок службы реактора (30 лет) будут облучены нейтронами до интегральных флюенсов порядка  $10^{24}$  –  $10^{25}$  нейтр./ $\text{м}^2$ , а поглощенная ими доза излучения составит  $10^{10}$  –  $10^{12}$  Гр.

Поглощение энергии нейтронов происходит в процессе их взаимодействия с ядрами материалов и зависит от химического состава материалов, энергии нейтронов и длительности облучения. Тепловые и медленные нейтроны, сталкиваясь с атомами вещества, участвуют, главным образом, в реакциях радиационного захвата, в результате которых образуются стабильные или радиоактивные атомы примесей и газообразные продукты. Для быстрых нейтронов наиболее вероятны реакции рассеяния, вызывающие значительные радиационные дефекты в микроструктуре вещества, а следовательно, и изменение его физико-технических свойств. Поглощение сопутствующего гамма-излучения, энергия квантов которого лежит в пределах 0,4-0,28 МэВ, сопровождается ионизацией вещества.

В результате поглощения энергии реакторного излучения происходят не только ионизация и образование дефектов структуры вещества, но и повышается его температура. Температура радиационного разогрева зависит от химического состава вещества и условий его охлаждения и может достигать 600-800°C и выше. При этом происходит отжиг радиационных нарушений в веществе и тем самым повышается его стойкость к облучению. Однако некоторые виды нарушений, например, в неорганических диэлектриках, отжигаются только при температурах, превышающих 1000-1200°C. С другой стороны, продолжительный разогрев термически нестойких материалов приводит к их разрушению или расплавлению.

Металлодиэлектрические узлы, применяемые в системах управления и защиты реактора, используют чаще всего в качестве герметичных электровводов и герметичных заделок коаксиальных кабелей. В зависимости от своего на-

значения они могут быть расположены как в биологической защите реактора, так и непосредственно в его рабочем объеме. Следовательно, исходя из вышеизложенного, основными эксплуатационными факторами, влияющими на свойства материалов и конструкций узлов, является прямое взаимодействие гамма-нейтронного излучения с атомами вещества и длительное воздействие температуры радиационного разогрева. Кроме того, в период пуска и остановки реактора, предусмотренных эксплуатацией, когда происходит его разогрев и охлаждение, узлы будут дополнительно подвергаться еще и циклическому воздействию смен температур. На электроизоляционные и механические свойства и на коррозионную стойкость материалов узлов агрессивное влияние может оказывать окружающая среда, например, пароводяная смесь. В аварийных режимах узлы могут подвергаться влиянию повышенного давления, токов короткого замыкания, различных термомеханических нагрузок, а также воздействию дезактивирующих кислотно-щелочных растворов.

Устойчивость узлов к действию перечисленных факторов определяется их термомеханической, химической и, в основном, радиационной стойкостью, под которой подразумевают предельную дозу облучения или флюенс, в результате воздействия которого остается неизменным или меняется в допустимых пределах комплекс свойств, важных для конкретной области применения. Для узлов, выполняющих роль герметизирующих электроизоляционных элементов СУЗ реакторов, такими свойствами будут вакуумные и электроизоляционные характеристики (табл. 7.1 – 7.4).

Таблица 7.1

**Электрофизические характеристики высокоглиноземистой керамики**

Марка керамики	ТКЛР в интервале 20 – 900° С, (10 <sup>-7</sup> 1/°С)	σ <sub>n</sub> , МПа (при 20 °С)	Модуль Юнга E, (10 <sup>4</sup> МПа)	Удельное объемное сопротивление ρ <sub>v</sub> , Ом · м (при 300°С)
Микролит	80,0	300	39,0	10 <sup>13</sup>
ГБ-7	80 ± 5	360-400	22,2	10 <sup>16</sup>
22ХС	75 ± 5	320-360	24,6	10 <sup>16</sup>
УФ-46	40-60	200	23	10 <sup>14</sup>

Таблица 7.2

**Структурные характеристики высокоглиноземистой керамики**

Марка керамики	Содержание оксида алюминия, %	Соотношение фаз, % (остальное поры)		Температура обжига, °С
		кристаллы	стекло	
Микролит	99,34	99,0	1,0	1750
ГБ-7	97	91-92	8-9	1600
22ХС	94,64	82-86	10-12	1600
УФ-46	76,32	66-70	30-34	1350-1380

Таблица 7.3

**Химический состав (в %) некоторых керамических материалов, используемых для изготовления соединений металл-керамика**

Марка керамики	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
МК	99,40	0,03	-	-	-	0,56	0,01	-	-	-	-
ГБ-7	97,07	0,92	0,08	-	0,90	-	0,09	-	-	-	0,92
22ХС	94,40	2,76	-	-	-	-	-	-	2,35	0,49	-
УФ-46	78,65	15,37	0,42	3,02	2,16	-	0,27	0,18	-	-	-

Таблица 7.4

**Влияние излучения реактора БОР-60 на вакуумную плотность соединений металл-керамика при облучении флюенсом 4 · 10<sup>24</sup> нейтр./м<sup>2</sup> (E<sub>n</sub> > 0 МэВ) и 1,7 · 10<sup>24</sup> нейтр./м<sup>2</sup> (E<sub>n</sub> > 0,1 МэВ)**

марка керамики	Характеристика соединений			Кол-во образцов	Кол-во годных образцов, после облучения
	состав металл. пасты	марка припоя	тип спая		
МК 94-1	№ 2	серебро	охват.	14	14
ВК 94-1	№ 2	-:-	торц.	6	6
			охват.	8	8
УФ-46	№ 4	-:-	торц.	3	3
			охват.	11	11
МК	№ 1	-:-	торц.	2	2
			охват.	2	2

**7.2. Физико-технические свойства конструкционных материалов узлов в исходном и облученном состоянии**

Вакуумные свойства конструкционных материалов определяются газопроницаемостью и такими параметрами как термостойкость, неизменность геометрических размеров и температурного коэффициента линейного расширения

(ТКЛР), прочность при изгибе и растяжении, модуль Юнга и коэффициент Пуассона [69]. Вместе с тем диэлектрические материалы, используемые для изготовления деталей узлов, должны обладать способностью образовывать вакуум-плотные, механически прочные и термостойкие соединения с металлами. К таким материалам, прежде всего, относят вакуум-плотные стекла и керамика. В то же время стекла, как отмечалось выше, характеризуются невысокой радиационной стойкостью. Из-за низкой термомеханической прочности ограниченно используются стеатитовые и форстеритовые вакуум-плотные и радиотехнические керамические материалы, а из-за высокой токсичности - из окиси бериллия и бериллиевые материалы. Наибольшее распространение в качестве конструкционного диэлектрического материала получила высокоглиноземистая керамика.

**Керамика.** Основные электрофизические свойства и особенности структуры отечественной высокоглиноземистой керамики различных марок приведены в табл. 7.1 и 7.2.

Установлено, что техническая прочность керамики почти на два порядка ниже теоретической. Это обусловлено двумя причинами: наличием в материале микродефектов структуры и воздействием поверхностно-активных веществ (например, воды), адсорбирующихся из окружающей среды и способствующих развитию поверхностных дефектов. Прочность керамики 22ХС [70] относительно значения прочности на воздухе уменьшается при воздействии воды, нагретой до температуры 100°С, примерно на 34%.

Прочность керамики различных марок при сжатии очень высокая и составляет 2000-4000 МПа, в то же время прочность при изгибе не превышает 400 МПа, а прочность при разрыве в 1,5-2 раза ниже прочности при изгибе. Модуль упругости керамических материалов зависит от химического состава, пористости материалов и температуры [70]. С ростом температуры он снижается.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) керамики как многофазного тела зависит от ТКЛР ее фаз, их плотности и относительной концентрации (по массе) и не зависит от количества пор в материале.

Удельное объемное сопротивление керамики любой марки при температуре 100°С составляет не менее  $1 \cdot 10^{16}$  Ом м. С ростом температур от комнат-

ной до 600°С оно снижается на четыре-пять порядков. Поверхностное сопротивление керамики типа УФ-46 резко снижается при наличии на ее поверхности тонкого слоя загрязнений и в условиях повышенной влажности. Сопротивление изоляции такой керамики изменяется от  $10^{14}$  Ом при относительной влажности 35% до  $10^8$  Ом при 80%.

Керамические материалы довольно устойчивы к воздействию щелочей и кислот.

Радиационная стойкость высокоглиноземистой керамики определяется ее составом, радиационной стойкостью кристаллической и аморфной фаз, условиями облучения, технологией изготовления и др. В составе керамики нежелательно наличие элементов с большим сечением захвата, таких как В<sup>10</sup>.

Кристаллическая фаза высокоглиноземистой керамики – корунда ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – характеризуется высокой радиационной стойкостью. Установлено, что основным эффектом облучения является анизотропия роста кристаллов, что отражается на плотности материала.

Результаты облучения образцов высокоглиноземистой керамики различных марок в реакторе ВВР при температурах до 200°С и флюенсах  $2 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> показывают, что механическая прочность керамики марок МК, ГБ-7, УФ-46 после облучения флюенсом быстрых нейтронов до  $2 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> [71] изменяется незначительно. Для керамики УФ-46 она снижается всего на 14%.

Радиационная составляющая проводимости при облучении [71, 72] определяется ионизационной способностью излучения. При облучении алюмооксидной керамики в реакторе нейтронной составляющей проводимости при малых флюенсах можно пренебречь. Следовательно, в этом случае величину радиации целиком определяет гамма-составляющая излучения. Облучение керамики 22ХС до флюенса  $5 \cdot 10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup> [73] приводит к снижению значения  $\rho_v$  на один порядок (измерение проводилось после спада активности образца).

Как видно, по своим термомеханическим, электроизоляционным и химическим свойствам в исходном и облученном состоянии вакуум-плотная алюмооксидная керамика превосходит электровакуумные стекла. Поэтому в конст-

рукциях радиационно стойких МКУ в качестве диэлектрика предпочтительнее использовать керамические материалы.

**Металлы и сплавы.** Конструкционные металлы, применяемые для изготовления элементов МКУ, должны быть газонепроницаемыми при малой толщине (0,3-0,5 мм), сохранять механическую прочность и формоустойчивость деталей до температур эксплуатации узлов, поддаваться различным видам технологической обработки [74]. Для обеспечения высокой термомеханической прочности узлов необходимо хорошее согласование ТКЛР соединяемых металлов и диэлектрических материалов. Величина напряжений в таких соединениях зависит от степени согласованности ТКЛР материалов, а также от модулей упругости материалов, поэтому металлы и припой должны обладать низким модулем упругости и высоким значением относительного удлинения [75].

Металлы и сплавы по сравнению с другими материалами обладают наименьшей чувствительностью к воздействию излучений. Для большинства из них изменение свойств при облучении нейтронами становится заметным лишь при значениях флюенсом  $10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Металлы могут являться источниками излучений за счет наведенной радиоактивности, чему способствует наличие в их составе таких элементов как Mn, Co, Fe и др. Радиохимический расчет активности деталей из железоникелевых сплавов [76] показал, что новые элементы в них образуются в незначительных количествах. Минимальной активностью обладает никель. Излучение может влиять на поверхностные химические реакции в металлах и стимулировать их коррозию при контакте с различными жидкими и газообразными средами. В результате твердость металлов, как правило, возрастает. При флюенсе  $(2 - 6,4) \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> твердость железа, никеля, меди повышается более чем в 2 раза, а молибдена возрастает лишь на 10-20%. Исследование [77] влияния нейтронного облучения до  $\Phi_{\text{б.н.}} \approx 1,7 \cdot 10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup> и  $\Phi_{\text{т.н.}} \approx 4,6 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> на механические свойства и рост зерна в чистой меди показали, что при температуре 600°C справедливо линейное соотношение между величиной уменьшения пластичности и флюенсом нейтронов. При облучении меди флюенсом с  $5 \cdot 10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup> и температуре 20°C предел прочности меди увеличивается с 1,9 до 2,4 МПа, а равномерное удлинение сни-

зилось с 42 до 27%. Такой же характер изменения указанных свойств наблюдался у никеля.

Облучение молибдена при флюенсе  $10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> приводит к его охрупчиванию. Определение механических характеристик облученных сталей показало, что с ростом флюенсов от  $10^{17}$  до  $10^{20}$  нейтр./см<sup>2</sup> увеличиваются их прочность и предел текучести, а пластичность снижается. Отжиг железа, облученного флюенсом  $10^{25}$  нейтр./м<sup>2</sup>, при температуре 250°C приводит к его разупрочнению [78].

### **7.3. Технологические факторы и их взаимосвязь с определяющими параметрами радиационной стойкости металлокерамических узлов**

Создание надежных вакуум-плотных МКУ различного назначения, кроме выбора конструкционных материалов, предусматривает выбор способа изготовления соединений металл-керамика. В общем случае рассматривают два способа – одноступенчатый и многоступенчатый.

К одноступенчатому способу относятся активная пайка, пайка под давлением, пайка стеклоприпоями и сварка – диффузионная, электронно-лучевая и лазерная.

Многоступенчатый способ пайки керамики с металлами наиболее хорошо изучен и нашел самое широкое применение в промышленных условиях. При этом способе керамические детали предварительно металлизуют пастами на основе молибдена с различными активизирующими добавками – Mn, Si, Mo<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiN<sub>4</sub> и др. Механизм взаимодействия металлизированной пасты с керамикой при вжигании объясняется теорией химического взаимодействия [79, 80] и теорией миграции стеклофазы керамики в металлизующее покрытие.

Металлизующее покрытие в процессе пайки керамики с металлами не должно образовывать с жидкими припоями хрупких соединений или разрушаться под их воздействием. При смачивании металлизующего покрытия припоем последний создает капиллярное давление на его диэлектрическую фазу, которая, если она переходит в жидкое состояние при температуре пайки, может быть вытеснена, и тем самым могут быть разрушены созданные при вжигании связи покрытия с керамикой. Время вытеснения стеклофазы из промежутков между зернами молибдена и заполнения их припоем, например, для

керамики 22ХС, невелико и составляет несколько секунд. Поэтому прочность таких образцов, паянных медью, имеет широкий разброс значений от 22 до 200 МПа [74]. Есть данные о составах металлизированных паст для керамики 22ХС, менее критичных к режимам пайки медным припоем и позволяющих получать термостойкие спаи даже при пятиминутной выдержке.

Взаимодействие нейтронного излучения, главным образом тепловых нейтронов, с материалами металлизующих покрытий и припоев может привести к образованию в них новых химических элементов (стабильных и радиоактивных) и газообразных продуктов, которые способны ухудшить вакуумную плотность соединения металл-керамика или ослабить его прочность.

Кремний, алюминий, магний и кислород, входящие в состав покрытия, при взаимодействии с нейтронами не дают большого выхода радиоактивных продуктов и инертных газов [72]. При облучении молибдена тепловыми нейтронами образуются радиоактивные изотопы.

Активность металлизующего покрытия объемом  $10^{-6} \text{ м}^3$ , в состав которого входит 80% молибдена, облученного флюенсом  $3 \cdot 10^{23} \text{ нейтр./м}^2$ , будет состоять из активности изотопа  $\text{Mo}^{93}$ , равной  $8 \cdot 10^8 \text{ Бк}$ , и активности изотопа  $\text{Mo}^{99}$ , равной  $3 \cdot 10^{11} \text{ Бк}$ . Поскольку количество молибдена в металлизированных пастах различного состава приблизительно одинаково, то и активность паст будет близкой по величинам.

Значительное газовыделение в покрытиях обусловлено присутствием в них  $\text{LiF}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ .

Радиохимический расчет припоев из чистых металлов – серебра, меди и их сплава ПСр 72, показал, что они практически не дают газообразных продуктов. Однако припой на основе серебра подвержены значительным радиохимическим изменениям. При облучении флюенсом  $3 \cdot 10^{23} \text{ нейтр./м}^2$  в результате взаимодействия нейтронов с серебром образуется до  $2 \cdot 10^{11} \text{ кг/м}^3$  изотопов  $\text{Cd}^{108}$  и  $\text{Cd}^{110}$ . Переход серебра в кадмий в таких количествах может сказаться на вакуумной плотности спая.

Облучение ускоряет процессы диффузии. Это может сказаться на характеристиках соединений металл-керамика.

#### 7.4. Влияние эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов на основные параметры узлов при облучении

В работе [73] образцы спаев керамики 22ХС (цилиндры диаметром  $15 \times 8 \text{ мм}$ ) с коваровыми и медными деталями облучались в реакторе ИРТ-200. При этом плотность потока тепловых нейтронов составляла  $(1,6 - 2,7) \cdot 10^{16} \text{ нейтр./(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Образцы облучались до флюенса  $5 \cdot 10^{21} - 5 \cdot 10^{22} \text{ нейтр./м}^2$  и исследовались после спада активности через 4-6 месяцев. При изменении установлено, что механическая прочность спаев на изгиб практически не изменилась, сохранилась также и их вакуумная плотность.

Образцы узлов, изоляторы которых были изготовлены из керамики, содержащей 96% оксида алюминия, и соединены охватывающим и охватываемым спаями с коваровыми обоймами, подвергались облучению. При флюенсе  $10^{24} \text{ нейтр./м}^2$  в этих спаях наблюдалось начало растрескивания изоляторов по мере «распухания» керамики. Узлы сохраняли герметичность до флюенса  $6,8 \cdot 10^{24} \text{ нейтр./м}^2$ . При флюенсе  $1,7 \cdot 10^{25} \text{ нейтр./м}^2$  в образцах создавались очевидные пути разгерметизации [81].

В работе [82] представлены данные по радиационной стойкости проходного металллокерамического узла, изолятор которого изготовлен из керамики ГМ, содержащей 99,6% оксида алюминия, а металлические детали из ковара. Спай цилиндрический охватывающий выполнен медью. Изделия испытывались в активной зоне исследовательского реактора ИВВ-2. Плотность потока тепловых нейтронов составляла  $10^{17} \text{ нейтр./(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Радиационный нагрев не превышал  $150^\circ\text{C}$ . Нарушение герметичности спаев узлов, которую определяли по вольт-амперным характеристикам гамма-камеры, где исследовались узлы, произошло через 3100 ч. эксплуатации при флюенсе тепловых нейтронов  $1,3 \cdot 10^{24} \text{ нейтр./м}^2$  и дозе гамма-облучения  $7 \cdot 10^9 \text{ Гр}$ .

МКУ с изоляторами из керамики ГБ-7 и микролита, по данным [76], облучались до флюенса  $2 \cdot 10^{22} \text{ нейтр./м}^2$ . Металлические детали узлов с изоляторами из керамики ГБ-7 были изготовлены из сплава 42Н, а металлические детали узлов с микролитовыми изоляторами – из никеля. Вакуумная плотность

МКУ проверялась до и после облучения с помощью гелиевого течеискателя ПТИ-6. После облучения вакуумную плотность потеряли 50% узлов, изоляторы которых были изготовлены из керамики ГБ-7, а из десяти узлов с изоляторами из микролита вакуумную плотность сохранили только три. Причиной потери герметичности узлов с изоляторами, изготовленными из керамики ГБ-7, могло быть газовыделение с поверхности керамики при облучении, приводящее к нарушению сцепления покрытия с керамикой, по-видимому, сквозных волосяных трещин. Для узлов с изоляторами из микролита вероятной причиной появления сквозных пор в спае являются радиохимические процессы в серебряном припое, связанные с образованием значительного количества кадмия.

В работе [82] исследовались герметичность металлокерамических гермовводов с охватывающими спаями, изоляторы которых были изготовлены из микролита, а металлические детали – из ковара и железоникелевого сплава. Пайка узлов выполнена медью по металлизующему покрытию, содержащему молибден и марганец. Герметичность узлов определялась по перепаду давления гелия, который подавался в канал реактора и во внутреннюю полость образцов. Изучение микрошлифа зоны соединения и изменение микротвердостей металла показали, что вероятной причиной потери герметичности при облучении до флюенса  $5 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> явилось увеличение рассогласования ТКЛР материалов соединения, а также воздействие на соединение рабочего перепада давления и циклического изменения температуры, имеющего место в связи с периодичностью работы реактора.

Как следует из опубликованных данных, исследованные металлокерамические узлы различались по геометрическим размерам, их изоляторы были изготовлены из различных керамических материалов, изучение радиационной стойкости проводилось в основном в исследовательских реакторах и по различным методикам.

Для систематизации результатов особый интерес представляет исследование однотипных узлов, содержащих основные виды соединения металл-керамика, изготовленных по промышленной технологии. Кроме того, изучение

узлов должно проводиться непосредственно в процессе облучения в реакторах, спектр излучения которых был бы близок к спектру излучения энергетических реакторов АЭС.

### **7.5. Технология изготовления паяных металлокерамических соединений**

Для изготовления элементов соединения металл-керамика, предназначенных для эксплуатации в реакторных условиях, необходимо выбирать материалы, стойкие к воздействию ионизирующих излучений и повышенных температур. Керамические материалы должны обладать способностью образовывать надежные вакуум-плотные соединения с металлами. Металлы должны быть коррозионно-стойкими. Кроме того, учитывая серийность производства узлов, материалы должны быть технологичными при различных видах обработки, пригодными для производства в требуемом ассортименте и по промышленной технологии.

Исходя из условий эксплуатации соединений и требований к технологичности изготовления их элементов, в качестве материалов для металлокерамических деталей выбраны наиболее широко применяемые в металлокерамических конструкциях коррозионно-стойкие железоникелевые сплавы 42Н, 29НК и никель в виде лент, кругов и трубок. Эти материалы имеют высокую стойкость, хорошо обрабатываются резанием и холодной штамповкой, легко паяются и свариваются.

В качестве материалов диэлектрических элементов соединений взяты керамические материалы УФ-46 и ВК94-1 (22ХС), технологический процесс изготовления которых полностью отработан в промышленных условиях. Кроме того, эти материалы имеют более низкую температуру обжига по сравнению с высокоглиноземистой керамикой других марок. Для более полного изучения поведения соединений металл-керамика в полях ионизирующих излучений был выбран также микролит – группа VII а-3 по ГОСТ 5458-75. Указанные марки керамики представляют три основные группы вакуум-плотных керамических материалов, различающихся структурно-фазовыми составами и процентным содержанием  $Al_2O_3$  (см. табл. 7.2). Следует отметить также, что механические,

электроизоляционные и тепловые свойства рассматриваемых керамических материалов практически полностью исследованы в полях ионизирующих излучений.

Исследованием микроструктуры полученных материалов установлено следующее:

1) по фазовому составу керамика МК содержит 99% кристаллофазы и 1% стеклофазы. Микроструктура керамики однородная, среднезернистая. Основное количество кристаллов ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) имеет размеры  $6 \times 6$  мкм;

2) кристаллофаза керамики ВК 94-1 занимает 80-85% объема, стеклофаза вместе с порами – остальную его часть. Кристаллы корунда размером от 10 до 20 мкм составляют около 70-75%. Порядка 20 % объема приходится на кристаллы размерами менее 10 мкм, остальные кристаллы имеют размеры до 30 мкм. Форма кристаллов призматическая;

3) керамика УФ-46 обладает мелкозернистой однородной структурой. Размер зерен корунда в основном от 2 до 6 мкм. Встречаются отдельные кристаллы призматической формы размерами  $3 \times 8$  мкм и поры с сечением до 1-2 мкм.

Как видно, исследуемые материалы имеют оптимальную структуру для получения соединений металл-керамика по многоступенчатой технологии, что подтверждается данными других работ [74, 83].

Металлизация керамических деталей осуществлялась пастами, применяемыми в промышленных условиях для выбранных керамических материалов.

Состав пасты № 1 для керамики УФ-46: Мо – 80%, Мп – 20%, плавень ПК-125 – 20 %. Состав пасты № 2 для керамики ВК 94-1: Мо – 80%, Мп – 20%. Состав пасты № 3 для керамики МК: Мо – 72%, Мп – 20%, стекло С-48-1 – 8%.

С целью исключения помола молибдена, повышения его химической активности и обеспечения максимальной однородности частиц молибденовый порошок для приготовления паст был получен способом восстановления молибденового ангидрида в среде сухого водорода.

Металлический марганец марок МРО или МРОО и стекло СВ-48-1 измельчались в шаровых мельницах в среде спирта до порошков с частицами размером не более 1 мкм.

В качестве связующего применялся биндер-раствор коллоксилина целлюлоидного в амилацетате.

Смешивание компонентов паст производится в стальных барабанах валковых мельниц с помощью твердосплавных шаров ВК при соотношении масс шаров и компонентов 2:1. Количество биндера составляло 23-25% от массы порошков.

Подготовка поверхностей изоляторов перед металлизацией предусматривает обезжиривание, травление в соляной кислоте, промывку в холодной воде и сушку в термокамере при температуре 150-200°C. При нанесении металлизующей пасты на поверхность изолятора толщина покрытия должна составлять 50-50 мкм.

Вжигание металлизующей пасты проводится в водородных электропечах проходного типа в среде формиргаза при соотношении водорода и азота 1:2 и при выдержке в зоне с наибольшей температурой 20-30 мин. Температура вжигания пасты для керамики МК составляет  $(1360 \pm 20)^\circ\text{C}$  и для керамики УФ-46 –  $(1180 \pm 20)^\circ\text{C}$  по точке росы.

Для растекания припоя на металлизированные поверхности изоляторов наносится никелевое покрытие химическим или гальваническим путем. Толщина покрытия под пайку серебряным припоем СР 999,9. В составляет 6-9 мкм, а под пайку медным припоем – 5-15 мкм.

Пайка металлокерамических узлов также выполнялась в проходных печах. Металлизация керамики ВК 94-1 под пайку медью осуществлялась пастой № 4, содержащей, кроме молибдена, спек системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MnO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$  (10,0 – 11,2 %) и  $\text{CaO}$  (4,0 – 4,8 %). Эта паста менее критична к воздействию припоя при выдержки в зоне пайки до 8-10 мин. Температура вжигания пасты составляет  $(1380 \pm 20)^\circ\text{C}$ .

Для предотвращения агрессивного воздействия на металлизующее покрытие смеси Fe – Ni – Co – Cu, образующееся при пайки медью керамики с коваром, детали из ковара подвергались защите гальванического никеля толщиной 9-15 мкм.

Пайка соединений металл-керамика выполнялась в среде сухого водорода, точка росы которого на входе в печь не превышала минус  $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ . При-

пой – медный и серебряный – использовались в виде проволоки диаметром 0,5 мм и фольги толщиной 0,1 мм.

Представленный технологический процесс изготовления соединений металл-керамика аналогичен процессам, применяемым в промышленности.

По прочности сцепления металлизующего покрытия с керамикой обычно определяют уровень технологии изготовления соединений. Образцы, на которых определяют прочность соединений на статический изгиб, представляют собой керамические трубки, соединенные в торец пайкой. Оптимальная ширина зоны пайки обеспечивалась геометрическими размерами трубок: наружный диаметр – 14 мм, внутренний – 6 мм. Длина трубок  $(35 \pm 2)$  мм. Расстояние между опорами при испытании образцов 50 мм. Нагрузка прикладывалась в месте спая трубок (3-точечная схема).

Образцы для исследования прочности соединений при растяжении – это попарно соединенные через коваровую шайбу толщиной 0,5 мм керамические полувосьмерки. Крепление образцов в захватах разрывной машины свободное, что исключает их перекос при испытании. Нагрузка прикладывается вдоль оси образцов перпендикулярно к сечению области спая. Скорость движения захватов  $1,6 \cdot 10^{-4}$  м/с.

Прочность при изгибе соединений металл-керамика ВК 94-1, металлизированных пастой № 2 и спаянных припоем ПСр 72, составляет  $(131 \pm 3)$  МПа, а при растяжении –  $(75,1 \pm 1,5)$  МПа. Прочность при растяжении таких соединений, металлизированных пастой № 4 и спаянных медью, составляет  $(75,3 \pm 1,3)$  МПа. Прочность при растяжении соединений металл-керамика УФ-46, паяных припоем ПСр 72, равна  $(38,5 \pm 3)$  МПа. Приведенные значения прочности соединений для обеих керамик хорошо согласуются с литературными данными.

### 7.6. Внутриреакторные испытания основных типов соединений металл-керамика

Для получения сравнительных данных по радиационной стойкости соединений проводились исследования однотипных образцов в идентичных реакторных условиях.

Образцы были изготовлены из выбранных керамических материалов, с охватывающими и торцевыми соединениями (рис. 7.1), по одной технологии. Металлические детали изготовлены из сплава 29 НК. Трубки имеют на боковой поверхности отверстия для откачки полости образцов при их испытании на вакуумную плотность. Диаметр трубки – 2 мм. Пайка всех элементов образцов

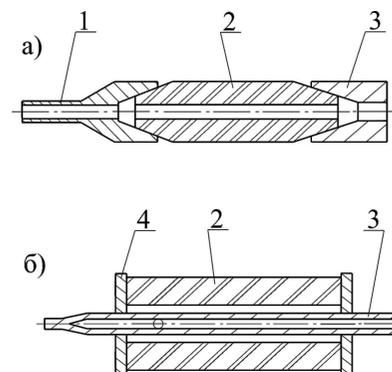


Рис. 7.1. Схемы размещения элементов металлокерамического образца: а – с охватывающими спаями металл-керамика; б – с торцевыми спаями металл-керамика; 1 – колпачок; 2 – изолятор; 3 – трубка; 4 – шайба.

выполнена серебром и медью. Максимальный диаметр образцов соединений составлял 6,0 и 7,5 мм, соответственно. Высота (без учета длины трубки) для образцов с охватывающими соединениями 30 мм, с торцевыми – 20 мм.

Наибольшие габаритные размеры образцов выбраны с учетом сечений и длины рабочих участков экспериментальных каналов исследовательских реакторов. Диаметры таких каналов обычно не превышают 50-100 мм. Кроме того, учитывается высокая стоимость внутриреакторных исследований. По этой причине в канал необходимо загружать возможно большее количество образцов для получения достоверных результатов.

Вакуумная плотность исследуемых образцов проверялась методом 401 – 2,2 по ГОСТ 20.57.406 – 81 с помощью гелиевого течеискателя ПТИ-10 (ГОСТ 22261-82), регистрирующего минимальный поток гелия  $1,3 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup> Па/с.

Поскольку стандартизированные методики исследования вакуумной плотности узлов в процессе реакторного облучения отсутствуют, в настоящей работе были использованы методики, специально разработанные сотрудниками Научно-исследовательского института атомных реакторов им. В.И. Ленина и Института ядерной физики АН УзССР. В зависимости от типа реактора применялись различные конструкции облучательных устройств (рис. 7.2).

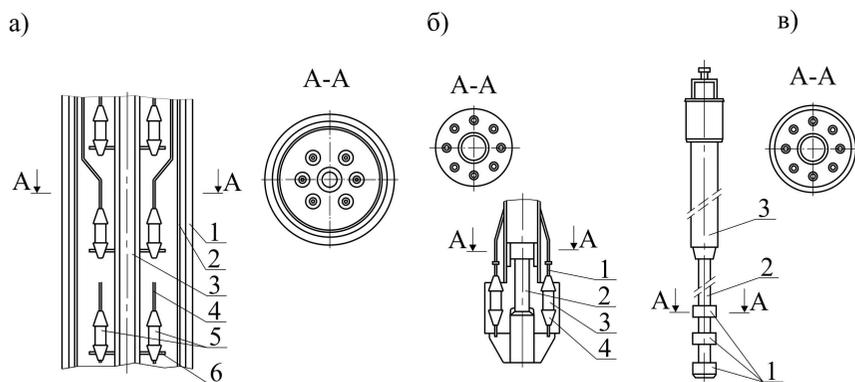


Рис. 7.2. Устройства для облучения:

а – реактор СМ-2; 1 – корпус канала; 2 – разделитель; 3 – подвеска; 4 – измерительная трубка; 5 – решетка. б – реактор РБТ-6; 1 – измерительная трубка; 2 – навеска; 3 – блок с гнездами для образцов; 4 – образцы. в – реактор БОР-60; 1 – стакан с образцами; 2 – штанга; 3 – пробка биозащиты; 4 – фланец; 5 – газовые и термопарные линии; 6 – головка.

Рабочий участок для облучения образцов в каналах реактора СМ-2 (рис. 7.2.а) выполнен в виде решетки из нержавеющей стали, а рабочий участок устройства, используемого в реакторе РБТ-6 (рис. 7.2.б), представляет собой алюминиевый блок цилиндрической формы с гнездами для образцов. Образцы размещались на нескольких этажах на разной высоте относительно центра активной зоны или на одном этаже в зависимости от заданных условий облучения и количества образцов. К каждому образцу припаивалась измерительная трубка, которая вторым концом присоединялась к системе подачи газообразного гелия или к системе вакуумирования.

Для контроля перепада температуры на всех этажах по радиусу облучательного устройства в реакторе СМ-2 было установлено по две хромель-алюмелевые термопары.

Методика исследования вакуумной плотности в реакторе СМ-2 основывалась на том, что на соединениях создавался перепад давления  $(1 - 20) \cdot 10^5$  Па за счет заполнения внутренней полости образцов гелием. После заполнения системы линия подвода гелия перекрывалась. Давление гелия в канале устанавливалось заведомо меньше и поддерживалось с точностью  $0,5 \cdot 10^5$  Па.

При исследовании образцов в реакторе РБТ-6 в канале, куда помещалось устройство с образцами, создавалось давление гелия 0,2 МПа, а во внутренних полостях образцов и в системе вакуумирования – разрежение до  $10^{-2}$  МПа. Натекание гелия в полость образцов фиксировалось гелиевым течеискателем ПТИ-7А.

Облучательное устройство, используемое в реакторе БОР-60, имело иную конструкцию (рис. 7.2.в). Оно состояло из трех, соединенных между собой, стаканов высотой до 60 мм, в которых размещались исследуемые образцы. Расстояние между стаканами составляло 113 мм. Внутренние полости стаканов были соединены между собой и выполняли роль контрольной камеры, герметичной относительно канала. Образцы и контрольная камера соединялись со стендом нагружения, с помощью которого в них создавалось давление равное  $3,14 \cdot 10^5$  Па, а в контрольной камере – порядка  $1,11 \cdot 10^5$  Па.

Контроль давления и фиксация момента разгерметизации осуществлялись по показаниям электроконтактных манометров, установленных в газовых линиях нагружения каждого образца. Сигналы с установок манометров были заведены в схему световой и звуковой сигнализации. Табло звуковой и световой сигнализации выдавало информацию о моменте разгерметизации каждого образца.

Контроль температуры исследуемых образцов, размещенных в стаканах, осуществлялся хромель-алюмелевыми термопарами, закрепленными на корпусах стаканов. Сигналы с термопар заводились на автоматический самопишущий потенциометр. Вследствие небольшого энерговыделения в активной части вертикальных экспериментальных каналов реактора БОР-60, равного 0,02 Вт/г, температура образцов практически равнялась температуре стенок стаканов.

Перед установкой в канал проводилась проверка вакуумной плотности образцов и камеры с помощью гелиевого течеискателя. После установки камеры с образцами в канал и достижения образцами температуры  $350^\circ\text{C}$ , за счет выхода реактора на номинальную мощность, на соединениях создавался рабочий перепад давления.

При сохранении герметичности соединений в процессе испытаний манометры в линиях нагружения не изменяли своих показаний. При разгерметизации происходила утечка гелия из полости образцов в камеру, и первоначально установленный перепад давления уменьшался в соединениях. При незначительных дефектах спад давления происходил медленно. Увеличение скорости разгерметизации свидетельствовало о росте микротрещин. Скорость разгерметизации определялась по формуле

$$V_{\text{раз}} = (p_1 - p_2) / \tau,$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление на соединениях образцов в начале и в процессе испытаний, соответственно, Па;  $\tau$  – время, с.

Для исследования вакуумной плотности образцов в процессе облучения в вертикальном канале реактора ВВР-СМ собирался специальный канал, изготовленный из слабоактивированного материала – сплава САВ-1. До монтажа к образцам припаивались измерительные трубки, которые после установки образцов в канал выводились к патрубкам внешнего фланца. Патрубки соединялись со стендом, содержащим коммутационную схему контроля каждого образца, индивидуально. Схема состояла из гребенки с пятью отводами, на каждом из которых находился вакуумный вентиль. Гребенка подсоединялась к гелиевому течейскаателю. В канале трубка напуска гелия соединялась со схемой наполнения.

Перед погружением образцов в канал реактора проводились холостые испытания канала с образцами на вакуумную плотность, при этом он подвергался десятикратному нагреву до температуры 200°C, продолжительностью около 3 час. После установки канала в реактор проверялась герметичность всей схемы. В процессе испытаний образцы постоянно откачивались. Проверка вакуумной плотности первые сутки осуществлялась через каждые два часа, а затем 1 раз в сутки. При выходе реактора на номинальную мощность температура радиационного разогрева образцов достигала приблизительно 100°C, т.к. канал реактора находился в воде. Дальнейший подъем температуры образцов осуществлялся с помощью вмонтированного в канал электронагревателя.

### 7.7. Условия и результаты облучения исследуемых соединений в реакторах

Испытаниям в реакторе РБТ-6 подвергались 8 образцов (рис. 7.1.а), изоляторы которых изготовлены из керамики МК и металлизированы пастой № 3. Припой – медь. Условия облучения: плотность потока быстрых нейтронов с  $E_n$  больше 0,1 МэВ составляла приблизительно  $5,6 \cdot 10^{17}$  нейтр./( $\text{м}^2 \text{ с}$ ); температура облучения не превышала  $(130 \pm 10)^\circ\text{C}$ ; давление гелия в канале приблизительно равно 0,2 МПа; разрежение во внутренних полостях образцов приблизительно до  $10^{-2}$  МПа. Образцы облучались до максимального флюенса  $5,1 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $\text{м}^2$ .

Вакуумная плотность всех образцов сохранилась.

Облучению в реакторе ВВР-СМ подвергались образцы (рис. 7.1.а), изготовленные из керамики МК (2 образца), ВК 94-1 (2 образца) и УФ-46 (2 образца), металлизированных соответственно пастами № 3, 4 и 1. Припой – медь. Характеристики рабочего канала реактора ВВР-СМ: плотность потока быстрых нейтронов  $1,6 \cdot 10^{16}$  нейтр./( $\text{м}^2 \text{ с}$ ); мощность поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения 10 Гр/с; максимальная температура облучения при мощности реактора 10 МВт около 200°C; максимальный флюенс облучения  $1,3 \cdot 10^{23}$  нейтр./ $\text{м}^2$ ; время облучения 1000 часов. Натекание соединений определялось с помощью гелиевого течейскаателя ПТИ-7А. Натекания гелия через соединения не обнаружено.

В вертикальном экспериментальном канале БОР-60 образцы соединений облучались при следующих условиях: плотность потока нейтронов  $4 \cdot 10^{17}$  нейтр./( $\text{м}^2 \text{ с}$ ), а с энергией  $E_n$  больше 0,1 МэВ –  $1,8 \cdot 10^{17}$  нейтр./( $\text{м}^2 \text{ с}$ ); время облучения – 2400 час. при номинальной мощности реактора; перепад давления канал-образец 0,2 МПа. Характеристики образцов и результаты исследований их вакуумной плотности представлены на рис. 7.1. и в табл. 7.4. Испытаниями установлено, что герметичность соединений сохранялась в течение всего эксперимента.

### 7.8. Анализ результатов реакторного облучения соединений металл-керамика

Сопоставление литературных и экспериментальных результатов показало, что основные типы соединений металла с керамикой ВК 94-1, изготовленные по выбранной технологии пайкой серебром и медью, являются радиацион-

но стойкими в условиях реакторного облучения до флюенса  $\approx 4 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Анализируя результаты, приведенные в работе [84], можно предположить, что охватывающие соединения керамики ВК-94-1, паянные медью, должны сохранять вакуумную плотность при облучении до флюенсов  $10^{25}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

В результате исследований радиационной стойкости соединений керамики УФ-46 установлено, что при облучении в реакторах ВВР-СМ и БОР-60 охватывающие и торцевые соединения, паянные серебром, сохраняют свои вакуумные свойства до  $\Phi_{обл.} = 4 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>. При этом максимальная плотность потока нейтронов составляет  $4 \cdot 10^{17}$  нейтр./(м<sup>2</sup> с) а  $T_{обл.} = 300 - 340^\circ\text{C}$ . Охватывающие соединения, выполненные пайкой медью, остаются вакуум-плотными при плотностях нейтронных потоков  $1,6 \cdot 10^{16}$  нейтр./(м<sup>2</sup> с) и  $T_{обл.} = 200^\circ\text{C}$  до флюенса  $1,3 \cdot 10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Дальнейшее облучение этих соединений не проводилось.

Герметичность паянных медью охватывающих соединений керамики ГМ, содержащей около 99,7% оксида алюминия, нарушается при облучении до флюенса тепловых нейтронов  $\approx 1,3 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>. При этом  $I_{т.н.} = 10^{17}$  нейтр./(м<sup>2</sup> с);  $I_{б.н.} \approx 5 \cdot 10^{16}$  нейтр./(м<sup>2</sup> с);  $T_{обл.} = 150^\circ\text{C}$ , а поглощенная доза  $\gamma$ -излучения  $7 \cdot 10^9$  Гр [82].

Анализируя результаты исследования спаев металл-керамика МК, можно сделать следующие выводы:

радиационная стойкость соединений керамики МК, металлизированных пастой № 3, значительно выше стойкости соединений этой же керамики, металлизированных пастой на основе карбидов вольфрама [76];

охватывающие соединения керамики МК небольших размеров (диаметром около 5 мм), паянные серебром и медью, работоспособны при облучении до флюенсов  $\approx 4 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Это подтверждается также данными работы [73];

радиационная стойкость соединений керамических материалов этой группы, как видно из работ разных авторов, находится на уровне флюенса  $10^{22}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

Более низкая радиационная стойкость соединений керамических материалов группы МК с металлом по сравнению с соединениями керамики УФ-46

и ВК 94-1 объясняется, по-видимому, практически полным отсутствием в их составе стеклофазы (табл. 7.2). Стеклофаза выполняет роль компенсатора напряжений, возникающих в керамике при облучении до больших флюенсов. Кристаллофаза (поликристаллическая окись алюминия) при облучении до флюенсов  $\approx 10^{25}$  нейтр./м<sup>2</sup> имеет заметное объемное расширение, увеличивающееся с ростом температуры. Стеклофаза при облучении в зависимости от химического состава может сжиматься за счет увеличения ее плотности. В результате может наступить такое распределение напряжений, когда керамический материал, содержащий стеклофазу, при облучении будет упрочняться (компенсационный эффект) [71, 76]. Этим можно объяснить установленную более высокую механическую прочность при изгибе керамики УФ-46, содержащей 30-34% стеклофазы, при ее облучении до флюенса  $4,2 \cdot 10^{25}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

Известно, что качество соединений металл-керамика определяется не только макросвойствами (механической прочностью при изгибе и растяжении, термостойкостью), но и микроструктурой переходных слоев. Микроструктура соединений, полученных по многоступенчатой технологии, исследовалась довольно подробно петрографическим методом на аншлифах [74, 85]. Однако на основании снимков нельзя судить о взаимном проникновении компонентов переходного слоя. Для уточнения этих процессов был использован метод рентгеновского микроанализа.

На рис. 7.3 показано распределение элементов, входящих в состав материалов переходного слоя соединения керамики ВК 94-1 с коваром: керамики – Al, Si, металлизующего покрытия – Mo, припоя Cu и металла Ni.

Непосредственно к керамике, как видно, прилегает, частично диффундируя в нее, слой молибдена. Слой никеля имеет незначительное проникновение в молибденовое покрытие. Основное назначение никелевого слоя – это защита молибденового покрытия от проникновения в него расплавленной меди. Рисунок подтверждает, что указанная цель практически достигнута: медь лишь частично проникает в металлизующий слой. Это наблюдалось также и на микрофотографии аншлифа. Аналогичный вид имели кривые распределения элементов для соединений других керамических материалов. Неодинаковая шири-

на линий молибдена и меди свидетельствует о различной толщине металлизующего покрытия и припоя.

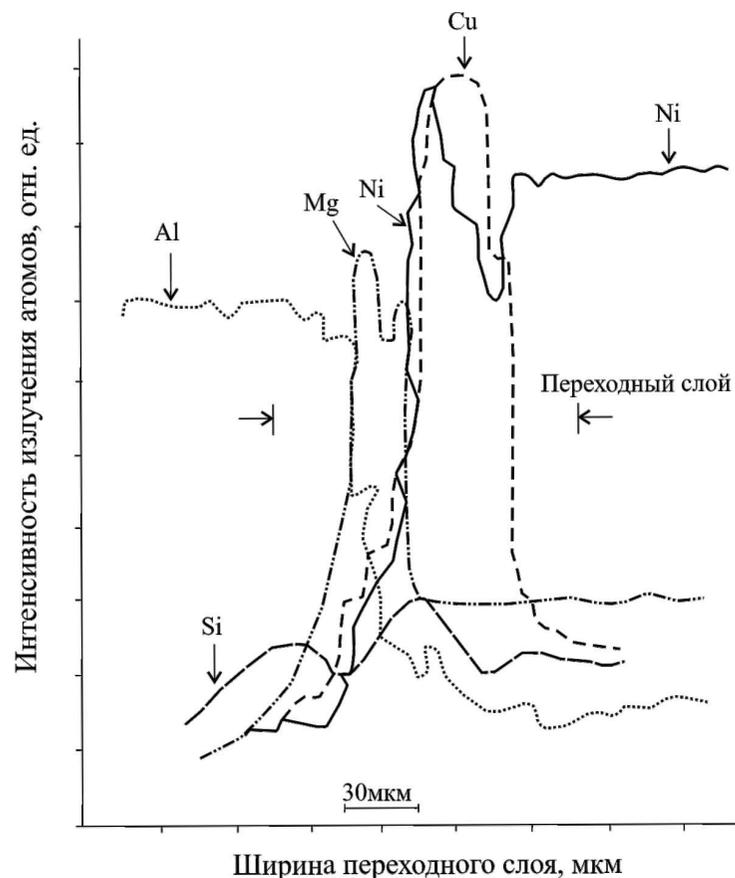


Рис. 7.3. Распределение элементов в переходном слое соединения металл-керамика ВК 94-1, паянного медью: керамика – Al, Si, металлизующее покрытие – Mo; защитное покрытие – Ni, припой – Cu; металл – Ni.

Исследованиями многих авторов показано, что облучение вызывает увеличение скорости диффузии элементов в различных материалах, а следовательно, изменение характера распределения элементов в переходном слое соединений.

В связи с этим проводилось исследование распределения элементов переходного слоя соединений, облученных импульсным нейтронным потоком ( $E_n =$

14 МэВ) до флюенса  $\approx 10^{18}$  нейтр./м<sup>2</sup>. При сопоставлении кривых распределения элементов соединения керамики ВК 94-1 с металлом до облучения и после установлено, что заметных изменений в их распределении нет. Таким образом, можно сделать вывод: при таких значениях флюенсов не происходит существенного ускорения процессов диффузии, а соединения при этом сохраняют свои свойства. Подтверждением этого являются положительные результаты исследования вакуумной плотности соединений в процессе реакторного облучения до флюенса  $\approx 4 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

По литературным данным, в процессе облучения диэлектрических материалов происходит изменение их объемов – «распухание». Кристаллические вещества при этом увеличиваются в объеме, плотность их уменьшается, стекла же, наоборот, уплотняются. Плотность кварца после облучения до флюенса  $2 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> снижается на 15%, а плотность кварцевого стекла в тех же условиях увеличивается на 3%.

Объемные изменения фаз, составляющих керамический материал, могут вызвать существенные механические напряжения на их границах. Поскольку объемные изменения фаз при облучении различны и неодинаковы с ростом флюенса, то в облучаемом материале постоянно происходит перераспределение напряжений. Следствием этого является изменение предельной механической прочности и других свойств материала. Объемные изменения в керамических материалах могут, в свою очередь, привести к появлению механических напряжений в металлокерамических конструкциях [81].

Физическая картина радиационного расширения напоминает случай термического расширения тел сложного состава и строения [86]. В качестве причины различного изменения объема фаз можно принять изменения не температуры ( $dT$ ), а флюенса облучения, например, быстрыми нейтронами ( $d\Phi$ ). Тогда средний коэффициент объемного радиационного расширения, без учета влияния  $T_{обл.}$ , будет выражен как [87]:

$$\beta_{cp}^* = \frac{(dV/d\Phi)}{V}, \quad (7.1)$$

а коэффициент объемного радиационного расширения частиц  $i$ -й фазы материала как:

$$\beta_i^* = \frac{(dV_i / d\Phi)}{V_i} \quad (7.2).$$

Величина напряжений, возникающих в каждой частице при облучении, может быть представлена в виде:

$$\sigma_i = K_i (\beta_{cp}^* - \beta_i^*) \Phi, \quad (7.3)$$

где  $K_i$  – коэффициент всестороннего сжатия, связанный с модулем упругости  $E_i$  и коэффициентом Пуассона  $\mu_i$ , материалы фазы  $i$  отношением

$$K_i = E_i / 3 \cdot (1 - 2\mu_i) \quad (7.4).$$

Следуя и далее рассуждениям, аналогичным приведенным У.Д. Кингери [86] для термического расширения тел, суммирование напряжений по объему или площади должно привести к нулю при условии, если напряжение нигде не оказываются большими настолько, чтобы образовался разрыв:

$$K_1 (\beta_{cp}^* - \beta_1^*) V_1 \Phi + K_2 (\beta_{cp}^* - \beta_2^*) V_2 \Phi + \dots = 0, \quad (7.5)$$

$$V_1 + V_2 + \dots = V_{общ},$$

$$V_i = F_i \rho_{cp} V_{общ} / \rho_i,$$

где  $F_i$  – весовая доля фазы;  $\rho_{cp}$ ,  $\rho_i$  – средняя плотность смеси и парциальная плотность, соответственно.

Следовательно, для определения среднего коэффициента объемного и линейного радиационного расширения можно использовать формулы расчета соответствующих коэффициентов термического расширения:

$$\beta_{cp}^* = \frac{\beta_1^* K_1 \frac{F_1}{\rho_1} + \beta_2^* K_2 \frac{F_2}{\rho_2} + \dots}{K_1 \frac{F_1}{\rho_1} + K_2 \frac{F_2}{\rho_2} + \dots} \quad (7.6),$$

$$\alpha_{cp}^* = \frac{\alpha_1^* K_1 \frac{F_1}{\rho_1} + \alpha_2^* K_2 \frac{F_2}{\rho_2} + \dots}{K_1 \frac{F_1}{\rho_1} + K_2 \frac{F_2}{\rho_2} + \dots} \quad (7.7).$$

В настоящее время по керамическим материалам имеется достаточно экспериментальных данных для выполнения оценочных расчетов напряжений, возникающих в фазах при облучении, и объемных радиационных изменений.

Проверочный расчет объемных изменений и напряжений, возникающих в фазах, был выполнен для наиболее исследованных с точки зрения радиационной стойкости керамических материалов ГБ-7, МК и УФ-46, при условии их облучения до флюенсов  $\approx 10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup> и  $6 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup> [78, 81]. Предполагалось, что в исходном состоянии керамики напряжения на границах фаз отсутствуют. Определив коэффициенты сжатия фаз по выражению (7.4), были найдены по формуле (7.6) средний коэффициент объемного радиационного расширения керамики ГБ-7 и по формуле (7.3) – механические напряжения, возникающие на зернах кристаллофазы и пленке стекла, обволакивающей эти зерна. Было показано, что возникающие напряжения после облучения флюенсом  $10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup> не опасны для кристаллов корунда (сжатие), имеющего высокое значение механической прочности ( $\sigma_{сж} = 1000-5000$  МПа,  $\sigma_p = 150-300$  МПа). Растягивающее напряжение в пленке стекла может привести к образованию макротрещин, поскольку для стекол  $\sigma_{сж} = 500-2000$  МПа, а  $\sigma_p = 50-200$  МПа.

Таким же образом были проведены расчеты параметров фаз керамических материалов МК и УФ-46, облученных флюенсом  $10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Из расчетов следует, что напряжения, возникающие на границах фаз этих материалов, по величине меньше, чем напряжения, возникающие в керамике ГБ-7.

Для указанных материалов оценочный расчет выполнен также для условий облучения флюенсом  $6 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>, который соответствует максимальному флюенсу, достигнутому при облучении исследуемых образцов соединенный металл-керамика.

Показано, что напряжения, возникающие в керамике рассмотренных марок, являются опасными и способными разрушить материал. Не смотря на ряд допущений, сделанных при расчетах, результаты расчета напряжений и объемных изменений согласуются с экспериментальными данными, приведенными в литературе. В работе [84], например, приведена зависимость прочности при

статическом изгибе керамических материалов от флюенса нейтронов. Прочность керамики УФ-46 и ГБ-7 не изменяется при облучении до флюенса около  $10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>, а затем с дальнейшим ростом флюенса начинает снижаться. Прочность керамики МК не меняется вплоть до флюенса  $6 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>, и, судя по расчетам, в керамике МК при этом флюенсе возникают наименьшие напряжения.

### 7.9. Конструкции герметизирующих электроизоляционных узлов (ГЭУ) для СУЗ реакторов

ГЭУ могут применяться в качестве герметичных заделок коаксиальных кабелей с минеральным изолирующим наполнителем в системах управления и защиты АЭС, в качестве одиночных вводов для подачи контрольных и управляющих сигналов в рабочую полость реактора и как многоэлементные узлы для гермовводов контрольных кабелей. Исходя из назначения, ГЭУ располагаются в активной зоне реактора, вблизи его корпуса или в зоне биологической защиты, поэтому к ним предъявляются различные требования.

Узлы, используемые в качестве герметичных заделок кабелей внутриреакторных датчиков, должны быть работоспособны при плотности потока нейтронов  $\approx 10^{17} - 10^{18}$  нейтр./(м<sup>2</sup> с); мощность экспозиционной дозы гамма-излучения  $\approx 72$  А/кг; максимальной рабочей температуре 300 °С. Они должны сохранять вакуумную плотность (натекание гелия не выше  $1,3 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup> · Па/с) и сопротивление изоляции не ниже 1 Мом при облучении вплоть до флюенса  $\approx 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>.

Узлы, применяемые в СУЗ в качестве одиночных видов, должны быть устойчивы к облучению нейтронами при плотности потока  $10^9$  с<sup>-1</sup> · м<sup>-2</sup> в течение 5 лет. Температура облучения может достигать 400°С. Сопротивление изоляции узлов должно быть не менее 500 Мом.

К многоэлементным узлам гермовводов, размещаемым в зоне биологической защиты реактора, предъявляются следующие требования: узлы должны быть рассчитаны на мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения  $\approx 3,6 \cdot 10^6$  А/кг;

температура окружающей среды может достигать 150°С. Срок службы ГЭУ (30 лет) определяется сроком службы энергетического реактора.

Вышерассмотренные результаты исследований соединений металл-керамика, изготовленных на базе выбранных материалов, конструкций и технологий, показали, что по радиационной стойкости такие соединения соответствуют требованиям, предъявляемым к ГЭУ. Поэтому конкретные конструкции ГЭУ разрабатывались с учетом этих исследований.

Конструкция ГЭУ для герметичной заделки кабеля представлена на рис. 7.4.a [88]. Наружный диаметр и присоединительные размеры изделия выбраны в соответствии с размерами кабеля. При использовании для внутриреакторных детекторов коаксиального кабеля с минеральным наполнителем (MgO) его оболочка присоединяется к обойме 3 узла, диаметр которого равен 4 мм, а жила – к наконечнику 1, проходной, внутренний диаметр которого равен 2,4 мм. Изолятор 2 представляет собой керамический цилиндр диаметром 5,5 мм, имеющий конусообразные шлифованные и металлизированные участки для сочленения их пайкой с металлическими деталями. Металлические детали узлов изготавливаются из сплава 29 НК токарной обработки или штамповкой из листового материала. Последняя более приемлема в условиях серийного производства. Толщина стенки металлических деталей в зоне пайки составляет 0,3-0,5 мм.

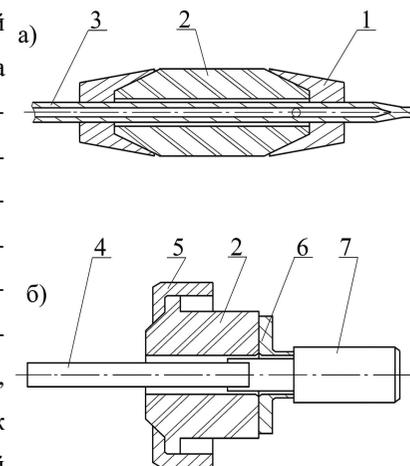


Рис. 7.4. Схемы размещения элементов ГЭУ, используемого в СУЗ реакторов АЭС:

а – для герметичной заделки коаксиальных кабелей; б – для одиночного ввода; 1 – наконечник; 2 – изолятор; 3 – обойма; 4 – шина; 5, 6 – манжета; 7 – токоввод.

Для сравнения ГЭУ по радиационной стойкости была изготовлена партия узлов, изоляторы которых металлизировались пастой на основе вольфрама. Состав пасты (в %): вольфрам – 75; марганец – 20; кремний металлический – 5.

Металлические детали ГЭУ были изготовлены из никеля, который является одним из наиболее радиационно стойких материалов. Пайка выполнена медью. Они имели самую высокую радиационную стойкость и уступали только ГЭУ, полученным электронно-лучевой сваркой.

Конструкция ГЭУ, используемого в качестве одиночного гермоввода, представлена на рис. 7.4.б. С целью уменьшения габаритных размеров узлов и упрощения технологии их изготовления в конструкции предусмотрено торцевое соединение металлических элементов с изолятором пайкой серебром. Электроизоляционные свойства узла обеспечиваются формой и размерами изолятора, который изготавливается из керамики марки ВК 94-1 и УФ-46. Металлические манжеты 5 и 6 изготовлены из сплава 42Н холодной штамповкой из листового материала толщиной 0,5 мм. Для уменьшения термомеханических нагрузок, которые могут возникать в соединениях металл-керамика при монтаже узлов, манжета 5 имеет чашеобразную форму, а манжета 4 в своей средней части – конусообразную отбортовку. Токоввод 7 изготовлен из сплава 42Н, шина 4 – из никеля. Шины представляют собой пакет гибких никелевых лент шириной 3,5 мм и толщиной 0,1 мм, позволяющих компенсировать механические и тепловые нагрузки, возникающие в узлах в процессе монтажа и эксплуатации.

### 7.10. Исследование свойств узлов в процессе реакторного облучения

**Методика исследования.** Облучению в реакторе СМ-2 подвергались ГЭУ, представленные на рис. 7.4. Перед установкой узлов в устройство для облучения (рис. 7.2.) к ним присоединялись измерительные трубки. Вакуумная плотность подготовительных узлов проверялась с помощью гелиевого течеискателя. В процессе проверки внутри образцов поддерживалось давление 0,1 МПа.

Первая партия состояла из 12 образцов. Испытывались шесть узлов, изоляторы которых изготовлены из микролита, металлизированного пастой на основе вольфрама, а металлические детали – из никеля, припой – медь (рис. 7.4), и столько же узлов с изоляторами из керамики ВК 94-1 и пайкой элементов серебром (рис. 7.4. б). ГЭУ первого типа устанавливались в облучательном устройстве

на среднем этаже, второго типа – на верхнем и среднем этажах (по 3 шт.), удаленных от среднего на расстояние 30 мм.

После монтажа образцов в облучательном устройстве вакуумная плотность всей системы проверялась при давлении гелия во внутренних полостях образцов 0,3 МПа.

Таблица 7.5

Условия облучения в канале реактора СМ-2

Этаж устройства	Плотность потока, нейтр./(м <sup>2</sup> с)		P <sub>γ</sub> (экспозиц.), А/кг	T <sub>обл.</sub> , °С
	быстрых нейтронов	тепловых нейтронов		
Верхний	6,4 · 10 <sup>16</sup>	6,5 · 10 <sup>17</sup>	44	132 ± 5
Средний	7,1 · 10 <sup>16</sup>	8,1 · 10 <sup>17</sup>	47	120 ± 5
Нижний	6,4 · 10 <sup>16</sup>	6,5 · 10 <sup>17</sup>	44	100 ± 5

Приведенные в табл. 7.5 плотности потоков соответствуют реактору 100 МВт.

Устройство с образцами погружалось в канал реактора. Внутренние полости образцов заполнялись гелием до давления 1,2 МПа. Подъем давления гелия в канале проводился ступенчато до величины 1,1 МПа. Таким образом, на соединениях металл-керамика создавался перепад давления, который не превышал 0,15 МПа.

В аналогичных условиях облучались три образца ГЭУ (рис. 7.4.а), изоляторы которых изготовлены из керамики МК, металлизированной пастой № 3, а пайка элементов выполнена медью.

Исследованию на герметичность в реакторе БОР-60 подвергалось 10 образцов ГЭУ (рис. 7.4.а). Изоляторы узлов были изготовлены из керамики МК, металлизированной пастой № 4, металлические детали – из кобальта. Пайка соединений выполнена медью. К узлам припаивались измерительные трубки, проверялась их вакуумная плотность с помощью гелиевого течеискателя, а затем они вставлялись в стаканы облучательного устройства (рис. 7.2). После установки устройства с образцами в канал реактора и достижения температуры испытаний (320-360°С), при увеличении мощности реактора до номинального уровня 40-50 МВт, на соседних образцах создавался перепад давления

$2,03 \cdot 10^5$  Па за счет подачи гелия в их полость. При облучении плотность потока нейтронов составляла  $(3-5) \cdot 10^{17}$  нейтр./ $(\text{м}^2 \text{с})$ .

В реакторе ВВР-СМ одновременно исследовались влияние облучения на вакуумные и электроизоляционные свойства ГЭУ (рис. 7.4.б). Для проверки вакуумной плотности к узлам припаивались измерительные трубки, а для измерения сопротивления изоляции к их токовводам присоединялись термостойкие кабели. Манжеты узлов заземлялись на корпус канала через измерительные трубки. При испытании изоляции на узлы подавалось постоянное напряжение – 300 В. Измерение сопротивления изоляции проводилось с помощью тераомметра ЕК6-Н.

Перед установкой канала с образцами в реактор была проведена его дозиметрия. Измерение плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов осуществлялось по общепринятой методике с помощью соответственно золотой и никелевой фольги. Установлено, что плотность тепловых нейтронов составляла  $4,2 \cdot 10^{16}$  нейтр./ $(\text{м}^2 \text{с})$ . Мощность поглощенной дозы сопутствующего гамма-излучения, измеренная методом полуадиабатического калориметра, равна приблизительно  $56 \text{ Гр/с} \cdot \text{МВт}$ . Максимальная температура разогрева образцов при выходе реактора на номинальную мощность не превышала  $90^\circ\text{C}$ . Дальнейшее повышение температуры до  $200^\circ\text{C}$  достигалось за счет вакуумирования канала и электронагрева образцов. Исследование зависимости сопротивления изоляции ГЭУ от мощности гамма-излучения проводилось на кобальтовом облучателе ИЯФ АН УзССР.

Сопротивление изоляции ГЭУ изучалось путем измерения токов утечки. Основным затруднением при измерении токов утечки является шунтирование токов по ионизированному воздуху внутри полых образцов. Шунтирование токов изучалось путем откачки полостей и последующей их герметизации стеклом. Эта операция выполнялась до монтажа в ячейку. Шунтирование по окружающему ионизированному воздуху было исключено за счет применения охранного кольца, изготовленного из нержавеющей стали и соединенного с куском ячейки контактной сваркой. Кольцо охватывало изолятор образца по середине его длины.

**Герметичность узлов** в процессе облучения оценивалась по изменению перепада давления – разности между значением давления внутри каждого образца и значением давления в канале. Потеря герметичности может быть вызвана только появлением микротрещин в соединениях металл-керамика [89]. Такое предположение подтверждается характером изменения фиксируемого перепада давления на примере одного из образцов ГЭУ, используемого в качестве одиночного ввода:

с некоторого момента времени с увеличением флюенса поддерживаемый перепад давления уменьшался постепенно, а не резко (рис. 7.5.а);

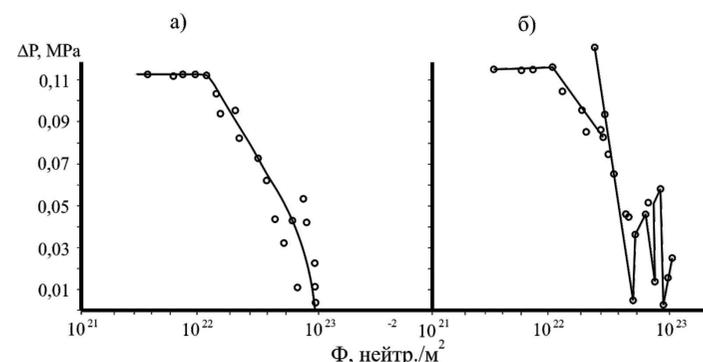


Рис. 7.5. Изменение перепада давления на образце № 2 в зависимости от изменения флюенса быстрых нейтронов (реактор СМ-2): а – без подпитки давлением; б – с подпиткой давлением.

при подпитке внутренней полости узла на некоторое время восстанавливался поддерживаемый перепад давления, а затем с большей, чем раньше, скоростью снижался до прежнего значения (участок 1 на рис. 7.5.б);

при изменении давления в канале без подпитки внутренней полости образца не происходило резкого изменения давления в образце, как при чисто механическом его повреждении. Появлялись скачки давления, а затем его значение снижалось до прежнего уровня (участок 2 на рис. 7.5.б).

По результатам испытаний, все узлы, используемые в качестве одиночных вводов, остаются герметичными при флюенсе  $3,6 \cdot 10^{21}$  нейтр./ $\text{м}^2$ .

Все ГЭУ, предназначенные для герметичной заделки коаксиальных кабелей, сохранили герметичность до флюенса  $1,44 \cdot 10^{23}$  нейтр./ $\text{м}^2$ . Согласно тре-

бованиям, предъявляемым к этим узлам, максимальный флюенс, которым они могут быть облучены за 30 лет работы реактора при плотности потока нейтронов  $1 \cdot 10^9$  нейтр./( $m^2 \cdot c$ ), составит только  $10^{18}$  нейтр./ $m^2$ . Это позволяет сделать вывод о соответствии конструкции ГЭУ предъявляемым требованиям по радиационной стойкости.

К моменту достижения флюенса  $1,9 \cdot 10^{23}$  нейтр./ $m^2$  герметичность сохранил лишь один образец. Дальнейшее их исследование в реакторе СМ-2 проводилось на партии образцов (8 шт.), арматура которых изготовлена из ковара, а изоляторы из керамики МК, металлизированных пастой № 3. Температура при испытании составила  $300^\circ C$ . Контроль за перепадом давления показал, что шесть образцов сохранили герметичность до флюенса  $2 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$ , а оставшиеся два – до флюенса  $5 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$ . При дальнейшем облучении образцов произошла медленная разгерметизация.

Проверка вакуумной плотности образцов на гелиевом течеискателе подтвердила полученные результаты.

При испытании новой партии таких же узлов в количестве 5 шт. было установлено, что при флюенсе быстрых нейтронов  $3,06 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$  герметичность потерял один образец, при  $3,25 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$  – два образца, и оставшиеся два разгерметизировались при  $5,65 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$ .

Из полученных данных следует, что независимо от материала металлизующей пасты, металлических деталей узлов и  $T_{обл.}$  до  $300^\circ C$  ГЭУ, изоляторы которых изготовлены из керамики МК, имеют практически одинаковую радиационную стойкость.

Изучение микрошлифов [90] показало, что основная причина разгерметизации этих узлов после облучения – появление микротрещин в керамике. Это подтверждается также данными работы [84], в которой при облучении аналогичных соединений начало растрескивания изоляторов, по мере «распухания» керамики, наблюдалось уже при флюенсах  $10^{24}$  нейтр./ $m^2$ , хотя образцы сохраняли герметичность до  $6,8 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$ .

Для выяснения причин возникновения микротрещин авторами работы [90] были проведены измерения микротвердости соединений на облученных и

необлученных образцах с помощью микротвердомеров ПМТ-4Д и ПМТ-3, соответственно. Показано, что микротвердость ковара увеличивается в 1,5 раза, а микротвердость переходного слоя и керамики снижается соответственно в 2,85 и 2,75 раза. Эти данные свидетельствуют о предполагаемом [71] разрыхлении структуры микролита под действием облучения, которое, в свою очередь, вызывает изменение его ТКЛР. Известно также, что механическая прочность керамики МК снижается на 50-70% при облучении ее до  $\Phi \approx 10^{25}$  нейтр./ $m^2$ , а ТКЛР всех высокоглиноземистых керамических материалов увеличивается с увеличением флюенса облучения.

Поэтому одним из механизмов образования микротрещин является возникновение напряжений в соединениях металл-керамика из-за увеличения рассогласования ТКЛР материалов и снижения прочности керамики. Повышение микротвердости металла приводит к снижению его пластичности. Металлическая деталь узла становится менее податливой при воздействии на нее керамического изолятора, подверженного «распуханию».

Испытания образцов на герметичность в реакторе БОР-60 показали следующие результаты. Спад давления во внутренних полостях образцов № 1, 3, 5, 9, 10 (табл. 7.6) начался сразу после погружения образцов и выхода реактора на номинальную мощность (через 24 час.). Причиной разгерметизации образцов является образование микротрещин, вызванное рассогласованием ТКЛР материалов ГЭУ, особенно в соединениях нержавеющей сталь-микролит. При дальнейшем облучении указанные образцы оставались герметичными.

Скорость спада давления в полостях образцов № 5 и 10 (соединение ковар-микролит) слабо зависит от флюенса облучения и увеличивается незначительно вплоть до окончания испытаний. Это свидетельствует о лучшем согласовании ТКЛР указанных материалов при облучении по сравнению с парой «нержавеющая сталь-микролит». Остальные образцы сохранили герметичность вплоть до флюенса  $1,57 \cdot 10^{24}$  нейтр./ $m^2$ . Дальнейшие испытания были прекращены.

Таблица 7.6

**Изменение перепада давления (МПа) на соединениях ГЭУ  
в зависимости от флюенса облучения (реактор БОР 60)**

Флюенс облучения, м <sup>-2</sup>	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10
8,82 10 <sup>22</sup>	1,82	1,93	1,87	1,96	1,92	1,99	2,0	2,02	1,71	1,79
1,76 10 <sup>23</sup>	1,65	1,86	1,42	2,03	1,72	2,03	2,03	2,03	1,70	1,62
2,18 10 <sup>23</sup>	0,79	1,62	1,01	2,03	1,72	2,03	2,03	2,03	1,62	1,65
3,46 10 <sup>23</sup>	0,71	1,76	0,61	2,03	1,72	2,03	2,03	2,03	1,52	1,54
4,83 10 <sup>23</sup>	0,40	1,52	0,10	1,96	1,72	2,02	2,03	2,03	1,47	1,47
5,7 10 <sup>23</sup>	0,40	1,87	0,10	2,03	1,72	2,03	2,03	2,03	1,42	1,54
6,59 10 <sup>23</sup>	0,51	1,82	0,10	2,03	1,72	2,03	2,03	2,03	1,42	1,47
8,49 10 <sup>23</sup>	1,28	2,03	1,01	2,03	1,75	2,03	2,03	2,03	1,45	1,45
8,61 10 <sup>23</sup>	1,23	2,03	1,32	2,03	1,82	2,03	2,03	2,03	1,52	1,52
1,49 10 <sup>24</sup>	1,22	2,03	1,20	2,03	1,81	2,03	2,03	2,03	1,52	1,51
1,57 10 <sup>24</sup>	1,01	2,03	0,81	1,93	1,78	2,03	2,03	2,03	1,50	1,50

Облучению в реакторе ВВР-СМ подвергалась опытная партия образцов, в которую вошли по 5 шт. ГЭУ, используемых в качестве герметичной заделки коаксиальных кабелей и в качестве одиночных вводов (рис. 7.4). Изоляторы узлов были изготовлены из керамики УФ 46, элементы соединены пайкой серебром. При достижении флюенса около 10<sup>22</sup> нейтр./м<sup>2</sup> испытание было прекращено. Герметичность всех ГЭУ сохранилась. Как отмечалось выше, радиационная стойкость охватывающих соединений металл-керамика УФ-46, паянных серебром, сохраняется до флюенса 4 · 10<sup>24</sup> нейтр./м<sup>2</sup>. Это позволяет сделать вывод об устойчивости до этого флюенса и ГЭУ, в конструкциях которых применены аналогичные соединения.

Испытания в реакторе ВВР-СМ подвергалась также партия ГЭУ в количестве 3 шт., изоляторы которых были изготовлены из керамики ВК 94-1, а пайка выполнена медью (рис.7.4.а). Узлы остались герметичными после их облучения флюенсом до 1,3 · 10<sup>23</sup> нейтр./м<sup>2</sup>.

Из вышеизложенного следует, что ГЭУ (рис. 7.4.а) с изоляторами на керамике МК, ВК 94-1, УФ-46 и ГЭУ (рис. 7.4.б), изоляторы которых изготовлены из керамических материалов марки ВК 94-1 и УФ-46, отвечают требованиям по сохранению вакуумной плотности в процессе реакторного облучения до заданных флюенсов.

**Электроизоляционные свойства ГЭУ.** Радиационная составляющая электропроводности керамики при воздействии смешанного  $\gamma$ -нейтронного облучения в начальный момент в основном определяется  $\gamma$ -излучением [76]. Поэтому исследование сопротивления изоляции ГЭУ проводилось в условиях как реакторного, так и чистого  $\gamma$ -излучения.

В процессе исследований были измерены точки утечки ГЭУ в зависимости от времени с изоляторами из МК (рис. 7.4.а) при воздействии высокой температуры (600°С) в условиях непрерывной подачи на узел постоянного напряжения (300 В) и без подачи напряжения

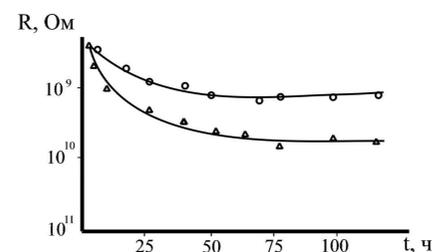


Рис. 7.6. Временная зависимость сопротивления изоляции (керамика МК) ГЭУ с охватывающими спаями при температуре 600°С: ○ – без подачи напряжения; Δ – при подаче напряжения 300 В.

(напряжение включалось только при измерении). На рис. 7.6. приведены временные зависимости сопротивления изоляции ГЭУ при выдержке более 100 час. При отсутствии напряжения наблюдалось небольшое увеличение сопротивления изоляции через 20-25 час. выдержки, а затем достигнутое значение сохранялось в процессе всего испытания.

При постоянной подаче напряжения в начальный момент (в течение 5 час.) происходило резкое увеличение сопротивления, а затем его медленный рост до установившегося значения. Такое изменение сопротивления изменяется, по-видимому, процессом электроочистки изоляции узла. При сравнении полученных результатов с литературными данными видно, что значение сопротивления изоляции керамики уменьшается примерно на четыре порядка при ее нагреве до температуры 600°С, затем со временем несколько повышается и после сохраняется при длительной выдержке на одном уровне.

Зависимость сопротивления изоляции (токов утечки) ГЭУ от мощности поглощенной дозы гамма-излучения исследовалась на кобальтовом облучателе. Результаты измерений представлены в виде графиков на рис.7.7.

Гамма-излучение различной мощности, независимо от температуры, сразу приводит к резкому уменьшению сопротивления изоляции пропорционально мощности излучения. С ростом температуры сопротивление медленно уменьшается и при температуре около 500°C оно становится равным достигнутому при нагреве ГЭУ до этой температуры без облучения.

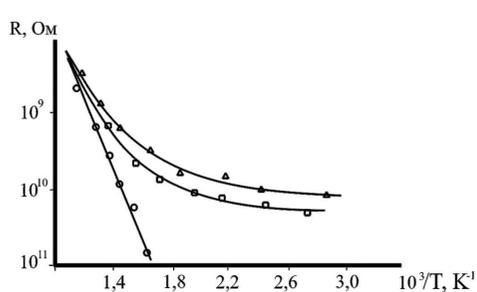


Рис. 7.7. Температурная зависимость сопротивления изоляции (керамика МК) ГЭУ с охватывающими спаями от мощности дозы гамма-излучения:  $\circ$  – без облучения;  $\bullet$  – при  $P_\gamma = 7,5$  Гр/с;  $\Delta$  – при  $P_\gamma = 26,5$  Гр/с.

Исследование сопротивления изоляции ГЭУ в полях смешанного  $\gamma$ -нейтронного излучения проводилось в реакторе ВВР-СМ. Испытаниям подвергались три образца. Сопротивление изоляции образцов в исходном состоянии было не ниже  $5 \cdot 10^{12}$  Ом. После выхода реактора на номинальную мощность температура образцов с помощью электроподогрева была доведена до 300°C. Эти параметры соответствуют требованиям, предъявляемым к узлам в процессе эксплуатации. Плотность потока нейтронов при облучении составила около  $8 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . После облучения ГЭУ до флюенса  $10^{24} \text{ м}^{-2}$  сопротивление изоляции составляло для трех образцов соответственно  $6,8 \cdot 10^8$ ;  $5,3 \cdot 10^8$  и  $6,2 \cdot 10^8$  Ом, т.е. произошло его снижение на четыре порядка [75].

Полученные результаты исследования влияния гамма-излучения и гамма-нейтронного реакторного излучения ( $\Phi \approx 10^{24} \text{ нейтр.}/(\text{м}^2)$ ) на сопротивление изоляции узлов показывают, что изменение сопротивления характеризуется практически одним значением. Это подтверждает выводы [76] о том, что радиационная составляющая электропроводности при воздействии смешанного  $\gamma$ -нейтронного облучения в основном определяется  $\gamma$ -излучением, а также выводы о слабом влиянии нейтронного излучения на изоляционные свойства керамики. При прекращении облучения устанавливалось первоначальное значение сопротивления изоляции.



Рис. 7.8. Зависимость сопротивления изоляции (керамика УФ-46) ГЭУ с торцевыми спаями и температуры в канале от мощности реактора ВВР-СМ: кривая 1 – сопротивление изоляции; кривая 2 – температура.

После снятия тепловых нагрузок и облучения сопротивление изоляции ГЭУ практически возвращается к своему первоначальному значению.

## ГЛАВА 8. КВАЛИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ

### 8.1. Качество и надежность изделий

Высокое качество и надежность герметичных кабельных вводов обеспечиваются рядом объективных факторов: многолетним опытом разработчиков исследования, радиационной, коррозионной и термической стойкостью материалов [45, 92, 91, 44], объемом квалификационных испытаний и их жесткостью, в ряде случаев превосходящей требования международных стандартов, опытом (начиная с 5 блока Нововоронежской АЭС) эксплуатации силовых гермовводов; оригинальным решением ряда конструктивных элементов, защищенных 15 авторскими свидетельствами и патентами.

Используемые в конструкциях материалы исследованы на радиационную стойкость в условиях активной зоны атомного реактора до флюенсов  $>10^{22}$  нейтр./см<sup>2</sup> и на гамма-установках и ускорителях до экспозиционных доз  $10^{11}$  Р.; в условиях паровоздушных смесей до критических параметров, в парах и расплавах щелочных металлов, при действии дезактивирующих растворов; при действии высоких (до 1000°C) температур и механических и электрических нагрузок. Это позволяет с уверенностью прогнозировать поведение материалов в условиях оговоренных техническими требованиями, приведенными в Приложении 3 для режимов нормальной эксплуатации и возможных расчетных аварийных режимов.

Приведенный ниже объем и методы квалификационных испытаний имеют некоторые отличия от широко используемого в международной практике стандарта IEEE-317, согласно которому радиационные испытания изделий проводятся отдельно от испытаний в аварийных режимах, хотя повышенная радиация является неотъемлемой составляющей таких режимов. С физической точки зрения это недопустимо, так как радиация часто заметно активизирует химические процессы в материалах.

Особенностью вводов ВГКК является использование в их конструкции только металлов и керамики – материалов абсолютно инертных к действию

гамма-излучения, основного вида излучений действующих в зоне локализации аварии. В керамике и металлах даже дозы, превышающие  $10^{11}$  Р, не вызывают заметных фиксируемых изменений физико-технических свойств и структуры. Другая картина наблюдается в полимерных материалах. Как известно, радиационная стойкость полимеров определяется целиком поглощенной дозой и не зависит от вида излучения: гамма-кванты, электроны, нейтроны в этом случае эквивалентны, так как взаимодействие даже с электронной подсистемой материала приводит к разрыву молекул полимера и изменению механических и электрофизических свойств. Радиационная стойкость полимеров – на уровне  $10^8$  Р и сильно зависит от окружающей атмосферы. Радиационная стойкость в вакууме, окислительной и восстановительной атмосфере может существенно отличаться для одного и того же материала. Поэтому испытания изделий, в которых используются полимеры, отдельно на действие радиации и отдельно на действие аварийной атмосферы не дают правильной картины поведения изделия в аварийных условиях.

Для испытаний гермовводов ВГКК в Институте ядерной физики (ИЯФ) Узбекской АН была разработана и изготовлена описанная в разделе 8.2 установка, создающая в едином комплексе все аварийные режимы с учетом радиации.

Используемые в конструкции гермовводов ВГКК материалы не горят и не поддерживают горение. Поэтому для них техническое требование состоит в том, чтобы воздействие стандартного пожара (подъем температуры в течение 1,5 час. до 1000°C) не являлось проблемным, в то время как для изделий, содержащих полимеры и даже стекла, это является существенной преградой, т.к. их термическая стойкость не превышает 300-400°C.

Таким образом, гермовводы ВГКК, помимо своей основной функции – герметичного ввода энергии и управляющих сигналов в зону реактора, являются надежными противопожарными барьерами при распространении горения в кабельных коридорах. Использование в гермовводах ВГКК модулей на основе жаростойких кабелей КМЖ с минеральной изоляцией, обладающих продольной герметичностью при давлении до 20 атм., делает их высоконадежными по ос-

новному параметру этих изделий – герметичности, т.к. даже нарушение спая металл-керамика концевых металло-керамических изоляторов кабельных модулей приводит только к снижению омического сопротивления модуля, но не нарушает герметичности.

И, наконец, наиболее существенным свидетельством качества герметичных вводов является опыт их эксплуатации. Начиная с 1980 г. после пуска 5 блока Нововоронежской АЭС все АЭС с реакторами типа ВВЭР комплектуются с использованием гермовводов силовых кабелей типа ВГУ, выполненных по одной идеологии с гермовводами ВГКК с использованием общих технических решений и защищенных общими авторскими свидетельствами и патентами.

## 8.2. Объем квалификационных испытаний

Квалификационные испытания проводились в объеме и последовательности (рис. 8.1), в которых были учтены требования Генерального проектировщика АЭС (С-Петербургский институт «Атомэнергопроект») и международные нормы: МЭК (IEC) – публикация 60772-83 и стандарт IEEE-317.

Проводились испытания:

1. Проверка по конструкторской документации габаритных, установочных присоединительных размеров, массы, маркировки, качества лакокрасочных покрытий, сборки, электрического монтажа и комплектности.
2. Испытание изделий на герметичность.
3. Испытание электрического сопротивления изоляции.
4. Испытание заделки концов кабелей (модулей).
5. Испытание электрической прочности изоляции повышенным напряжением.
6. Испытание номинальными токами при аварийных режимах.
7. Испытание на термическую и динамическую устойчивость при токах короткого замыкания.
8. Измерение омического сопротивления жил, включая сопротивление контакта кабель-жила гермоввода.

9. Испытание на защищенность от струй воды.
10. Испытание на статическое воздействие пыли.
11. Испытание узла кабеля, подключенного к гермовводу.
12. Проверка контрольной сборки по конструкторской документации и инструкции по монтажу.
13. Испытание на старение тепловым методом.
14. Испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при транспортировке и хранении.
15. Испытание на механическую прочность при транспортировании в упаковке.
16. Испытание фрагментов гермовводов на воздействие климатических факторов.
17. Испытание на вибропрочность и виброустойчивость.
18. Испытание на радиационную стойкость.
19. Испытание на определение кратности ослабления гамма-излучения.
20. Испытание на сейсмоустойчивость.
21. Испытание на огнестойкость.
22. Испытание на надежность.

Результаты испытаний были оформлены соответствующими протоколами и актами и приняты межведомственной комиссией из представителей МВД СССР (ВНИИПО), Минэнергоатом СССР (НПО «Красная Звезда» и Л.И. Атомэнергопроект), Минвнешторг (ВВО «Атомэнергоэкспорт»), АН СССР (АмурКНИИ), Минспецмонтаж (Благовещенский завод «Дальтехмонтаж» – предполагаемый изготовитель), Госпроматомнадзор СССР (Свердловская ПКИ), Балаковского МУ треста «Гидроэлектромонтаж». Был заключен договор на поставку партии гермовводов для первого блока АЭС «Хурагуа» на Кубе.

На рис. 8.1. приведена картограмма объема и последовательности квалификационных испытаний, из которой видно, что их можно разделить на разрушающие, после которых изделие уже не может быть использовано для других исследований, и неразрушающие, позволяющие дальнейшее использование изделия.

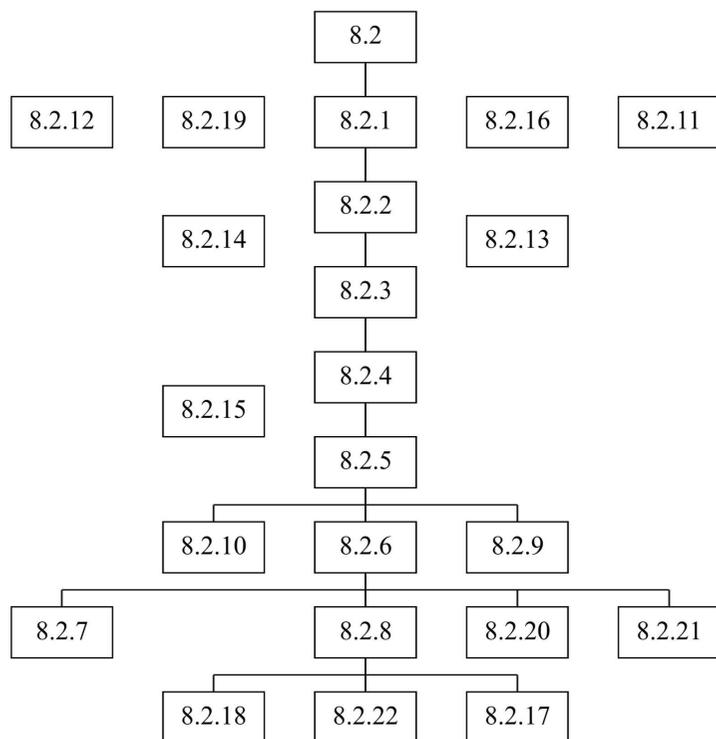


Рис. 8.1. Картограмма объема и последовательности квалификационных испытаний гермовводов типа ВГКК.

К разрушающим относятся испытания по пунктам 8.2.7; 8.2.20; 8.2.21. Остальные испытания являются неразрушающими и могут проводиться в определенных комбинациях на одном изделии. Как правило, разрушающие испытания проводились на образцах, прошедших серию неразрушающих.

### 8.3. Методы испытаний

После проверки изделия на соответствие конструкторской и технической документации по пункту 8.2.1 изделие испытывается на герметичность.

Как следует из рис. 8.1, испытание на герметичность предшествует большинству квалификационных испытаний и является основным контрольным параметром, определяющим пригодность изделия для испытаний и после испытаний. Такие штатные испытания проводятся до нанесения защитного покрытия и

закljučаются в следующем: отвертывается заглушка на контрольной полости на испытываемом гермовводе и через штуцер подключается к штатной системе сжатого (сухого) воздуха (азота) с давлением до 0,56 МПа (или к баллону со сжатым воздухом или азотом через редуктор). Время выдержки при давлении 0.56 МПа – 30 мин. На паяные и сварные швы наносится водномыльная эмульсия (50 г мыла на 1,0 л воды). Гермоввод считается выдержавшим испытания, если не наблюдается видимое отклонение стрелки манометра и не обнаружено появление мыльных пузырьков.

Конструкция гермоввода модульная и его надежность и герметичность определяется надежностью модулей, создаваемых на основе жаростойких кабелей типа КМЖ и КТМС с минеральной (*MgO*) изоляцией, обладающих продольной герметичностью при давлении до 20 атм. [60]. Недостатком этих кабелей является высокая гигроскопичность *MgO* и связанное с этим снижение электрического сопротивления изоляции. Если в «сухом» состоянии сопротивление изоляции отрезка кабеля длиной 1 м больше  $10^{11}$  Ом, то после пребывания в помещении при температуре 20°C и влажности 90%, оно снижается до  $10^7$  Ом. Для исключения этого недостатка концы кабелей в модулях герметизируются вакуум-плотными металло-керамическими изоляторами, обладающими абсолютной радиационной стойкостью в гамма-полях и сохраняющими герметичность при облучении в реакторе до флюенсов  $10^{19}$  нейтр./см<sup>2</sup>. Модули, герметизированные этими изоляторами, сохраняют высокое сопротивление изоляции ( $>10^{11}$  Ом) даже после пребывания в течение 5 час. в воде. Большая партия модулей, подготовленная для поставки на строящуюся Кубинскую АЭС, хранилась в течение 10 лет на открытом складе в климатических условиях Амурской области с колебаниями температуры от –30 до +30°C и все изделия, не имевшие механических повреждений, сохранили высокое сопротивление изоляции, что свидетельствует и о сохранении ими герметичности.

Для проверки динамики газопроницаемости отрезков кабелей с минеральной изоляцией во времени, при аварийных режимах в зоне локализации

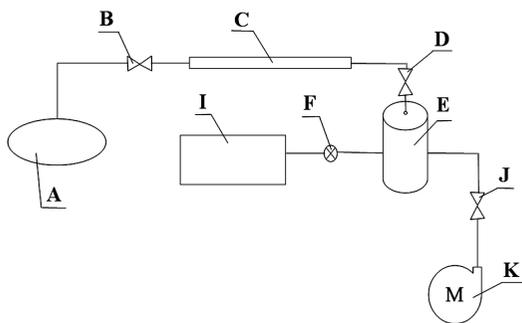


Рис. 8.2. Схема установки для исследования продольной герметичности кабелей с минеральной изоляцией: А – компрессор; В – вентиль; С – испытуемый образец; D – вакуумный клапан, I – вакуумметр ВИТ-3; F – терморпая лампа; E – вакуумный объем; J – вакуумный клапан; K – вакуумный насос [93].

аварии были проведены исследования отрезков кабелей КМЖ-1 и КМЖ-7 по приведенной на рис. 8.2 методике [93].

Для определения скорости натекания при открытом клапане (J) производится откачка вакуумного объема (E), открывается клапан (D) и откачивается воздух из присоединенного к образцу патрубка со стороны вакуумного объема

ма. Затем перекрывается клапан (J) и открывается вентиль (B) и тем самым подается давление в патрубок, присоединенный к образцу со стороны компрессора, и производится измерение натекания по повышению давления в вакуумном объеме в единицу времени. Для определения динамики натекания давление газа со стороны компрессора остается постоянным, а количество воздуха, проникающего в вакуумный объем, периодически измеряется в течение 24-25 час. до насыщения.

Результаты исследования газопроницаемости кабелей КМЖ-7×2,5, приведенные на рис. 8.3, показывают, что стабильная протечка устанавливается при давлении 5 атм. на отрезке кабеля длиной 0,5 м в течение 10 час. на уровне  $6 \pm 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$  и остается постоянным в течение 25 час.

Зависимость газопроницаемости от длины изучалась на отрезках кабеля КМЖ-1×4 при давлении 4,5 атм. Результаты приведены на рис. 8.4. При увеличении длины кабеля от 300 мм до 1800 мм газопроницаемость уменьшилась в 4 раза.

На рис. 8.5 приведены результаты определения зависимости натекания отрезка кабеля КМЖ-1×4 длиной 0,46 м от давления.

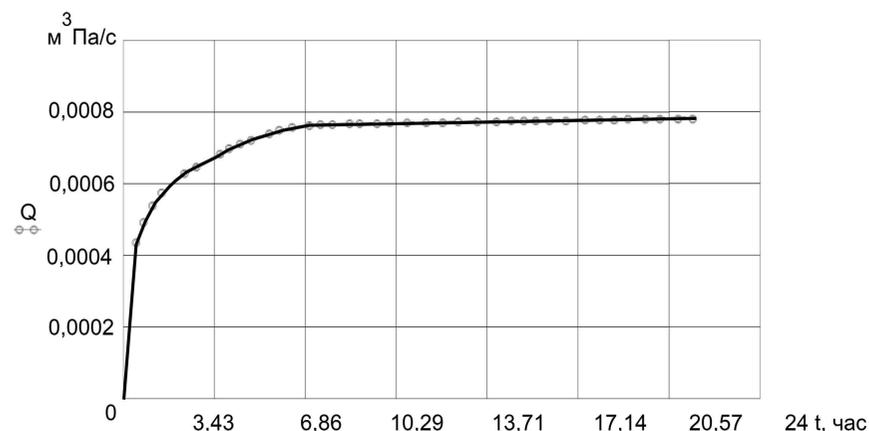


Рис. 8.3. Зависимость среднестатистической кривой натекания кабелей КМЖ-7×2,5 длиной 0,5 м от времени.

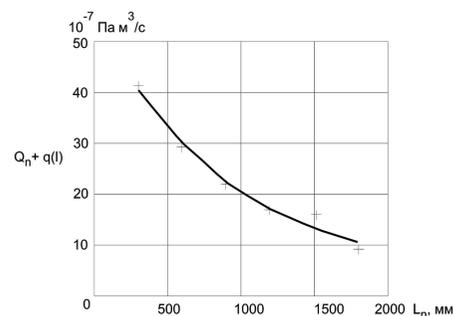


Рис. 8.4. Зависимость степени натекания кабеля КМЖ-1×4 от длины при давлении 4,5 атм.

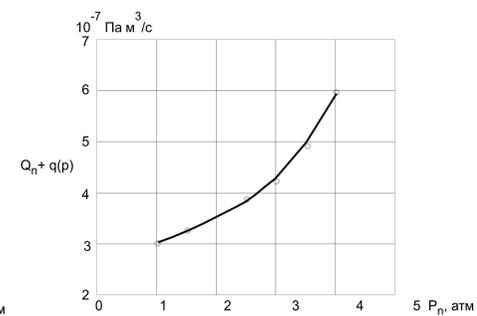


Рис. 8.5. Зависимость степени натекания отрезка кабеля КМЖ-1×4 длиной 0,46 м от давления.

При анализе газопроницаемости учитывалось, что минеральная изоляция находится в результате волочения при производстве кабеля в спрессованном состоянии и ее кажущаяся плотность  $\gamma$  достигает  $1900\text{-}2000 \text{ кг} / \text{м}^3$ , в то время как истинная плотность  $\gamma_0$  периклаза (MgO) порядка  $3600 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

Таким образом, пористость материала на уровне  $\theta = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \cdot 100 \approx 56\%$ .

Характер физических процессов при газопроницаемости определяется коэффициентом Нуссельта  $K_n = \frac{l}{d}$ , где  $l$  – длина свободного пробега атома проте-

кающего газа,  $d$  – диаметр поры в системе открытой пористости материала. Коэффициент Нуссельта связан с коэффициентами Рейнольда  $Re$  и Маха  $Ma$  соотношением  $K_n = Ma/Re$ . При  $K_n \ll 1$  газопроницаемость носит ламинарный характер, при  $K_n \sim 1$  имеет место молекулярная, эффузионная, или кнудсеновская газопроницаемость. При  $K_n \gg 1$  – диффузионная [94]. При ламинарной газопроницаемости поток  $\frac{dn}{dt}$  определяется проводимостью  $K$  и разностью давлений:  $\frac{dn}{dt} = \frac{K(p_2 - p_1)}{L} \cdot d^4$  и соответствует приведенным на рис. 8.3 – 8.5 экспериментальным зависимостям для кабелей. В приведенном законе Пуазейля связь коэффициента  $K$  с вязкостью  $\mu$  установлена Стоксом в виде  $K = \frac{\pi}{128\mu}$  и предполагает непрерывный поток.

Если длина пробега  $l$  много больше диаметра поры  $L$  в минеральной изоляции кабеля, то имеет место молекулярное истечение по Кнудсену и протекающее через трубку количество, выраженное в молях в секунду, будет описываться формулой:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2} A \frac{1}{\sqrt{2\pi MR}} \left( \frac{p_2}{\sqrt{T_2}} - \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \right) \cdot \frac{1}{L},$$

где  $L$  – длина трубки;  $T$  – температура;  $M$  – молекулярный вес, равный  $mN_L$ ,  $C$  – число молей в  $1 \text{ см}^3$ ,  $N_L$  – число Лошмидта равное  $2,68675 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ;  $m$  – масса молекулы,  $R$  – универсальная газовая постоянная равная  $8,3144 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ .

В случае постоянной температуры:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2} \frac{A}{\sqrt{2\pi MRT}} \cdot \frac{1}{L} (p_2 - p_1) = \frac{1}{2} \frac{A}{\sqrt{2\pi M}} \cdot \frac{\sqrt{RT}}{L} (C_2 - C_1)$$

Для круглого сечения трубки (капилляра открытой поры)  $A = \frac{2\pi d^3}{3}$ .

Таким образом, количество газа в молях, проходящее в единицу времени, прямо пропорционально разности давлений, обратно пропорционально длине и корню квадратному из температуры и массы молекулы газа [95].

**Испытание на радиационную стойкость и надежность (8.2.18 и 8.2.22)\*.** Испытания гермовводов в нормальных и аварийных режимах, согласно табл. 1.1, проводились до интегральной дозы  $5 \cdot 10^8 \text{ Р}$  в водозащищенном канале кобальтовой ( $Co-60$ ) гамма-установки с диаметром облучателя 300 мм, разработанной и изготовленной в Институте ядерной физики АН УзССР (г. Улугбек), схема которой приведена на рис. 8.6.

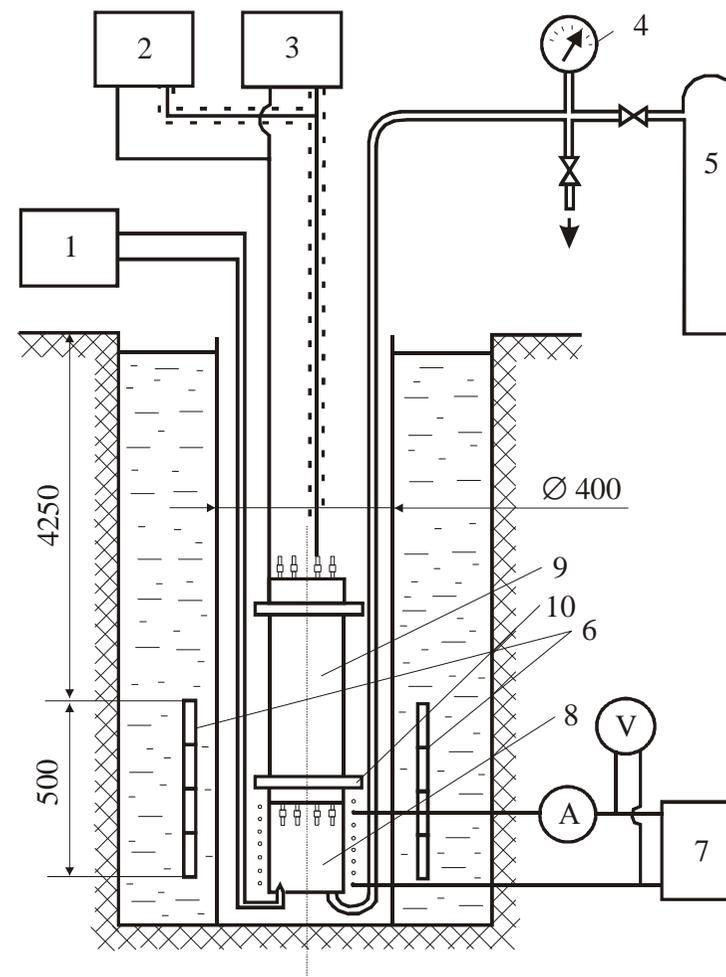


Рис. 8.6. Установка для испытания гермовводов в аварийных режимах.

\* Здесь и далее в скобках приводятся пункты на картограмме (рис. 8.1).

Камера 8 присоединяется к гермовводу 9 через герметично приваренный к нему на расстоянии 100 мм от торца переходной фланец 10. Испытательная камера снабжена «печкой» с нихромовым нагревателем, намотанным на корпус камеры и теплоизолированной асбестом, которая вместе с автотрансформатором РНО-250, образует систему нагрева 7, позволяющую устанавливать необходимую температуру в камере. Внутри камеры, в центре ее введена хромель-алюмелевая термопара, которая автоматически регистрирует с помощью прибора КСП-4 температуру (система измерения температуры 1). Требуемое давление или разрежение в камере создается, используя баллон со сжатым воздухом (азот) 5, редуктор ИКО-25 и манометр 4 типа ОБМ1-100, либо форвакуумный насос типа ВН-461М и моновакуумметр. В зависимости от необходимости создается давление в камере или разрежение.

Трубопровод камеры снабжен штуцером, место сочленения тщательно уплотнено. Откачка воздуха из камеры или создание избыточного давления производится до загрузки гермоввода в зону радиации в сухой водозащитный канал кобальтовой (Co-60) гамма-установки с диаметром облучателя 300 мм.

Необходимые электрические соединения осуществлялись со стороны гермоввода, противоположной помещаемой в камеру. Камеру заземляют. Измерение электрического сопротивления изоляции гермовводов класса напряжений до 1000 В производилось мегомметрами постоянного тока при номинальном напряжении 500 В. Измерения сопротивления изоляции гермовводов класса напряжений свыше 1000 В производилось мегомметрами постоянного тока типа Ф-4100 (М-4100/5) при номинальном напряжении 2500 В. Для испытаний на электрическую прочность использовалась установка АИИ-70.

После проверки гермоввода на герметичность, определения сопротивления электрической изоляции, электрической прочности повышенным напряжением, камеру с гермовводом тельфером опускают в канал гамма-установки на требуемый уровень мощности дозы радиации и выдерживают в течение времени соответствующему данному виду аварийной ситуации, согласно табл. 8.1.

Таблица 8.1

### Параметры испытательных аварийных режимов

Режим малой течи (1)		Режим большой течи (2)	
повышение параметров	понижение параметров	повышение параметров	понижение параметров
Давление от 0,015 МПа до 0,17 МПа Температура от 20 до 90°C за 60 сек	Мгновенно	Давление от 0,085 до 0,5 МПа  Температура от 20 до 150°C за 8 сек	Давление за 3 часа  Температура – скачкообразно
Мощность дозы 100 Р/час	Мощность дозы 100 Р/час	Мощность дозы 10 <sup>5</sup> Р/час	Мощность дозы 100 Р/час

В процессе испытаний производится контроль значений давления и температуры. Измерения электрического сопротивления и электрической прочности изоляции между токоведущими частями проводят со стороны ввода, противоположной помещенной в камеру, поочередно между ближайшими токовводами, токовводами и заземленными частями (например, заземленный экран жилы – токоведущая жила) гермоввода через каждый час. На рис. 8.7 приведен график испытательных режимов для гермовводов. В табл. 8.1 приведены параметры установления испытательных аварийных режимов.

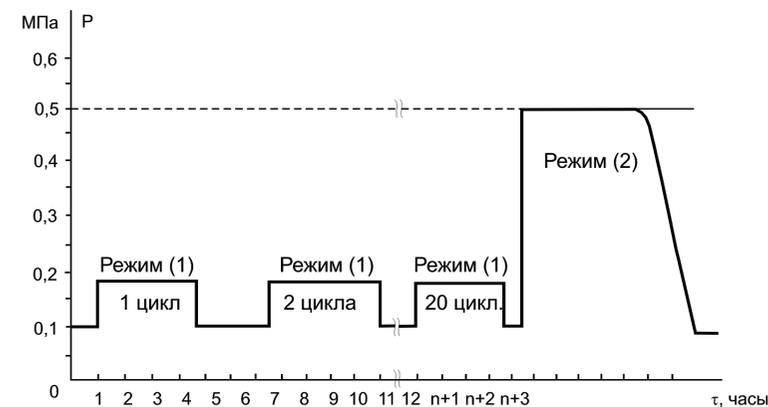


Рис. 8.7. График испытательных аварийных режимов для гермовводов серии ВГКК.

По окончании полного цикла испытаний в процессе облучения до набора интегральной дозы  $5 \cdot 10^8$  Рад и действия других параметров аварийных режимов

гермоввод извлекают из канала гамма-установки, отсоединяют испытательную камеру 8 и производят дополнительную обработку изоляторов и фланца дезактивирующими растворами при одетом защитном кожухе 2 по схеме, приведенной на рис. 8.8.

После обработки дезактивирующими растворами производят замеры электрических параметров, отключают электрические цепи и проводят проверку герметичности изделия.

Основные узлы, обеспечивающие герметичность вводов, – металлокерамические изоляторы, облучались до интегральной дозы в сухом водоохлаждаемом канале кобальтовой гамма-установки до экспозиционной дозы  $10^{10}$  Р при мощности дозы  $4,5 \cdot 10^5$  Р/с и на реакторе до флюенса  $10^{19}$  нейтр./см<sup>2</sup> без потери герметичности и с сохранением электроизоляционных свойств.

**Определение кратности ослабления гамма-излучения (8.2.19).** На АЭС с железобетонной зоной локализации аварии гермовводы должны обеспечивать в местах своего расположения биозащиту эквивалентную толщине железобетонной оболочки. В конструкции гермовводов, предназначенных для этих станций, предусмотрены специальный элемент биологической защиты и квалификационные испытания по определению его эффективности.

Испытания проводились на кобальтовых гамма-установках Института ядерной физики академии наук Узбекистана с мощностью дозы от 400 до 4000 Р/с по схеме, приведенной на рис. 8.9.

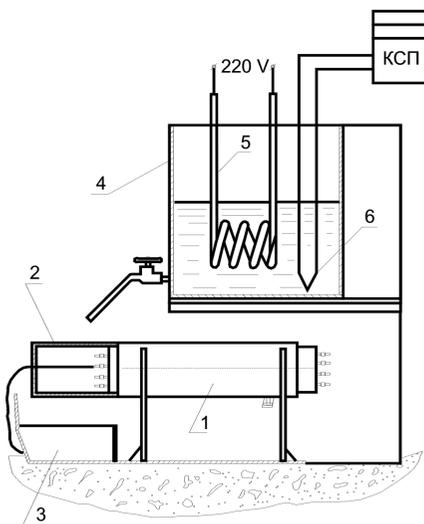


Рис. 8.8. Схема установки для испытания действия дезактивирующих растворов: 1 – гермоввод; 2 – защитный кожух гермоввода; 3 – поддон; 4 – бак с дезактивирующим раствором; 5 – подогреватель; 6 – термомпара.

Герметичные вводы контрольных кабелей подвешиваются на лебедке и устанавливаются на облучателе по направлению коллимированного пучка излучения, радиометром измеряется мощность дозы в точке т. I  $P_{из.}$  на внешней поверхности ввода. Измеряется координата точки т. I с учетом высоты опоры 2 и длины гермоввода 1. Ввод снимается и в точке т. I определяется мощность дозы  $P_I$ . Кратность ослабления  $K$  определяется по формуле:

$$K = \frac{P_{из.}}{P_I}$$

Биозащита в гермовводах предусматривается и в изделиях, предназначенных для корабельных АЭС. Для АЭС новой конструкции со стальной зоной локализации биозащита в гермовводах не предусматривается, т.к. эти функции возложены на вторую железобетонную защитную оболочку.

**Испытания на старение тепловым методом (8.2.13).** Испытания проводились на макете, имитирующем гермоввод типа ВГКК-194 (массой до 10 кг), приведенном на рис. 8.10. Устойчивость проверялась к воздействию температурных циклов в интервале от 20 до 60°С, с целью определения способности изделия выдерживать изменения температуры внешней среды и сохранять свои параметры. Макет был выполнен из материала

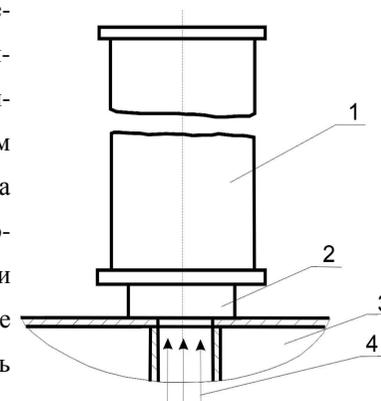


Рис. 8.9. Схема установки для определения кратности ослабления гамма-излучения. 1 – гермоввод; 2 – опора; 3 – гамма-облучатель; 4 – направление потока излучения.

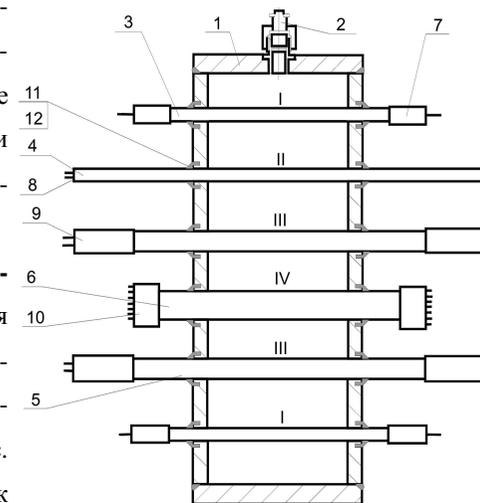


Рис. 8.10. Макет гермоввода для испытаний на термоциклирование: 1 – корпус; 2 – заглушка штуцера; 3, 4, 5, 6 – кабели; 7, 8, 9, 10 – изоляторы; 11 – припой; 12 – флюс.

лов и по технологиям, применяемым при сборке всех видов изделий (табл. 8.2) с нанесенным антикоррозионным покрытием без устройства биологической защиты.

Таблица 8.2

**Испытываемые элементы макета**

Токо-ввод	Кол-во	Кабель	Изолятор	Припой	Флюс
I	2	КМЖ (1×4)-750 ТУ 16-505.870-75	ИПН-400-2,4-1 ТУ 16-528.178-79	ЛОК-59 ГОСТ 16130	Бура марки Б ГОСТ 8429
II	1	КТМС ХА  (2×0,9) ТУ 16-505.757-75	Концевая заделка ситаллом ТУ 88- 633-12205-14-07-90	То же	То же
III	2	КМЖ (2×15)-750 ТУ 16-505.870-75	ИАКК 2-1,9 УХЛ 4. Экспорт ТЖД 686.150.001 ТУ	То же	То же
IV	2	КМЖ (7×2,5)-750 ТУ 16-505.870-75	ИАКК 7-2,4 УХЛ 4. Экспорт ТЖД 686.150 001 ТУ	То же	То же
I	1	КНМС (1×4)-750 ТС 23-03-91	Концевая заделка ситаллом ТУ 88- 633-12205-14-07-90	То же	То же
III	1	КНМС (2×1,5)-750 ТС 22-03-91	То же	То же	То же

При проведении испытаний отклонение значений температуры в испытательной камере не превышало  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха в пределах 45-80%, атмосферное давление – в пределах, обычных для равнинной местности. Изделие располагалось в камере таким образом, чтобы обеспечивалась свободная циркуляция воздуха между макетом и стенками камеры.

Время испытания макета при заданном режиме отсчитывается с момента достижения параметров испытательного режима. При этом длительность времени нагревания (остывания) макета массой от 2 до 10 кг в соответствии с ГОСТ 25804.7 считается равным 3 часам. Время перемещения изделия в камеру и обратно не более 3 минут. Контролируемыми параметрами при испытании являлись герметичность, электрическое сопротивление изоляции и электрическая прочность.

После проверки контролируемых параметров в исходном состоянии макет помещался в климатическую камеру, в которой заранее установлены параметры испытательного режима, и по графику, приведенному на рис. 8.11; макет подвергался термоциклированию, в основе которого положен метод 205-2 по ГОСТу 16962.

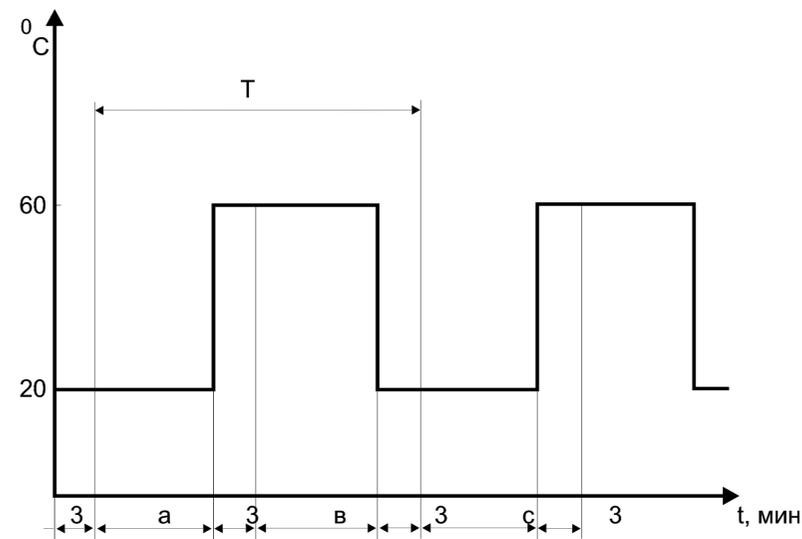


Рис. 8.11. График термоциклирования:  $a=v=c=3$  часа.

После 150 термоциклов производится замер контролируемых параметров, и при отсутствии отклонений испытания продолжают до набора еще 200 циклов.

Макет считается выдержавшим испытания, если после прохождения 350 температурных циклов он сохранил герметичность, а его электрические параметры удовлетворяют требованиям ТУ.

**Механические испытания на прочность при транспортировании в упаковке (8.2.15).** Проводятся на ударном стенде (ГОСТ 23216) или на стенде имитации транспортирования (СИТ-М) в режиме: частота – 4 Гц; среднее ускорение –  $160 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ; среднее число повторений ускорений за 1 час –  $0,57\cdot 10^5$ ; длительность испытаний – 4 час. 16 мин. Гермоввод считается выдержавшим ис-

пытания, если после испытаний при внешнем осмотре не обнаружены механические повреждения, сохранились герметичность и электрические параметры. Упаковка должна сохранить целостность и не иметь заметных следов повреждений.

Совместно с этими испытаниями проводились механические испытания на вибропрочность и виброустойчивость (8.2.17) по ГОСТ 16962.1. Испытания проводятся с подключением электрического напряжения к тоководам, величина которого соответствует типу гермоввода. Изделие считается выдержавшим испытания, если отсутствуют механические повреждения, не зафиксировано замыканий и обрывов в тоководах и узлах присоединения, а также если изделие сохранило герметичность.

**Испытания на нагрев номинальными токами при аварийных режимах (8.2.6).** Герметичные вводы для АЭС проходят испытания на номинальный ток по ГОСТ 2933. Методика расчета и расчет типовых видов гермовводов приведены в 5 главе, а в справочнике по проводам и кабелям [60] приведены зависимости номинальных токов и предельно допустимых токов от конструкции изделия.

Для одножильных кабелей КМЖ максимальные токовые нагрузки на постоянном и переменном напряжении частоты 50 Гц:

Ток, А 22; 28; 37; 49; 62; 84; 111; 146; 177; 226; 277; 333; 377.

Сечение, мм<sup>2</sup> 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120.

При открытой прокладке кабеля допустимая токовая нагрузка зависит от температуры окружающего воздуха [60]:

Температура  $t^{\circ}\text{C}$  25; 30; 40; 50; 60.

Коэффициент  $k$ , для КМЖ 1,06; 1,0; 0,85; 0,68; 0,46.

Для кабелей, проложенных пучком, как в гермовводе, учитывается коэффициент  $k_2$ :

Число кабелей 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14.

Коэффициент  $k_2$  0,8; 0,69; 0,63; 0,59; 0,56; 0,51; 0,48; 0,44; 0,42.

Испытания гермовводов на нагрев номинальными токами проводились при температуре окружающей среды 60°C (режим нормальной эксплуатации) и

при температуре 90°C (режим малой течи). Номинальные токи соответствовали табл. 8.3.

Таблица 8.3

Таблица номинальных токов при испытаниях на нагрев

Номер схемы по табл. 3	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Номинальный ток, А	Количество жил в изделии
1	4	17 (35)*	44
2,4	4	14 (30)*	144
3	2,5	14 (30)*	133

\*В скобках указаны значения допустимых токов при температуре окружающей среды 60°C и в режиме малой течи.

При испытаниях использовался специальный многоамперный трансформатор типа ОМИ-1000/10 при частоте 50 Гц. С помощью перемычек производится коммутация выводов кабелей на фланцах гермоввода согласно рис. 8.12 для гермоввода на 44 проводника и согласно рис. 8.13 для 144 проводников. Откручивается заглушка испытательного штуцера 1 (рис. 8.14) и в контрольную полость (КП) 2 гермоввода вводится конец термопары. КП герметизируется шнуровым асбестом. Спай другой термопары 3 прикрепляется к медной жиле токовода.

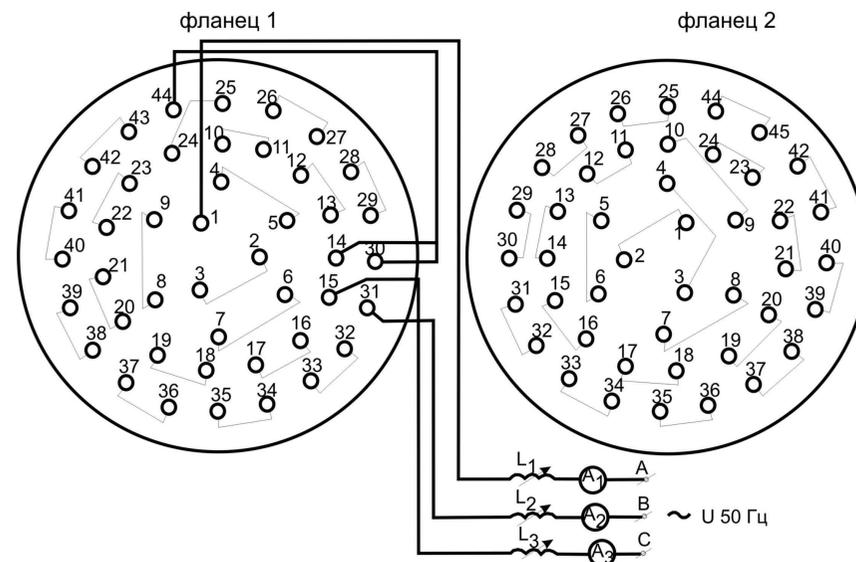


Рис. 8.12. Схема коммутации выводов кабелей на фланцах проходки ВГКК-194-1 на 44 токоввода.

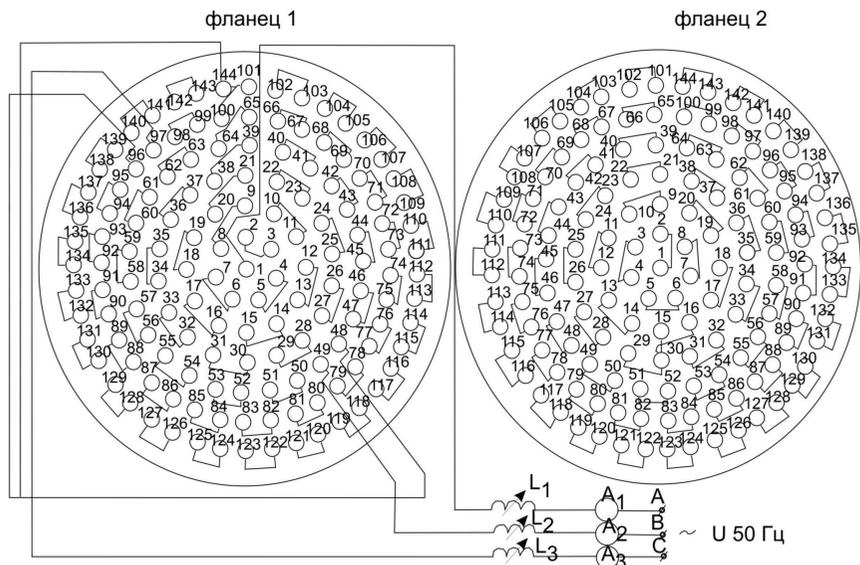


Рис. 8.13. Схема коммутации выводов кабелей на фланцах проходки ВГКК-194-1 на 144 токоввода.

Схема установки для испытания приведена на рис. 8.14.

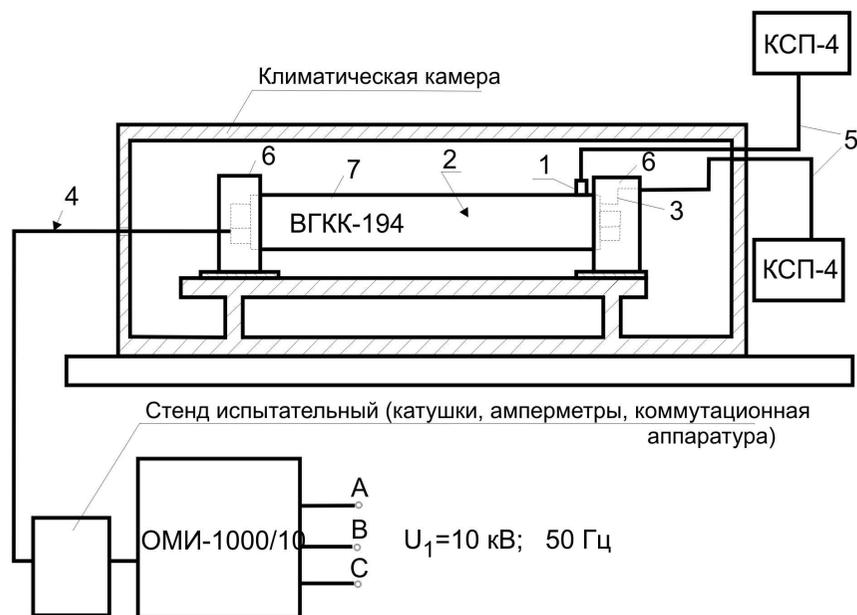


Рис. 8.14. Схема установки для испытания номинальным током.

Силовой кабель 4 и провода термопар 5 пропускаются через сальниковые отверстия кожуха 6 отдельно, после чего на пенал 7 гермоввода одевается и закрепляется крышка защитного кожуха. Сальниковые отверстия, через которые пропускаются силовой кабель и провода термопар, герметизируются асбестовым шнуром. Подготовленный к испытаниям гермоввод помещается в климатическую камеру и через специальный болт заземляется. Силовой кабель выводится через сальниковое уплотнение климатической камеры и подключается к клеммам испытательного стенда. Провода термопар, пропущенные через сальниковые уплотнения камеры, подключаются к приборам КСП-4. Испытания проводятся в соответствии с режимами, приведенными в таблице 8.3, начинаются при нагретом или холодном гермовводе и продолжается до достижения установившейся температуры, но не более 8 часов. С интервалом в 30 мин фиксируется температура нагрева.

Критерием прохождения испытаний с положительной оценкой является сохранение герметичности и электротехнических параметров, нормируемых Техническими условиями.

**Испытания на термическую и динамическую устойчивость при токах короткого замыкания (8.2.7).** Испытания гермовводов на токи короткого замыкания проводились при нормальных атмосферных условиях по ГОСТу 15150 в соответствии с режимами электрических цепей по табл. 8.4.

Таблица 8.4

Стойкость гермовводов к токам короткого замыкания

Номер схемы по Приложению 3.3.	Сечение жилы гермоввода мм <sup>2</sup>	Динамическая стойкость		Термическая стойкость	
		ток К.З., кА	время, с	ток К.З., кА	время, с
1	4	1,9	0,1	1,3	1
2,4	4	1,7	0,1	1,2	0,5
3	2,5	1,7	0,1	1,2	0,5

Испытаниям изделия подвергались по трехфазной и однофазной схеме: по трехфазной – проводники схем 1-4 (Приложение 2), а также 6 проводов схемы 2, предварительно соединенные шлейфами; по однофазной – четыре проводника схемы 1, предварительно соединенные шлейфом.

Схема управления испытательной установкой приведена на рис. 8.15. В процессе испытаний запускался ударный генератор и, меняя положение регулирующих органов катушек индуктивности, добиваются (при нажатой кнопке управления, замкнутых контактах реле времени) значений токов, указанных в табл. 8.4 для испытываемой схемы (этап калибровки). Контроль осуществляется шлейфовым осциллографом.

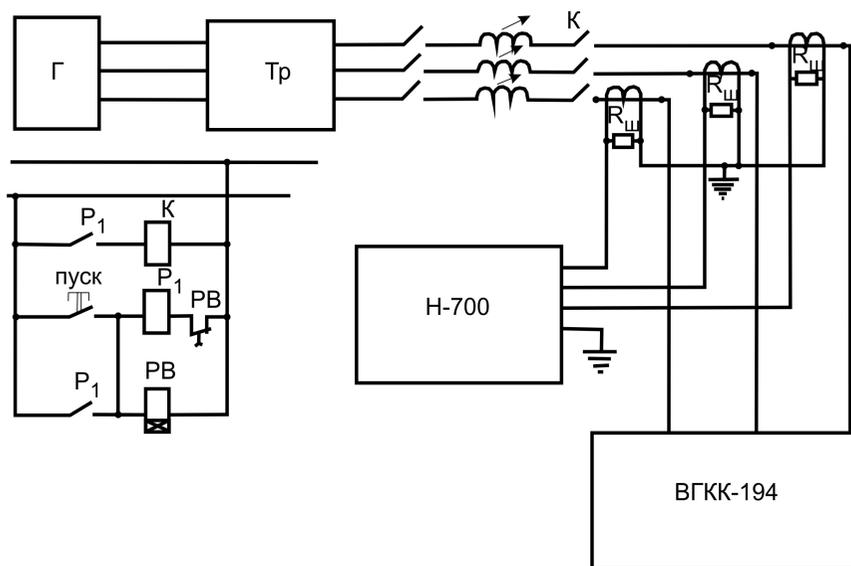


Рис. 8.15. Схема управления испытательной установкой для К.3.

После калибровки снимаются перемычки с проводов, подходящих к гермовводу, и с контактов реле времени. Запускался ударный генератор, и проводятся испытания на К.3. согласно табл. 8.4.

Гермовводы считались стойкими к динамическому действию тока короткого замыкания, если это действие не приводит к механическому разрушению металло-керамических изоляторов, проводников, мест их пайки и крепления, а показатели электрического сопротивления изоляции и ее электрической прочности остаются в пределах нормы.

Количество тепла, выделенное электрическим током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени дей-

ствия тока. Время прохождения тока термической устойчивости К.3. определяется скоростью срабатывания отключающей аппаратуры защиты. Так как при К.3. ток значительно превышает номинальный рабочий ток, то, несмотря на небольшую длительность, возможен значительный перегрев проводников. При термическом воздействии К.3. в результате перегрева возможны выгорание и потеря эластичности изоляции, а также снижение ее электрофизических показателей, ухудшение механических свойств токоведущих жил [96].

Гермовводы считались выдержавшими испытания на термическую устойчивость при К.3., если не происходит такого нагрева токоведущих частей, которое может привести к расплавлению жил проводников и разрыву электрических цепей или к снижению электрического сопротивления изоляции, и (или) электрической прочности до недопустимых значений при безусловном сохранении герметичности.

При времени срабатывания защиты, отличном от указанного в табл. 8.4, перерасчет тока термической стойкости производится по формуле:

$$I_{к.з.тер.} = I_{к.з.таб.} \sqrt{\frac{t_{таб.}}{t}},$$

где  $I_{к.з.тер.}$  – ток термической стойкости, А, при  $t$  времени срабатывания защиты;  $I_{к.з.таб.}$  – ток термической стойкости при  $t_{таб.}$  – табличном времени срабатывания защиты.

**Испытания на сейсмостойкость (8.2.20).** Для подтверждения сейсмостойкости вводы в соответствии с нормами проектирования сейсмостойких атомных станций ПНАЭГ-5-006, требованиями руководящего документа РД 16.20.1.02 отнесены к I-категории сейсмостойкости, и испытывались на виброустойчивость и вибропрочность согласно ГОСТу 17516.1 методом фиксированных частот (дискретного сканирования гармонических воздействий), эквивалентных сейсмическому воздействию при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) 8 баллов в трех взаимно перпендикулярных направлениях раздельно.

Ускорения колебаний (максимальные в горизонтальном направлении) определялись исходя из балльности площадки АЭС, категории сейсмостойко-

сти, спектров ответов. Максимально допустимая амплитуда ускорения –  $140 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ .

При испытаниях контролировались герметичность ввода, целостность его токовводов (омическое сопротивление) и электрическое сопротивление изоляции. Образцы брались полной заводской готовности с защитными кожухами. При подготовке к испытаниям снимаются кожуха, проверяются все исходные характеристики гермоввода, производится подсоединение жил кабеля к выводам токовводов на фланцах с обеих сторон. Количество произвольно выбранных контролируемых токовводов должно быть не менее пяти. Через сальниковые отверстия пропускают подводящие и отводящие кабели и закрепляют кожуха в рабочем положении на пенале гермоввода, закручивают гайки сальников, устанавливают гермоввод на платформу вибростенда, жестко закрепляют его таким образом, чтобы кожуха гермоввода не касались платформы. Компрессором, либо через редуктор от баллона сжатого воздуха (азота) через гибкий шланг и манометр, который должен быть закреплен так, чтобы не испытывать воздействия вибрации, в контрольную полость гермоввода через отверстие испытательного штуцера плавно подается давление  $0,56 \text{ МПа}$ , за время не менее  $2 \text{ мин}$ .

Проверка герметичности паяных и сварных швов производится до, в процессе и после воздействия каждого цикла вибрации путем нанесения слоя водно-мыльной эмульсии на швы и визуального наблюдения за появлением пузырьков воздуха (газа) в местах нанесения, а также по показаниям манометра. По мере высыхания, что устанавливается визуально, слой эмульсии возобновляют, для чего воздействие вибрации прерывается. Водно-мыльная эмульсия наносилась на паяные швы фланцев с оболочкой кабеля и сварной шов корпуса испытательного штуцера к трубе гермоввода.

Испытания на сейсмостойкость методом фиксированных частот проводят в поддиапазонах с граничными частотами 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 15; 16; 20; 25;  $31,5 \text{ Гц}$  при МРЗ, равном 8 баллам. При частоте  $10 \text{ Гц}$  и выше испытания выполняют путем плавного изменения частоты от нижней до верхней и обратно

в каждом поддиапазоне со скоростью, установленной для метода кажущейся частоты, при поддержании постоянной амплитуды перемещения  $A$ , определяемой по формуле:

$$A = \frac{25a}{f^2},$$

где  $A$  – амплитуда перемещения, мм;  $a$  – амплитуда ускорения,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ , соответствующая частоте  $f$ ;  $f$  – частота, Гц.

При частотах ниже  $10 \text{ Гц}$  испытания проводятся на граничных частотах с выдержкой на каждой частоте в течение времени (в пределах  $10\text{-}30 \text{ с}$ ), необходимого для проверки и регистрации контролируемых параметров.

Максимальные амплитуды ускорений в вертикальном направлении устанавливаются равными  $0,7$  значений для горизонтальных направлений. Учитывалось, что гермовводы устанавливаются не выше уровня  $28 \text{ м}$ . Время выдержки на каждой частоте должно быть достаточным для проверки герметичности, электрического сопротивления изоляции и омического сопротивления жил кабеля и контактных соединений. Общая продолжительность испытания распределяется поровну между каждым из трех циклов (компоненты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  МРЗ). Предпочтительное время испытания в заданном режиме для одного направления  $15 \text{ мин}$ . Параметры режима устанавливаются в контрольной точке – на платформе (плите) вибростенда рядом с одной из точек крепления ввода или на крепежном приспособлении вблизи платформы стенда.

Испытания прекращаются в случае: разгерметизации ввода, фиксируемое по падению давления и наличию пузырьков газа в местах нанесения водно-мыльной эмульсии; механических повреждений металло-стеклокерамических модулей (изоляторов), кабелей, элементов защитного устройства гермоввода; падения электрического сопротивления изоляции токовводов ниже допустимых пределов; возрастания омического сопротивления жил кабеля совместно с контактными соединениями выше допустимых значений. При обнаружении подобных неисправностей изделие снимается с испытаний.

После имитации на вибрационном стенде по трем взаимоперпендикулярным направлениям (компоненты  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) параметров максимального расчетно-

го землетрясения (МРЗ), контролируемого по спектрам ответов, гермоввод должен сохранять эксплуатационные параметры, обусловленные Техническими условиями на продукцию и методиками испытаний изделий на герметичность, электрическое сопротивление изоляции, электрическое сопротивление контактных соединений, а конструкция сохранить механическую прочность.

Настоящие испытания проводились на вибрационном стенде ВЭДС-400 А с пределами измерений  $f=1 - 50$  Гц,  $g=25$  м·с<sup>-2</sup>.

#### Испытание на определение огнестойкости в условиях пожара (8.2.21).

Методика разработана совместно с НИИ Противопожарной обороны МВД РФ с учетом требований стандартов СТ СЭВ 1000-88 «Пожарная безопасность в строительстве. Строительные конструкции. Методы испытания на огнестойкость» и ГОСТ 12.1.004-85 «Пожарная безопасность. Общие требования» и регламентирует методы испытания вводов в части определения их огнестойкости – времени, в течение которого он, находясь под воздействием пожара, сохраняет герметичность со стороны, противоположной пожару. Таким образом, учитывая, что гермовводы имеют два барьера герметичности, нарушение герметичности с одной стороны не приводит к нарушению герметичности зоны. При необходимости возможно обеспечение целостности герметизации и со стороны пожара при использовании специальных защитных кожухов с засыпкой из материала, поглощающего тепло при нагреве до температуры 500°С.

Испытания на огнестойкость проводятся при температуре воздуха на полигоне в пределах  $T=20\pm 10^{\circ}\text{C}$  и при скорости движения воздуха не более 0,5 м/с. Испытаниям подвергаются изделия полной сборки с защитными кожухами и с нанесенным антикоррозионным покрытием на специальном стенде (рис. 8.16) для испытания нагревом в условиях стандартного температурного режима (СТР) пожара. СТР пожара создается в огневой камере 9, комбинированным нагревом – излучением от электронагревателей 1 и пламенем газовой горелки 3. Использовались карбидокремниевые нагреватели типа КЭН БС 25/400/70, установленные вдоль боковых стенок камеры и вдоль крыши по 4 штуки в каждой плоскости. Расстояние от плоскостей, в которых размещены электронагреватели, до поверхности испытуемого образца равно 300 мм.

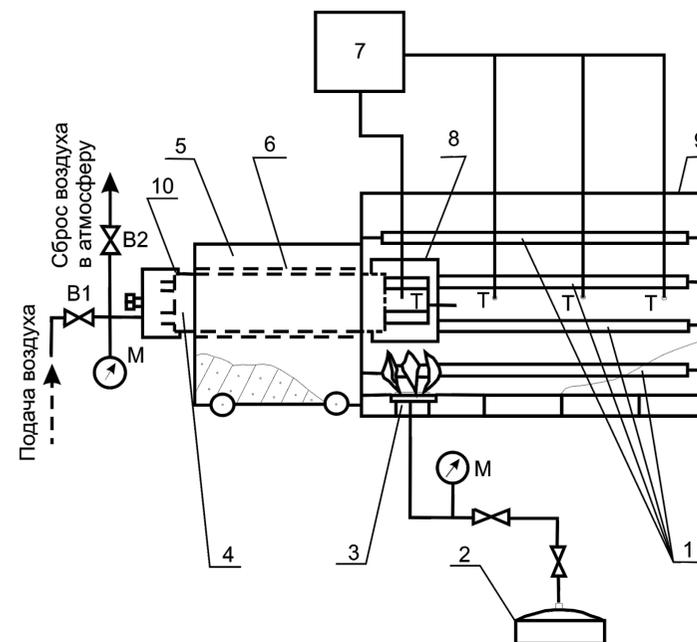


Рис. 8.16. Экспериментальная установка (стенд) для испытания нагревом в условиях СТР пожара:

1 – электронагреватели; 2 – баллон с пропаном; 3 – газовая горелка; 4 – образец ввода; 5 – фрагмент бетонной стены; 6 – закладная труба; 7 – КСП-4; 8 – кожух; 9 – огневая камера; Т – термопары; 10 – испытательный колпак.

Газовая горелка 3 устанавливается внутри огневой камеры 9 под кожухом 8 испытуемого образца гермоввода 4 так, чтобы часть ввода с изоляторами, токопроводами, защитным устройством и отрезками кабельных линий находилась в зоне действия СТР.

Температура в печи измеряется термопарами не менее чем в трех точках. Конец гермоввода, помещаемый в огневую камеру, подготавливается следующим образом: снимается кожух защитного устройства, через сальниковые отверстия кожуха вводятся термопары. Свободное пространство в сальниках герметизируется асбестом. Через остальные сальниковые отверстия вводятся контрольные кабели, которые также фиксируются и герметизируются. Концы кабеля микросваркой привариваются к выводам конца гермоввода, подвергаемого воздействию пожара. Разделка кабеля производится в соответствии с монтаж-

ной инструкцией. После этого одеваются крышки кожуха, крепятся к кольцу и заворачиваются гайки сальников. В случае, если остаются свободные сальниковые вводы (без кабельных линий), они герметизируются керамическими втулками или асбестом.

К трубе (корпусу) гермоввода, со стороны противоположной пожару, приваривается стальной испытательный колпак (10 на рис. 8.16), с внутренним диаметром 192 мм, высотой около 200 мм, с толщиной стенки 6 мм, оборудованный штуцером и ниппелем 1 (рис. 8.17).

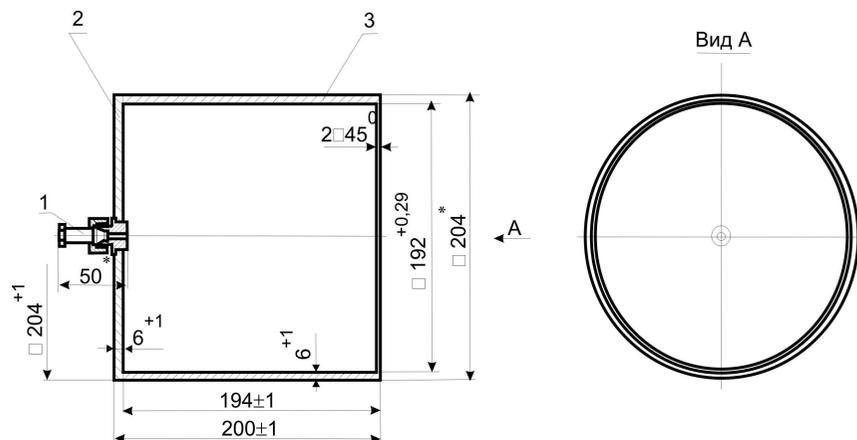


Рис. 8.17. Испытательный колпак приваривается к трубе швом ГОСТа 14771-76 Т6-УП-Δ6ω. Допускается сварка по ГОСТу 5264-80 Т6-УП-Δ6ω\* (размеры для справок): 1 – штуцер; 2 – дно; 3 – корпус колпака.

Гермоввод (4 на рис. 8.16) помещают через закладную трубу в огневую камеру, предварительно нагретую до температуры 500°C до 1/5 его длины. Зазор между закладной трубой и пеналом гермоввода герметизируют асбестом. Отворачивают полностью заглушку штуцера 1 рис. 8.17 испытательного колпака, закручивают гайку ниппеля с закрепленным на нем шлангом от компрессора, либо от баллона (с редуктором) сжатого воздуха (азота), под испытательный колпак плавно подают давление до 0,56 МПа за время не менее 2 мин.

В соответствие со стандартом в печи создается тепловой режим, соответствующий изменению температуры по закону

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8.1)$$

где  $t$  – время от начала испытаний в мин.;  $T$  – температура в печи, °C за время  $t$ ;  $T_0$  – температура до теплового воздействия или согласно табл. 8.5.

Таблица 8.5

#### Режим нагрева образца при испытаниях на огнестойкость

Время, мин.	5	10	15	30	45	60	90
Повышение температуры в печи	556	695	718	821	875	925	986

Нагрев обеспечивается электронагревателями и газовой горелкой. За температуру в печи в определенный момент принимается среднее арифметическое значение температур, измеренных с помощью термопар, установленных в разных точках печи.

Среднее отклонение температуры в печи от кривой стандартного пожара определяется по формуле:  $\frac{A - B}{B} \cdot 100$ , где  $A$  – значение среднего повышения температуры в печи в функции времени;  $B$  – значение температуры, определяемой по кривой стандартного пожара.

Среднее отклонение температуры в печи должно быть не более  $\pm 15\%$  в течение первых 10 мин. испытаний,  $\pm 10\%$  в течение от 10 до 30 мин. и  $\pm 5\%$  после 30 мин. После первых 10 мин. от начала испытаний на любой из термопар допускается отклонение от стандартной кривой и соответственно, от значений, полученных расчетным путем по формуле (8.1) не более чем на  $\pm 100^\circ\text{C}$ . Измерение температуры при испытаниях проводится в печи и в пространстве внутри защитного устройства гермоввода с интервалом 5 мин. Контролируются характер и время появления трещин, отверстий, отслоений и иных повреждений; разрушение узлов соединений; состояние герметичности гермоввода по показаниям манометра и время разгерметизации; все другие нарушения целостности и технических характеристик.

По истечении 90 мин. испытаний электрообогреватели и газовую горелку выключают и вентилируют огневую камеру. Гермоввод быстро удаляют из камеры и оставляют остывать при температуре окружающей среды. После достижения температуры окружающей среды производят контроль герметичности

через штатный испытательный штуцер и через штуцер испытательного колпака.

Состояние конструкции гермоввода при пирометрических испытаниях характеризуется теплоизолирующей способностью защитного устройства и корпуса гермоввода, оцениваемой по температуре воздуха в пространстве под кожухом и как следствие этого – герметичность корпуса гермоввода.

Гермоввод считается выдержавшим испытания с положительной оценкой, если не произошло разгерметизации со стороны, противоположной пожару. Это является основным и достаточным критерием оценки пригодности ввода. Если сохраняется нормируемое значение электрического сопротивления и электрической прочности изоляции, то это служит дополнительным аргументом, подтверждающим правильность принятых технических решений и качества изготовления.

#### 8.4. Сопоставление с международными нормативными документами

**Стандарт МЭК (IEC) 60772-83 Международной Электротехнической Комиссии** (Electrical Penetration Assemblies in Containment structures for Nuclear Power Generating Stations). Стандарт включает требования к конструкции, схеме, испытаниям и установке электрических проходок (гермовводов) в герметичной оболочке зоны локализации аварии кроме первичной оболочки ядерной энергетической установки. Требования по подключаемым цепям в стандарте не рассматриваются. Включаются требования по безопасности, расчету, изготовлению, испытаниям, монтажу и обслуживанию проходок. Они обеспечивают газонепроницаемое и вакуумное прохождение через оболочку зоны электрических цепей вплоть до ближайших соединительных точек в пределах и вне оболочки, компоненты для вакуумного, газонепроницаемого и теплостойкого включения пучка проводников и для соединения со стенкой оболочки.

В состав гермоввода не входят: компоненты стенки и оболочки и система уплотнений и сварки, кабели и линии, соединяемые с проводниками проходок, зажимы, используемые для подсоединения кабелей к проводникам проходки,

устройства для испытания на герметичность временно присоединяемые к гермовводу.

Классификация и номиналы проводников в проходках должны соответствовать национальным стандартам. По стандарту МЭК используется следующая классификация:

1) три фазовых проводника на напряжение свыше 1000 В относятся к напряжению средней мощности (Medium-Voltage Power);

2) проводники в трехфазных цепях под напряжением 1000 В и ниже относятся к низкому напряжению (Low-Voltage Power);

3) цепи регулировки и контроля на напряжение ниже 1000 В относятся к контрольным цепям низкого напряжения (Low-Voltage Control);

4) цепи контрольно-измерительных приборов, к которым относятся коаксиальные, триаксиальные, термопарные и др., связанные с измерительными и контрольными линиями (Instrumentation).

Стандарт МЭК регламентирует ряд параметров гермовводов\*.

**Номинальные параметры гермовводов (проходок) для АЭС.** Максимальный ток короткого замыкания с потерей электрической целостности, но без потери герметичности должен быть согласован со сверхтоковым предохранительным устройством. Запас механической прочности при электродинамическом ударе – не менее двух.

Номинальное давление и температура гермоввода должны быть не меньше максимального давления и температуры под оболочкой в зоне локализации аварии. Минимальная эксплуатационная температура – 0°C. Максимальная допустимая температура на корпусе гермоввода – 70°C.

Максимальная температура в узлах стыковки (в зажимах) не должна превышать 30°C сравнительно с окружающей средой.

Гермоввод должен соответствовать требованиям Котлонадзора для резервуаров высокого давления. Максимальная скорость утечки газа при 20-15°C

\* В настоящее время утвержден ГОСТ Р 52287-2004, который является модифицированным к международному стандарту с учетом потребности национальной экономики [97].

при максимальном давлении под оболочкой зоны локализации для неустановленного гермоввода  $10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па}\cdot\text{с}^{-1}$ , для установленного, включая отверстие уплотнения, –  $1 \text{ м}^3 \text{ Па}\cdot\text{с}^{-1}$ . Утечка должна контролироваться без отключения любой внешней цепи от проходки.

При испытаниях электрическая проходка должна выдерживать совокупность всех эксплуатационных условий, сохраняя целостность (за исключением случая короткого замыкания, когда возможна потеря электрической целостности). Изделие должно выдерживать без повреждений при хранении и транспортировке температуры от  $0^\circ\text{C}$  до  $70^\circ\text{C}$  и транспортные вибрации.

Монтаж гермоввода в оболочке производится со стороны «грязной» зоны и герметизация может выполняться с помощью болтовых уплотнений или сваркой.

Должна быть исключена конденсация влаги в проходке. Она должна быть сейсмостойкой с подключенными подводными и отводящими цепями. Необходимо обеспечить водо и пылезащищенность гермоввода, и возможность очистки при дезактивации оболочки.

Огнестойкость должна соответствовать требованиям пожарной безопасности для зоны локализации. В конструкции необходимо предусмотреть возможность контроля давления и подхода для технического обслуживания с учетом возможного наличия радиационного поля.

Кабельные проходки, устанавливаемые между термопарой и компенсационным элементом, не должны создавать дополнительных термоцепей. Проходки в коаксиальных и триаксиальных кабельных линиях не должны ухудшать их передающих характеристик.

В качестве проводникового материала используется медь (за исключением термопарных цепей).

Электрическая изоляция не должна ухудшать механические характеристики под воздействием температуры в условиях эксплуатации, снижать электрическую прочность в процессе старения под напряжением и под воздействием радиации, выдерживать агрессивное воздействие атмосферной среды в про-

цессе аварии. В гермовводах (проходках) среднего (Medium-Voltage Power) и низкого и контрольного (Low-Voltage Power, Low-Voltage Control) напряжения испытания на электрическую прочность в течение не более одной минуты проводятся напряжением между каждым проводником и землей и между каждым проводником и смежными проводниками, не отделенными заземленным барьером. Величина испытательного напряжения определяется национальными стандартами. Электрическая прочность для проходок контрольно-измерительных приборов (Instrumentation) проверяется в соответствии с требованиями системы, в которой они применяются.

Сопротивление изоляции для гермовводов на среднее напряжение (Medium-Voltage Power)  $1\cdot 10^9 \text{ Ом}$  при 2000 В постоянного тока, на низкое напряжение (Low-Voltage Power) –  $10^9 \text{ Ом}$  при 500 В, для контрольно-измерительных приборов – в соответствии с требованиями для соответствующих систем.

Испытания в условиях возможной расчетной аварии (LOCA) проводятся в соответствии с соответствующими температурными и атмосферными параметрами при номинальных электрических нагрузках. Радиационные испытания могут проводиться до испытаний в условиях аварийных режимов.

**Стандарт IEEE № 317 (институт инженеров электриков и электронщиков).** Стандарт IEEE является первым нормативным документом по гермовводам для АЭС, широко используемым в международной практике, предшествовавшим стандарту МЭК, который сохранил в основном его структуру и большинство нормативных характеристик.

Эксплуатационные квалификации в последней редакции стандарта IEEE совпадают со стандартом МЭК 60772-83, но более четко регламентирована шкала номинальных напряжений (табл. 8.6) и номинальных эксплуатационных (длительных) токов с учетом снижения токовой нагрузки на проводник в зависимости от количества проводников в проходке (гермовводе).

В стандарте регламентированы квалификационные и заводские испытания, сопроводительная документация. В квалификационных испытаниях радиационные исследования проводятся до испытаний в аварийных режимах в нор-

мальных атмосферных условиях, и аварийные режимы не учитывают действие радиации как активатора многих физических и химических процессов [98, 99].

Таблица 8.6

**Рекомендуемая шкала производственных номиналов по напряжению для силовых и контрольных гермовводов**

Система номинальных напряжений (В)	Производственный номинал (В)
0-300	300
301-600	600
601-1000	1000
1001-5000	5000
5001-8000	8000
8001-15000	15000

**ГЛАВА 9.  
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ  
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ  
С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ**

Техническая керамика обладает уникальными свойствами и эксплуатационными характеристиками. Она необходима как для совершенствования существующих, так и для создания принципиально новых технологий и конструкций. Керамические материалы в 1,5-2 раза легче металлов. Благодаря устойчивым эксплуатационным свойствам, таким как износостойчивость, стойкость к эрозии, окислению и коррозии они пригодны для использования в условиях, лежащих за пределами возможностей применения металлов (окислительные среды с температурой до 1600°C, сочетание высоких температур и больших нагрузок). В последнее время все больший интерес вызывает использование этих материалов в качестве определенных узлов в различных технологических проектах. В связи с этим возникает необходимость соединения керамических сегментов с другими элементами конструкций. Надежная технология соединений является определяющей для эксплуатационных свойств конструкции в целом. Следовательно, необходимо признать, что вопрос соединения является ключевым технологическим моментом для будущего керамического производства.

Развитие атомной энергетики требует создание новых материалов, способных обеспечить нормальное функционирование и защиту ядерных реакторов различного типа, начиная от традиционных, работающих на медленных нейтронах, и кончая термоядерными. Среди этих материалов особое место занимает оксидная керамика. В зоне локализации аварии расположено значительное количество оборудования, для которого требуется ввод большого числа силовых и контрольных кабелей, способных работать в экстремальных условиях. Решение данной задачи напрямую связано с созданием металлокерамических изоляторов на основе оксидной керамики, которые являются необходимым элементом конструкции при разработке герметичных вводов различного функционального назначения.

Перспективной, на наш взгляд, является конструкция, в которой металлическая оболочка кабеля и изолятор соединяются между собой (рис. 9.1) до процесса пайки кабеля во фланец. Такая конструкция позволит оптимизировать процесс сборки и превращает кабель с изолятором в самостоятельный герметичный модуль, обеспечивающий изоляцию данного модуля от остального объема гермоввода.

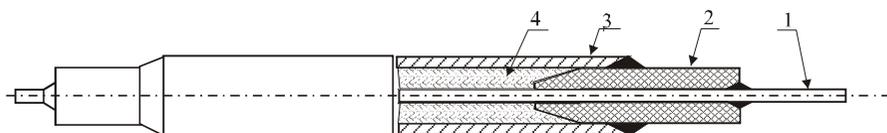


Рис. 9.1. Кабельный модуль:

1 – жила; 2 – керамический изолятор; 3 – оболочка кабеля; 4 – магниевая изоляция кабеля.

Методы соединения керамических материалов хорошо известны: механическая оснастка, склеивание, пайка. Механическая оснастка и склеивание приемлемы для относительно низких температур. Для получения надежных соединений широко используется молибдено-марганцевая технология. Однако для процесса металлизации требуется очень высокая температура (1500°C) в восстановительной среде. Кроме того, этот метод неприменим для соединения керамики с малым содержанием стеклофазы. Прямую пайку металла к керамике можно реализовать, используя активные припои. Для этого в присадочные металлы добавляют титан, что способствует смачиваемости припоем поверхности керамики. Хотя первые работы по использованию этого метода относятся к 1940 г., этот способ не получил широкого распространения в связи с нестабильностью свойств получаемого соединения. Существует несколько вариантов пайки активными припоями, отличающиеся формой использования активного элемента: фольга, покрытие, порошок. Однако наиболее широкое распространение получил метод, при котором активный элемент находится в виде сплава с основными элементами припоя.

Промышленная пайка материалов обычно осуществляется такими системами как  $AgCuTi$ ,  $AgCuSnTi$ ,  $AgCuInTi$  и т. д. Эвтектический состав системы  $AgCu$  является наиболее предпочтительным благодаря относительной пластич-

ности, а следовательно, способности ограничивать напряжения, возникающие между двумя материалами с различными коэффициентами термического расширения. В результате присутствия в составе благородного металла рабочая температура припоя сравнительно низкая. Химический состав и некоторые свойства одного из используемых припоев представлены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

#### Химический состав и свойства припоя для активной пайки

Cusil-ABA	
Состав	63wt% Ag+35wt% Cu+2wt% Ti
Физические свойства	
Температура плавления	815°C
Плотность	9.8 г/см <sup>3</sup>
Теплопроводность	180 W м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
Коэффициент термического расширения	18.5×10 <sup>6</sup> К <sup>-1</sup>
Электрическая проводимость	23×10 <sup>6</sup> Ом <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup>
Механические свойства	
Модуль Юнга	83 ГПа
Коэффициент Пуассона	0.36
Предел текучести	271 МПа
Предел прочности при растяжении	346 МПа
Твердость	1100 МПа

$NiTi$  припои могут использоваться при более высоких температурах. Однако на сегодняшний день они не нашли широкого применения, так как обладают плохой пластичностью, которая является очень важной при компенсации напряжений в зоне пайки. Существуют также проблемы с механической обработкой, особенно для  $NiTi$  сплавов с высоким содержанием титана.

При создании металлокерамических соединений необходимо учитывать физико-химические свойства используемых материалов. Это относится не только к керамике и основным соединяемым сплавам, но также к припоям, промежуточным слоям и покрытиям, часто используемым для металлизации керамической поверхности. Применение промежуточных слоев является одним из способов, решающих проблему остаточных термических напряжений, а покрытие необходимо для получения смачиваемости и адгезии между двумя химически разнородными материалами: припоем и керамикой. Общая схема металлокерамического спая представлена на рис. 9.2.

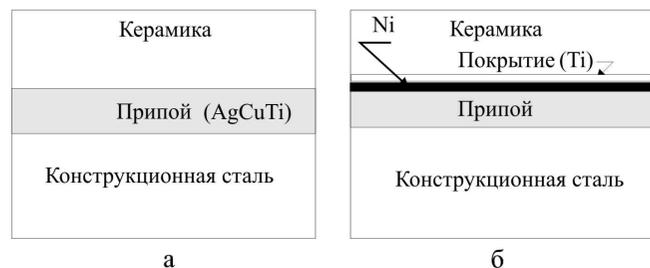


Рис. 9.2. Общая схема металлокерамического спая:

а) – традиционный, с использованием активных добавок (Ti); б) – способ пайки, использующий металлические слои.

При выборе материалов для покрытия необходимо учитывать возможность образования промежуточного реакционного слоя, который играет важную роль для создания прочного соединения. Конечный результат при пайке определяется различными физико-химическими процессами, происходящими одновременно, поэтому общая методология исследования должна основываться на всестороннем подходе.

**Смачивание.** Процесс смачивания определяется физико-химическими взаимодействиями на поверхности раздела фаз, которые участвуют в смачивании. Контактное смачивание характеризуется величиной краевого угла – угла между поверхностью жидкости и твердого тела на границе с окружающей средой. В зависимости от значения равновесного краевого угла различают три основных случая [100].

1. Несмачивание – краевой угол тупой:  $180^\circ > \theta > 90^\circ$ .

2. Смачивание – краевой угол острый:  $90^\circ > \theta > 0^\circ$ .

3. Полное смачивание. Равновесный краевой угол не устанавливается капля растекается в тонкую пленку.

Смачивание или адгезия металла к керамике зависит от химической совместимости металла и керамики, куда входят: химический состав соединяемых материалов, химические реакции в зоне контакта, состав газовой среды, поверхностная энергия керамики и поверхностное натяжение металла.

Для слабо реагирующих систем, таких как Pt на  $Al_2O_3$ , краевой угол  $\theta$  можно характеризовать хорошо известным равенством Юнга

$$\sigma_{mz} - \sigma_{mж} = \sigma_{жг} \cdot \cos \theta$$

Отсюда следует

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{mz} - \sigma_{mж}}{\sigma_{жг}}, \quad (9.1)$$

где  $\sigma_{mz}$ ,  $\sigma_{mж}$ ,  $\sigma_{жг}$  – удельные поверхностные энергии границ раздела твердое тело – газ, твердое тело – жидкость и жидкость – газ соответственно,  $\theta$  – краевой угол смачивания. Другой важной величиной, характеризующей взаимодействие двух конденсированных фаз в расчете на единицу площади, является работа адгезии, равная разности свободных поверхностных энергий в конечном и начальном состоянии системы. Следовательно,

$$A_{адг} = \sigma_{mz} + \sigma_{жг} - \sigma_{mж},$$

или используя уравнение (9.1)

$$A_{адг} = \sigma_{жг} (1 + \cos \theta) \quad (9.2)$$

В системах, где имеет место химическое взаимодействие между металлом и керамикой, изменение свободной энергии системы, связанное с реакцией, может быть значительно больше, чем поверхностная энергия границы раздела фаз. К такой системе относится Ti на  $Al_2O_3$ , где изменение поверхностной энергии незначительное и смачивание происходит за счет изменения свободной энергии в результате реакции на границе раздела фаз. Для системы, состоящей из жидкой фазы В, смачивающей твердую фазу А и формирующей фазу С ( $A \times B \gamma$ ), равновесный угол смачивания  $\theta_p$  будет всегда меньше, чем в случае отсутствия реакции взаимодействия.

Движущая сила смачивания  $dE/dr$  будет определяться суммой изменения энергии системы за счет реакции  $\gamma$  и изменения поверхностной энергии на границе раздела фаз  $F(\theta)$  [101], т.е.:

$$\frac{1}{2\pi r} \frac{dE}{dr} = \gamma + F(\theta) \quad (9.3)$$

$$F(\theta) = \sigma_B (\cos \theta - \cos \theta_p)$$

$$\cos \theta_p = \frac{\sigma_A - \sigma_{AC} - \sigma_{BC}}{\sigma_B}$$

$$\gamma = \frac{\rho_A \cdot t_A}{x \cdot M_A} \cdot \Delta G_p, \quad (9.4)$$

где  $E$  – внутренняя энергия системы;  $\Delta G_p$  – свободная энергия Гиббса образования состава  $A_xB_y$ ;  $\rho_A$  – плотность  $A$ ;  $t_A$  – толщина элемента  $A$ , вступающего в реакцию с образованием  $A_xB_y$ ;  $x$  – число атомов в соединении  $A_xB_y$ ;  $M_A$  – атомная масса элемента  $A$ .

**Взаимодействие титана с керамикой на основе оксида алюминия.** Основная роль титана в активных припоях – диссоциация поверхности  $Al_2O_3$  для улучшения смачиваемости. Механизм взаимодействия титана и оксида алюминия является ключевым для получения металлокерамического спая, поэтому в литературе этому вопросу уделялось определенное внимание; авторы пришли к мнению, что в зоне контакта титана с керамикой протекают окислительно-восстановительные процессы. Исследования, проведенные нами, подтверждают эти выводы.

Образцы для исследования представляли собой спеченные и исходные смеси равных объемов титана с оксидом алюминия. Продукты взаимодействия идентифицировали путем расшифровки рентгенограмм, полученных при помощи дифрактометра Дрон-3. При расшифровке рентгенограмм исходных смесей титана с оксидом алюминия и образцов  $Ti+Al_2O_3$ , спеченных при  $1200^\circ C$  в течение одного часа (рис. 9.3.), обнаружены раздвоенные линии титана с уменьшенным и с увеличенным значением дифракционных углов, что соответствует образованию в процессе спекания двух различных твердых растворов: твердого раствора внедрения кислорода в титане и твердого раствора алюминия в состоянии замещения. Полученные данные хорошо согласуются с результатами других исследователей [102-106]. Как следует из работ [105, 106], образование твердого раствора кислорода в титане начинается в интервале  $600-700^\circ C$ , а при  $775^\circ C$  происходит и образование твердого раствора алюминия в титане. Эти растворы присутствуют до температуры спекания  $1400^\circ C$ .

Для выяснения влияния времени выдержки на процесс взаимодействия  $Ti$  с алюмооксидной керамикой были проанализированы рентгенограммы титановых покрытий, полученных электродуговым методом в вакууме на керамике МК (99.3%  $Al_2O_3$ ) и отожженных в течение 5 час. при температуре  $1000^\circ C$ . При ана-

лизе дифрактограмм обнаружена новая фаза  $TiO$  (рис. 9.4.), кристаллизующаяся в пространственной группе  $Fm\bar{3}m$  с параметром  $a=4,293 \text{ \AA}$  (см. табл. 9.2).

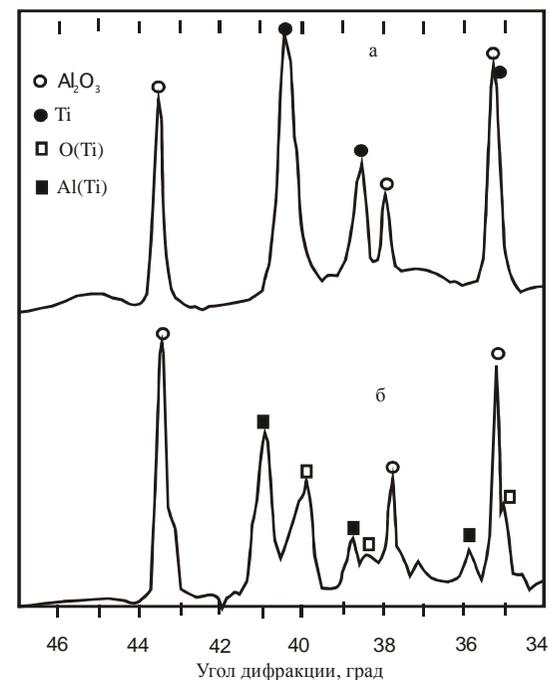


Рис. 9.3. Рентгенограммы смесей  $Ti+Al_2O_3$  до спекания (а) и после спекания в течение часа (б) при  $1200^\circ C$ .

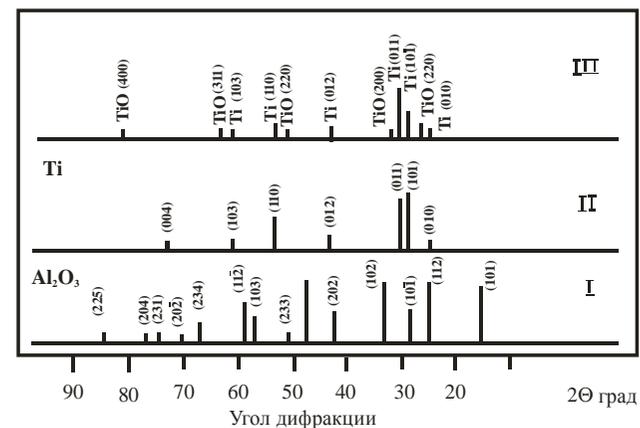


Рис. 9.4. Штрихдиаграммы:

1 – керамическая подложка (99.3%  $Al_2O_3$ ); 11 – поверхность образца после напыления  $Ti$ ; 111 – отжиг при  $1000^\circ C$  в течение 5 час. в вакууме.

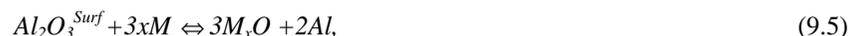
Таблица 9.2

Результаты рентгенофазового анализа  $TiO$ , полученного при отжиге титанового покрытия в вакууме,  $T=1000^\circ C$

$d/n$ табличное JCPDS Å	$I/I_1$	HKL	$d/n$ расчетное Å
2,479	50	111	2,481
2,144	10	200	2,151
1,529	70	220	1,520
1,297	50	311	1,296
1,081	80	400	1,085
0,985	10	331	-
0,960	20	420	0,9679

Таким образом, в процессе взаимодействия титана с керамикой происходят разрушение решетки  $Al_2O_3$  и диффузия кислорода и алюминия в титан. Атомы кислорода, обладающие значительной диффузионной подвижностью, мигрируют от границы раздела фаз в глубь титана, растворяясь в его объеме. Атомы алюминия, обладающие меньшей диффузионной подвижностью, мигрируют в титан на небольшую глубину.

Реакция между поверхностью  $Al_2O_3$  и активным металлом ( $Ti$ ), обеспечивающим смачивание поверхности, происходит в соответствии со следующим уравнением [107, 108]:



где  $M$  представляет активный металл припоя. Хотя  $Al_2O_3$  является термодинамически более стабильным, чем получающиеся оксиды (табл. 9.3), тем не менее реакция имеет место благодаря различию в свободной энергии между поверхностным и объемным состоянием, т.е.:

$$\Delta G_{Al_2O_3}^{surf} > \Delta G_{Al_2O_3}^0, \quad (9.6)$$

где  $\Delta G_{Al_2O_3}^{surf}$  и  $\Delta G_{Al_2O_3}^0$  – свободная энергия поверхностного состояния ( $Al_2O_3$ ) и стандартная свободная энергия ( $Al_2O_3$ ), соответственно. Не исключена возможность образования нестехиометрической формы в соответствии с уравнением:



Таблица 9.3

Изменение свободной энергии Гиббса для реакций между оксидом алюминия и титаном

Реакция	$\Delta G$ (kJ / mol) при $900^\circ C$
$Al_2O_3 + 3Ti \rightarrow 2Al + 3TiO$	+25.6
$Al_2O_3 + 2Ti \rightarrow 2Al + Ti_2O_3$	+26.0
$Al_2O_3 + 9/5Ti \rightarrow 2Al + 3/5Ti_3O_5$	+62.3
$Al_2O_3 + 12/7Ti \rightarrow 2Al + 3/7Ti_4O_7$	+177.0
$Al_2O_3 + 3/2Ti \rightarrow 2Al + 3/2TiO_2$	+224.3

Увеличение промежуточного реакционного слоя улучшает смачиваемость вследствие изменения свободной энергии при образовании новой фазы, что приводит к улучшению адгезии металл– $Al_2O_3$  соединения. С другой стороны, промежуточный слой является обычно хрупким, и слишком толстые слои оказывают отрицательное воздействие на качество соединения [108, 109].

Не менее важное значение для создания прочных металлокерамических соединений имеют анализ и прогнозирование химических реакций в припое. Особую опасность представляют выделения хрупких интерметаллидов, ухудшающих пластичность и создающих условия для разрушения. По мнению авторов [108], титан, реагируя с  $Al_2O_3$ , образует тонкий слой титановых оксидов, таких как  $TiO$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $Ti_3O_5$ ,  $Ti_4O_7$  и  $TiO_2$ , стехиометрия которых зависит от активности титана в припое. Второй слой обычно формируется на поверхности  $Ti$ -оксида как результат реакции между  $Ti$  и  $Si$  в припое.

Продукты такой реакции включают тройной состав  $Si-Ti-O$ . На рис. 9.5 показано распределение фаз с соответствующими химическими уравнениями предложенные Suenaga и Chidabaram [110, 111] для объяснения микроструктуры реакционного слоя. В представленных уравнениях,  $Al_{(Cu)}$ , образуется в результате реакции взаимодействия  $Al_2O_3$  и  $Ti_{(Cu)}$ . Эти металлы представлены в виде твердого раствора в  $Si$ , который является основным компонентом припоя. При температуре пайки,  $Ti$  диффундирует на поверхность  $Al_2O_3$  и вызывает диссоциацию керамики на алюминий и кислород. На начальной стадии алюминий образует твердый раствор в меди, а затем в составе  $Si-Ti-O$ . Кислород

реагирует с титаном в соответствии с уравнением 7.5, образуя первичный титан оксидный слой, который покрывает всю поверхность керамики.

Другим источником кислорода может быть сам припой, который может содержать другие оксиды или растворенный кислород, а также атмосфера пайки, т.к. используемое давление значительно превышает равновесное давление кислорода, предотвращающего окисление титана.

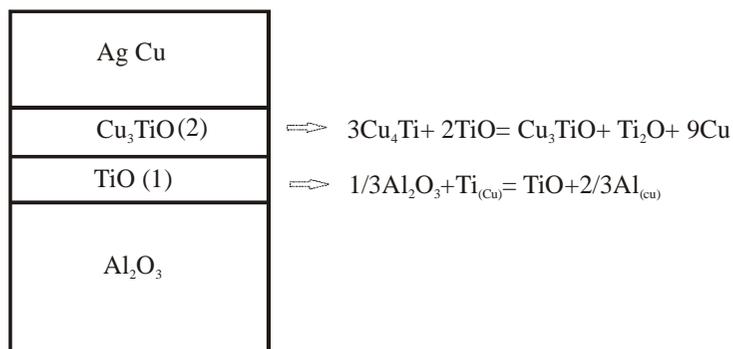


Рис. 9.5. Схема распределения фаз в реакционном слое.

**Упругие напряжения в металлокерамических соединениях.** Существенные различия в химических и физических свойствах металла и керамики делают задачу создания металлокерамических соединений чрезвычайно трудной. Сложно найти эффективный процесс соединения, в результате которого сохранились бы прочность и упругость соединения. Существуют два первичных фактора, которые препятствуют созданию механически надежного соединения. Это плохое сочетание коэффициентов термического расширения (КТР) и различие в природе межатомного взаимодействия. При охлаждении от температуры пайки возникают остаточные напряжения благодаря различию в КТР и различной реакции керамики и металла.

Обычно металлы имеют бóльший коэффициент термического расширения и низкий модуль упругости, чем керамика. Как правило, в металлокерамических соединениях индуцируются большие растягивающие и сдвигающие напряжения в области вокруг границы (кромки) и недалеко от поверхности керамики в результате охлаждения после пайки. Эти напряжения увеличивают

склонность к образованию трещин керамики на выступах, краях и областях, смежных с границей. Аналитические и численные вычисления показывают, что тип нагружения и основная природа напряжений, индуцируемых в керамике, определяют ее величину [112]. На рис. 9.6 показано распределение напряжений в керамике, когда соединение находится под действием растягивающих усилий или при охлаждении от температур пайки. Механические и термические нагрузки действуют в одной и той же области, поэтому, чем ниже остаточные термические напряжения, тем большую нагрузку способно выдержать соединение. Это является причиной того, что для этого типа соединения уровень термических остаточных напряжений может характеризовать механическую прочность спая. Однако такой вывод будет неправильным для случая цилиндрического охватывающего соединения, в котором керамическая трубка зажата металлической оправкой. Как следует из рис. 9.7, бóльшая часть керамики находится в состоянии сжатия после охлаждения от температуры пайки, что будет увеличивать сопротивление разрушению керамики при механической нагрузке.

Evants и др. [113] представили теоретические предпосылки и численные результаты того что 1) наиболее вероятно хрупкое разрушение в керамике, чем вдоль межфазной границы; 2) соединения с большими остаточными термическими напряжениями разрушаются при значительно меньших нагрузках для одинакового типа соединения.

В соответствии с их результатами, большие касательные напряжения, индуцированные в зоне контакта, способствуют развитию трещин вдоль поверхности. При определенной внешней нагрузке сопротивление развитию трещин в керамике уменьшается, тогда как остаточные термические остаются значительными. В сравнении с действием остаточных термических напряжений действие напряжений индуцированных внешней нагрузкой незначительно. Во время механических испытаний релаксация термических остаточных напряжений или трансформация первичных напряжений может происходить благодаря дополнительной пластической деформации металлической части соединения при приложении внешней нагрузки.

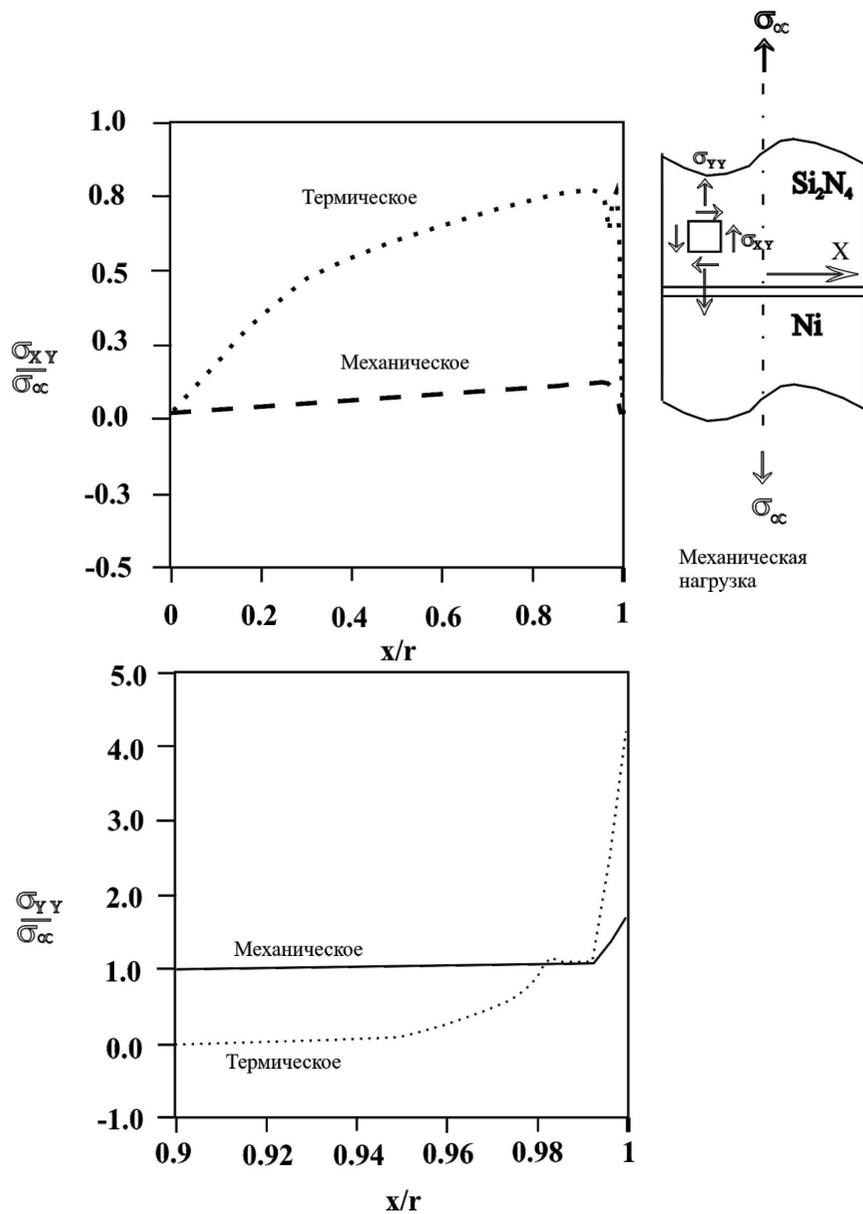


Рис. 9.6. Распределение напряжений в керамике в зоне сая для торцового соединения.

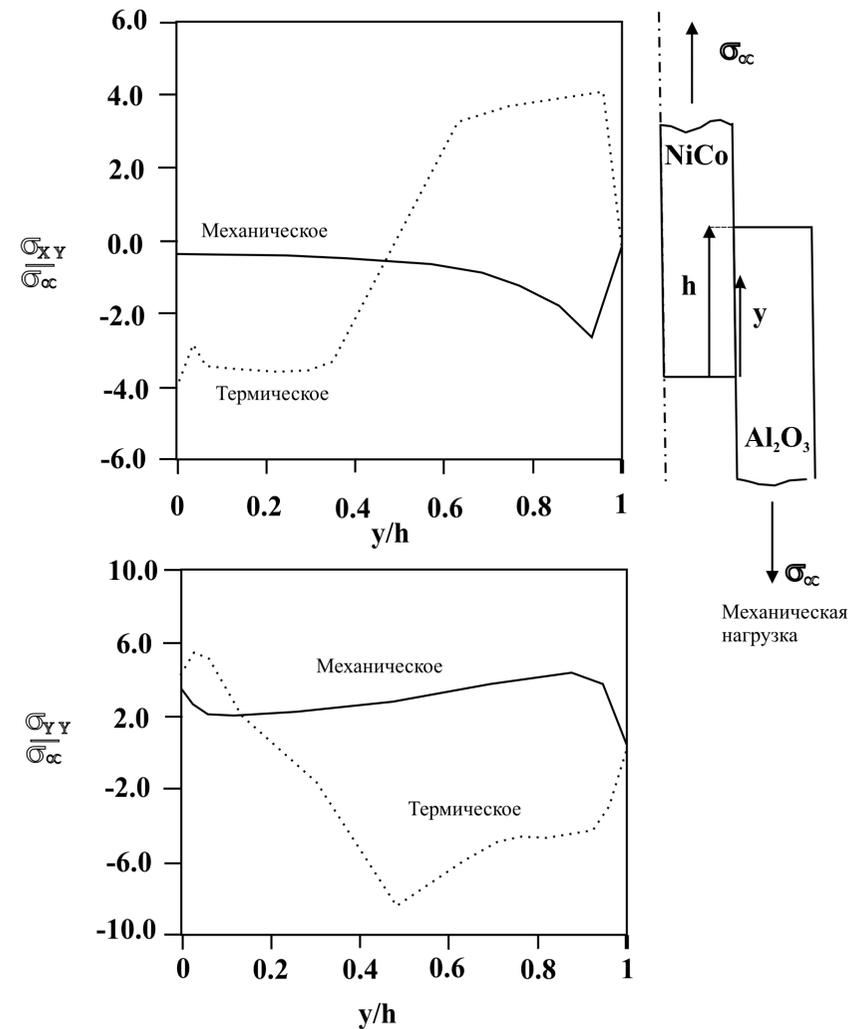


Рис. 9.7. Распределение напряжений в керамике в зоне сая для охватывающего соединения.

Однако трудно представить, чтобы внешняя нагрузка до разрушения была больше чем напряжение пластического течения металла, так как такие большие усилия не могут быть получены в большинстве металлокерамических соединений. Поэтому хрупкое разрушение керамики при незначительных нагрузках обусловлено наличием высоких термических остаточных напряжений в зоне металлокерамического соединения.

Конструкторы предлагают решать эту проблему, используя пластичные металлические слои для снятия остаточных напряжений. Однако одиночные слои имеют недостатки, – например, медный промежуточный слой обеспечивает максимальное уменьшение остаточных напряжений, но его применимость в реальных системах ограничена из-за низкого сопротивления коррозии и окислению при высоких температурах. Для преодоления этих недостатков предлагается использовать многослойные структуры.

В настоящее время не существует глубокого понимания процессов, влияющих на остаточные напряжения в металлокерамических соединениях из-за большого количества факторов, влияющих на данный эффект. Кроме того, некоторые экспериментальные результаты противоречат друг другу, что не удивительно, так как отсутствуют стандарты при испытании и требования к размерам образца. Например, отсутствует ясное понимание наиболее эффективной последовательности в многослойных системах, хотя этот тип соединений уже используется в производстве. Тем не менее теоретический подход к этой проблеме может быть полезным для сравнения с экспериментальными результатами.

Не существует аналитической модели, которая могла бы учитывать пластическую деформацию и действие различной геометрии во время соединения двух разнородных материалов при изменении температуры.

Максимальное остаточное напряжение используется как мера достаточно часто. Однако максимальным значением определенной компоненты остаточных напряжений или только напряжениями нельзя объяснить поведение при разрушении.

Blackwell [112] предложил решить эти проблемы, используя энергию упругой деформации в керамике как меру повреждения. Используя метод конечных элементов, он вычислил энергию деформации для соединений металл-керамика без промежуточного слоя для случая, когда отношение толщина/ширина относительно велико. Основываясь на факте, что энергия деформации в основных материалах контролируется деформацией в области межфазной

границы, он нашел, что функциональная зависимость энергии деформации, индуцированная в керамике, может быть выражена следующим отношением:

$$U_{\text{упр.к}} \propto \frac{E_k E_m^2}{(E_m + E_k)^2} (\alpha_k - \alpha_m)^2 (T - T_n)^2 (r)^3 f(h/r), \quad (9.8)$$

где  $h$  – высота керамического образца;  $r$  – радиус соединения  $f(h/r) \approx \text{erf}(h/r)$ ;  $E_m$ ,  $E_k$  – модули упругости металла и керамики соответственно;  $\alpha_m$ ,  $\alpha_k$  – КТР металла и керамики;  $T$  – комнатная температура;  $T_n$  – температура пайки.

Преимуществами этого подхода являются минимальная зависимость от запутанных формулировок и быстрая сходимость энергии деформации. К сожалению, уравнение (9.8) рассматривает поведение материалов только в упругой области, поэтому не может применяться для описания свойств соединения при высоких температурах и с большой разницей ТКР.

Так как пластическая деформация металлов способствует уменьшению остаточных напряжений, существует острая необходимость получения выражения, подобного (9.7), но учитывающего пластические свойства материала. Авторы работы [112], используя метод конечных элементов, получили выражение для оценки упругой энергии в керамическом образце с учетом пластической деформации металлической составляющей спая. Для упрощения вычислений численный расчет проводился для модели, имеющей форму цилиндра с диаметром 12.7 мм и высотой 12 мм.

Энергия упругой деформации в керамике оценивалась суммированием величины  $\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} (dV)_{el}$  по всем элементам объема керамического образца, где  $dV_{el}$  – объем каждого элемента,  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $\varepsilon_{ij}$  – тензор деформации. Следовательно,

$$U_{\text{упр.к}} = \int \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} (dV)_{el} \quad (9.9)$$

Интегрируя выражение (9.9), получаем

$$U_{\text{упр.к}} \approx \hat{U}_{\text{упр.к}} = \sigma_k \varepsilon_k V_k, \quad (9.10)$$

где  $\sigma_k$  и  $\varepsilon_k$  – величина деформации и напряжения в керамике;  $V_k$  – часть объема, испытывающего воздействие остаточных напряжений. Так как керамика испытывает упругую деформацию,  $\varepsilon_k = \frac{\sigma_k}{E_k}$ .

Численным моделированием установлено, что область, испытывающая воздействие упругих напряжений, имеет размеры, пропорциональные  $r^3$ . Тогда упругую энергию, запасенную в керамике можно выразить как:

$$\hat{U} = \frac{\sigma_k^2 r^3}{E_k} \quad (9.11)$$

Величина остаточного напряжения, создаваемого в керамике, зависит от степени пластичности металла. В предельном случае, когда область металлической компоненты, примыкающая к межфазной границе, испытывает пластическую деформацию, величину напряжения в керамике можно найти, зная напряжение пластического течения металла:  $\sigma_k = \sigma_{лм}$ .

Так как в реальной ситуации металл не находится в пластическом режиме, выражение (9.11) необходимо скорректировать. В этом случае вводится поправочный коэффициент, учитывающий соотношение остаточных напряжений и предел текучести металла

$$П = \frac{(\alpha_M - \alpha_k) \Delta T E_M}{\sigma_{лм}}, \quad (9.12)$$

где  $\sigma_{лм}$  – предел текучести металла при комнатной температуре. На основании выражений (9.11) и (9.12) упругую энергию в керамике можно вычислить как:

$$U_{упр,к} = \frac{\sigma_{лм}^2 r^3}{E_k} f(П) \quad (9.13)$$

Корректирующая функция  $f(П)$  не включает в себя геометрический параметр  $h/r$ , т.к. она рассчитывалась для модели, имеющей относительно большую толщину. Для значений  $П$  более чем 0.5, авторами вышеуказанной работы предлагается аппроксимация  $f(П)$  следующим выражением:

$$f(П) = 0.035П + 0.563 \quad (9.14)$$

Результаты расчета упругой энергии деформации для заданной пары металл-керамика представлены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

**Упругая энергия деформации для различного сочетания пар металл-керамика**

Металл-керамика	$\alpha_M - \alpha_k$ ( $\times 10^{-6}/^\circ C$ )	$E_k - E_M$ ГПа	$\sigma_{лм}$ МПа	$U_{упр,к}$ ( $\times 10^{-3}$ , Дж)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Ti	1.01	238	172	10.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Inconel 600	5.9	152	250	30.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 304SS	9.8	158	255.5	31.6
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - Cu	13.7	176	75.8	4.23
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - Ni	10.3	96	148	15.2
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> - Nb	4.2	201	240	25.9

Как следует из полученных результатов, наиболее важным параметром, определяющим величину энергии упругой деформации в керамике, является предел текучести металлической компоненты  $\sigma_{лм}$ . Напротив, другие параметры, такие как различие в модуле упругости и КТР, оказывают значительно меньшее влияние на величину  $U_{упр,к}$ .

**Соединяемые материалы.** Металлокерамическое соединение включает три основных материала: керамика, метал и припой. Свойства каждой из этих компонент влияют на свойства полученного соединения.

*Керамическая компонента*

В связи с тем, что для керамики свойственна хрупкость, она является наиболее критическим материалом для получения надежного соединения, поэтому основные свойства керамического образца являются очень существенными. Когда свойства не удовлетворительны, термические напряжения разрушают керамическую составляющую соединения. Кроме того, поверхностные свойства керамики являются также очень важными. При обработке керамики алмазным инструментом на поверхности образца возникают различные дефекты, которые в дальнейшем при воздействии термических напряжений приводят к образованию трещин и разрушению спая. Поэтому для получения качественного соединения поверхность керамики должна быть свободна от различного

рода дефектов. Одним из вариантов решения этой проблемы является изготовление керамических деталей необходимой формы без последующей механической обработки. Однако изготовление больших деталей с заданным размером – крайне трудная задача. Избавиться от поверхностных дефектов можно, используя вторичный отжиг или физическое удаление поверхностного слоя с помощью полировки.

#### Металлическая компонента

Металлы, как правило, пластичны и, следовательно, более устойчивы к разрушению в условиях напряженного состояния. Однако существует несколько важных требований для получения надежного соединения. Металлическая компонента не должна способствовать интенсивному растеканию припоя на ее поверхности, т.к. это существенно уменьшает количество активного элемента, необходимого для смачивания керамики. В связи с тем, что движущей силой растекания является изменение свободной энергии системы в результате какого-либо физико-химического процесса (адсорбция, растворение, химическая реакция и т. д.) при выборе пары металл – припой необходимо обращать внимание на их свойства по отношению друг к другу.

Как было сказано выше, в результате пайки материалов с различным коэффициентом термического расширения в области контакта могут возникать высокие остаточные термические напряжения. Одним из способов уменьшения этих напряжений является использование материалов с небольшой разницей в КТР. Например, молибден может быть использован для получения металлокерамического соединения с алюмооксидной керамикой (см. табл. 9.5). Однако существует ограниченное число комбинаций металл-керамика для удовлетворения этих условий.

Другим способом уменьшения термических напряжений является использование металлов, имеющих низкий предел текучести. Благодаря пластической деформации металлической компоненты компенсируется разница в термическом расширении, что способствует уменьшению напряжений в области межфазной границы.

**Коэффициенты термического расширения  
алюмооксидной керамики и металлов**

Материал	Коэффициент термического расширения ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Оксид алюминия (99.5%)	8.0
Молибден	5.7
Ковар	10.0
Сталь 45	15.0
Медь	20.0

Одной из возможностей решения этой проблемы является использование

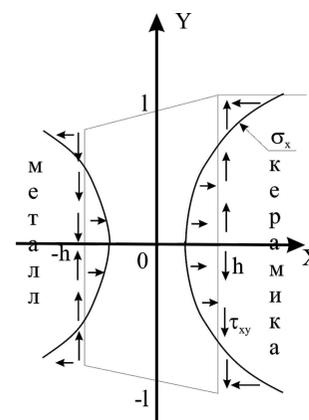


Рис. 9.8. Упрощенная модель буферного слоя, где  $\sigma_x$  и  $\tau_{xy}$  – остаточные напряжения, возникающие после охлаждения от температуры пайки.

промежуточных слоев в виде фольги или покрытий, а также материалов с поверхностным градиентом упругих свойств. В работе [114] представлена простая аналитическая модель для расчета остаточных термических напряжений в прослойке между металлом и керамикой после охлаждения от температуры пайки (рис. 9.8). Решение данной задачи приведено для случая однородного и изотропного материала без учета пластической деформации. Двумерная упругая деформация прослойки представлена в виде линейной суперпозиции деформаций вдоль координатных осей, благодаря чему определение остаточных напряжений сведено к решению задачи на плоскости.

Для рассматриваемого случая получены следующие решения:

$$\sigma_x = \psi \alpha (2 - 3y^2/l^2 - 3z^2/k^2), \quad (9.15)$$

$$\sigma_y = \psi \alpha [3(1 - y^2/l^2) + 2\mu(2 - 3z^2/k^2)], \quad (9.16)$$

$$\sigma_z = \psi \alpha [3(1 - z^2/k^2) + 2\mu(2 - 3y^2/l^2)], \quad (9.17)$$

$$\tau_{xy} = 0.5 \psi \alpha (3 - 4\mu) y [1 - (1 - 2\mu)y^2/(3 - 4\mu)l^2 - 3(1 - 2\mu)x^2/(3 - 4\mu)l^2], \quad (9.18)$$

$$\tau_{xz} = 0.5 \psi \alpha (3 - 4\mu) z [1 - (1 - 2\mu)z^2/(3 - 4\mu)k^2 - 3(1 - 2\mu)x^2/(3 - 4\mu)k^2] \quad (9.19)$$

где  $\psi = m\Delta\alpha TG/2(1-\mu)h$ ;  $\Delta\alpha$  – разница коэффициентов термического расширения металла и керамики;  $T$  – разница между температурой пайки и комнатной температурой;  $G$  – модуль сдвига материала прослойки;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $m$  – корректирующий коэффициент, значение которого выбирается в интервале от 0 до 1;  $h$  – толщина прослойки.

Анализ соотношений (9.15-9.19) показывает, что нормальные напряжения подчиняются параболической зависимости, достигая максимального значения у контактных поверхностей в точках  $(h,0,0)$  и  $(-h,0,0)$ . Максимальное значение касательных напряжений при  $y = \pm l$  и  $z = \pm k$  пропорционально отношению поперечного размера буферного слоя к его толщине. Однако если увеличение толщины прослойки позволяет уменьшить касательные напряжения, то нормальные напряжения практически не изменяются (рис. 9.9). Но это не означает, что для уменьшения напряжений необходимо увеличивать толщину прослойки, т.к. при определенных размерах вклад термического расширения самого слоя становится существенным.

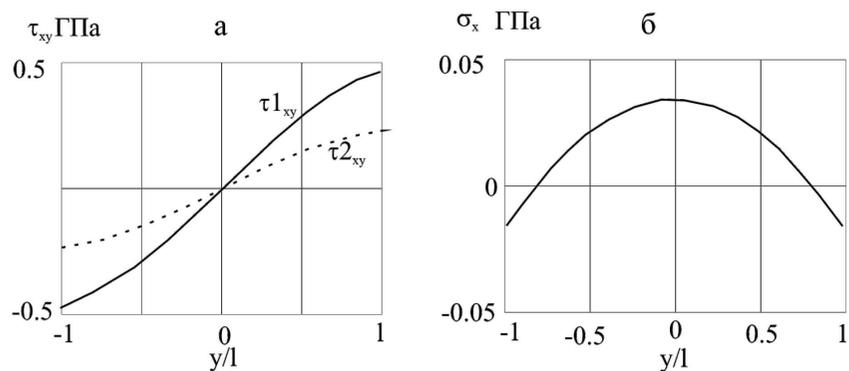


Рис. 9.9. Распределение касательных (а) и нормальных (б) напряжений в прослойке на контактной границе с керамикой:

$G = 50$  ГПа,  $h_1 = 0,25$  мм,  $h_2 = 0,5$  мм,  $l = 10$  мм,  $T = 600^\circ\text{K}$ ,  $\Delta\alpha = 8 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,  $\mu = 0,3$ .

Необходимо отметить, что на величину остаточных напряжений в прослойке оказывает выбор материала с заданным модулем сдвига  $G$ . Чем меньше  $G$ , тем меньше напряжения, возникающие в прослойке. Результаты исследования прочности спая, полученные для прослоек с разным модулем сдвига, представлены на рис. 9.10.

Что касается предъявляемых к металлической компоненте, он должен соответствовать условиям эксплуатации полученного изделия, т.е. иметь определенную температуру плавления, стойкость к окислению, коррозионную стойкость и т.д.

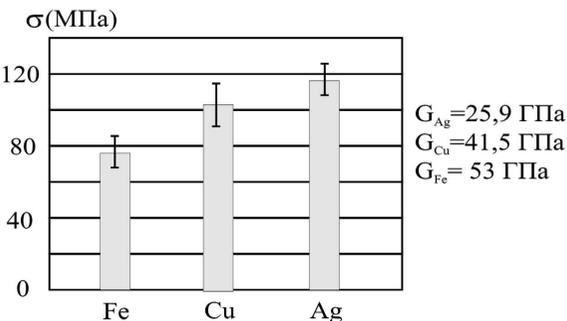


Рис. 9.10. Зависимость прочности соединения на разрыв от материала прослойки.

#### Процесс пайки

Для реализации процесса активной пайки металлокерамических узлов, как правило, используются вакуумные печи с резистивным нагревателем. Не исключена возможность применения индукторов, электроннолучевых пушек, лазеров и т.п. Процесс может происходить в атмосфере  $H_2$ ,  $He$ ,  $Ar$ , или в вакууме. При этом степень вакуума должна быть не более  $5 \times 10^{-3}$  торр. Удивительно, но одна из главных проблем связана с активным припоем, который смачивает почти все материалы. Поэтому при разработке оснастки необходимо избегать соприкосновения расплавленного припоя с элементами конструкции.

Важным параметром, определяющим качество металлокерамического соединения, является также выбор температурного режима пайки. Характерная температурная кривая режима пайки алюмооксидной керамики представлена на рис. 9.11 [115]. Так как металлы имеют более высокую теплопроводность, чем керамика, то металлическая составляющая может нагреваться значительно быстрее. В этом случае происходит преждевременное смачивание металлической компоненты. Особенно это важно в конструкциях, где размер металлического элемента соединения намного меньше керамического. Поэтому скорость нагрева должна обеспечивать минимальную разницу температур между элементами металлокерамического узла (МКУ). Другим параметром, влияющим на надежность МКУ, является скорость охлаждения.

10.1. Требования к кабельному хозяйству современной АЭС

Требования, предъявляемые к пожарной безопасности ядерных установок, практически не отличаются от требований для тепловых электростанций. Но пожар на атомной станции может повлечь за собой гораздо более тяжелые последствия в связи с возможностью радиационного загрязнения не только территории самой станции, но и огромного района, прилегающего к станции. Масштабы экологической катастрофы от такой аварии могут быть соизмеримы с территорией Европы.

Одной из основных причин пожаров на станциях, помимо пожароопасности самого реактора, является наличие огромного числа электрических кабелей, проложенных по всем ее помещениям. Протяженность кабельных трасс каждого блока составляет сотни километров.

Кабели на станции, как правило, проложены в коробах или лотках в специальных помещениях – кабельных коридорах, ограничивающих доступ открытого огня к ним. Но это не гарантирует от распространения огня по территории станции, т.к. основная масса кабелей имеет легковоспламеняющуюся изоляцию. Чаще всего огонь распространяется именно по изоляции кабелей. Пожар в кабельных коридорах на станции часто приводил не только к выгоранию многокилометровых участков кабельного хозяйства, но и к распространению пожара на большой ее территории.

Материальный ущерб по причине возгорания кабелей огромен. Кроме прямых убытков, связанных со стоимостью сгоревших кабелей и разрушенных установок и помещений, огромен косвенный ущерб в виде перерыва в электрообеспечении, недоотпуска электроэнергии потребителям, невыпуска продукции производителями. Плюс возможное радиационное загрязнение.

Можно сослаться на приведенный в первой главе случай, когда в марте 1975 г. на американской АЭС «Браунз – Ферри» в результате пожара, распространившегося по кабельным трассам, вышли из строя два энергоблока из трех.

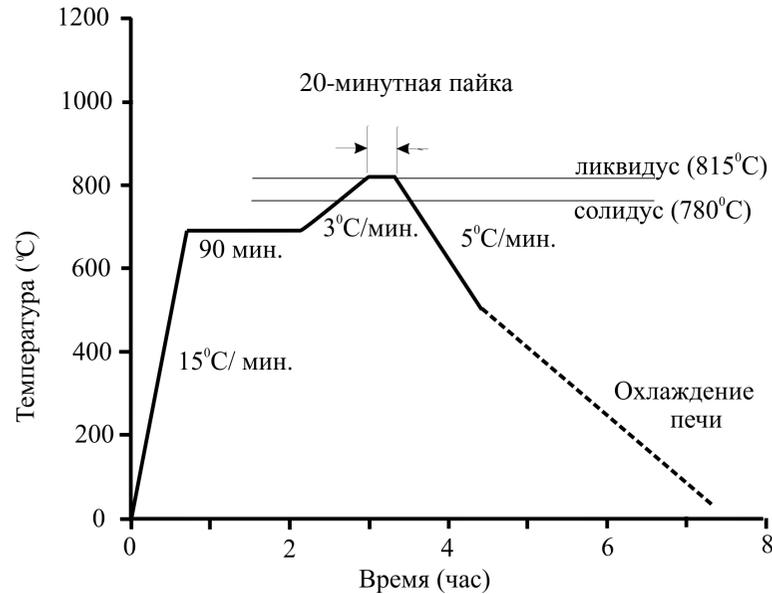


Рис. 9.11. Температурная кривая режима пайки для припоя Cusil-ABA.

Это связано с тем, что для процесса пластической деформации металлической компоненты и уменьшения остаточных термических напряжений требуется определенное время. В обоих случаях низкая скорость температурных изменений оказывает положительное влияние на конечный результат.

Основными мероприятиями по пожарной безопасности в кабельном хозяйстве на атомной станции являются мероприятия по предупреждению пожара и ограничению распространения уже возникшего пожара. Задача противопожарной защиты станции комплексная, включает оба этих мероприятия [116].

Для исключения возникновения возгорания от электрических причин, ведется контроль нагрузки в кабельной трассе. Он состоит в оценке вероятности возникновения загорания и вероятности распространения огня по горючему материалу кабелей и проводов в зависимости от теплоты сгорания кабелей, их положения и расположения, а также с учетом эксплуатационной надежности электрооборудования и средств электрической защиты. Норматив по вероятности возникновения пожара составляет  $1 \cdot 10^{-6}$  событий в год [117]. При расчете вероятности возникновения пожароопасной ситуации на данной кабельной трассе учитываются многие факторы от вероятности возникновения аварийного пожароопасного режима в каждом кабеле и группы горючести материала, до вероятности отказа электрической защиты и вероятности срабатывания автоматической системы пожаротушения.

В процессе эксплуатации (см. Прил. 3) на АЭС кабельные изделия должны оставаться работоспособными как в нормальных условиях, так и в режимах «малой» и «большой» течи с температурами от 50 до 150°C и давлением до 0,56 МПа. При пожаре же температура может достигать 1000°C.

Горение полимерной изоляции кабелей сопровождается выделением большого количества дыма, коррозионно-активного сероводорода ( $H_2S$ ) и других токсичных газов, представляющих серьезную опасность для жизни людей и для оборудования. Поэтому при производстве кабельных трасс на АЭС применяют материалы с пониженным дымо- и газовыделением. Минимальный коэффициент дымообразования кабелей должен быть менее 50 [117]. Показатель токсичности продуктов горения не должен превышать 120 г·м<sup>3</sup> [117]. Эти кабели относят к кабелям с малой дымообразующей способностью, а плотность токсичных газов от их горения считается малоопасной.

Кабельные изделия с пониженными показателями пожаро- взрывоопасности, при объеме полимерных материалов на погонный метр кабельной трассы

более 7 литров [117], должны иметь дополнительную защиту – покрываться огнезащитными материалами.

Поэтому к кабельным изделиям, разрешенным для использования на АЭС, предъявляются повышенные требования по огнестойкости, нераспространению горения, оптической плотности дымообразования, коррозионной активности и токсичности продуктов газовыделения. Все эти требования применяются в совокупности [118]. Могут также применяться кабели со специальными защитными покровами или металлическими оболочками (экранами) совместно с защитными покровами, обеспечивающими нераспространение горения по кабелям.

Специальные огнезащитные покрытия пучков кабелей от воспламенения и распространения пламени обеспечивают защиту кабелей от локального источника огня с температурой около 800°C в течение примерно 30 мин. Покрытие наносят в несколько слоев. При этом допустимые длительные токовые нагрузки на кабели должны быть снижены на 3-7% [117].

Огнестойкие же кабели не требуют дополнительного огнезащитного покрытия, т.к. изготавливаются на основе минеральной изоляции в металлической оболочке. Эти кабели существенно дороже кабелей в полимерной изоляции, поэтому их применение для прокладки кабельных трасс ограничено.

Для повышения пожарной защиты кабельных трасс, проложенных в металлических коробах и железобетонных каналах через каждые 20-30 м [117] устанавливаются огнепреградительные пояса из огнезащитных материалов. Их основное назначение – отсекать горящие участки кабелей от остальной части трассы.

При проходе кабельных трасс через защитные стены и перекрытия сооружений должны устанавливаться специальные огнепреградительные уплотнения. Требования к огнепреградительным уплотнениям значительно выше, чем к огнепреградительным поясам, т.к. они выполняют сразу несколько ответственных функций:

1. Предотвращение развития пожароопасных факторов и локализация пожара в ограниченном отсеке – нераспространение пожара по большой площади позволяет значительно снизить ущерб.

2. Герметизация прохода кабелей через стены и перекрытия.

В процессе монтажа кабельных линий выполняется временное уплотнение кабельных проходов через защитные стены, перегородки и перекрытия. Оно многократно нарушается и восстанавливается по ходу работ, т.к. опасность возникновения пожара в процессе монтажа выше, чем при нормальной эксплуатации станции. По окончании прокладки кабелей временное уплотнение заменяют постоянным.

Временные уплотнения проходов выполняют из негорючих и огнестойких материалов. Их минимальный предел огнестойкости должен составлять 0,75 час. [52]. Как правило, временные уплотнения блочные, в виде уложенных в штабель противопожарных подушек. Отечественные материалы, используемые для их производства – базальтовое супертонкое волокно, пеноасбест ЛПА-21, вермикулит, пенопласт марки ФК-75, полистоп, полипласт (производство ВНР), обеспечивают минимальный предел огнестойкости временных уплотнений. Подушки представляют собой пакеты из стеклоткани размерами 300×200×40 мм, в которые помещены базальтовое супертонкое волокно или вермикулит. Пеноасбест выпускается плитами с теми же размерами. Кабели и подушки должны укладываться послойно.

Герметичность прохода обеспечивается за счет плотной упаковки кабелей и подушек и обмазки этой конструкции с торцов огнезащитными материалами. В состав огнезащитных материалов входит жидкое стекло. Расплав после затвердевания играет роль герметика.

Такая конструкция заделки прохода выдерживает пожар в течение 90 мин. и до появления сквозных трещин обеспечивает хорошую защиту от дымо-, газопроницаемости [119]. Однако их нельзя использовать как постоянные, т.к. при длительной эксплуатации в защитном слое могут возникать сквозные трещины, приводящие к разгерметизации прохода.

В настоящее время такой способ прокладки кабелей сохраняется только при прокладке временных кабелей через временные проходы. На определенной стадии монтажа кабели демонтируют, а проходы капитально заделывают.

При прокладке постоянных кабелей силовых, сварочных, управления, контроля, связи и т.д. кабели подводятся к стене или перекрытию с обеих сторон и подсоединяются к стационарной проходке, установленной в стене или перекрытии. Такой принцип прокладки кабелей имеет множество преимуществ перед прокладкой цельных кабелей.

Первое и главное с точки зрения пожарной безопасности объекта – появилась возможность в разных помещениях станции прокладывать кабели различной конструкции и с разной степенью стойкости к пожару и радиационному воздействию. В помещениях с высокой пожароопасностью и радиацией, например, в реакторном отделении или в «грязной» зоне прокладывают кабели специальные, бронированные, а в помещениях «чистых» – кабели обычной конструкции. Участки кабелей, находящиеся внутри проходки, также могут быть специальными.

Это позволяет:

1. Уменьшить капитальные затраты в кабельном обеспечении станции за счет сокращения объема дорогостоящего спецкабеля.
2. Устанавливать проходки, на сто процентов изготовленные в заводских условиях.
3. Обеспечить качественный монтаж проходки.
4. Продлить срок годности изделия. В случае проходок серии ВГКК срок годности всех ее компонентов составляет 40 лет.

Проходка при отдельной прокладке кабелей должна быть герметичной. Ее монтаж в стене также должен быть герметичен. Применение в конструкции стен и перекрытий закладных труб и металлической облицовки значительно упростило уплотнение и герметизацию проходок в стене или перекрытии. В настоящее время крепление корпуса проходки к закладной трубе выполняется привариванием по контуру сплошным швом.

Для защиты концов кабелей и клемм, спаек и т.д. от пожара торцы гермопроходок закрывают огнезащитными экранами – кожухами, которые выполняют и многие другие защитные функции, в том числе защиту от поражения током, защиту от механических повреждений. Гермопроходка поставляется на станцию в полной заводской готовности.

## 10.2. Гермовводы серии ВГКК, как противопожарные барьеры

В настоящее время на АЭС с реакторами ВВЭР установлены проходки ПГКК (рис. 4.1). Они выполнены на основе кабелей в полимерной изоляции. Жгуты кабелей, выступающие из корпуса, зажаты в стопорных устройствах и дополнительно герметизированы компаундами. При такой конструкции гермопроходки горение изоляции кабелей по одну сторону стены беспрепятственно распространится по компаунду и полимерной изоляции жгутов на другую ее сторону.

Гермоввод же, выполненный с соблюдением всех норм и правил, должен не гореть сам и являться барьером на пути распространения огня в другие помещения станции [120]. Это подразумевает, что в конструкции гермоввода не должно быть горючих и легковоспламеняющихся материалов.

Данному требованию в полной мере отвечает гермоввод серии ВГКК (рис. 4.11). Гермовводы серии ВГКК изготавливаются только из негорючих материалов – металлов и керамики. Все соединения в гермовводе выполнены герметично путем сварки или пайки.

В основу конструкции гермоввода положены кабели в металлической оболочке с магнезиальной изоляцией типа КМЖ и КТМС. Эти кабели пропущены через герметичный корпус проходки и приварены или припаяны на его торцах плотно-прочными швами. Способ герметизации зависит от металла оболочки кабеля. На концы каждого кабеля герметично припаяны металлокерамические изоляторы. Пайка металла с керамикой в изоляторах и изоляторов к оболочке и жиле кабеля выполнена высокотемпературными припоями с температурой плавления 720-760°C.

Защитный кожух выполнен с дополнительной термоизоляцией для защиты мест подсоединения кабелей. Термоизоляцию выполняют из каолина путем засыпки мелкодисперсного порошка между двумя стенками кожуха. Толщина слоя каолина на боковых стенках кожуха составляет 17 мм, на торцевой – 30 мм.

Испытания гермоввода на специализированном стенде показали, что торцевая стенка кожуха эффективно защищает гермоввод от открытого огня с температурой до 1000°C. При испытании в режиме стандартного пожара на жиле со стороны пожара, под кожухом, максимальная температура достигала 390°C, на оболочке – 280°C, на корпусе гермоввода – 365°C [121]. При длине корпуса проходки 1040 мм и толщине имитатора железобетонной стены 800 мм максимальная температура на «холодной» стороне составила: на жиле и оболочке – 15°C, на корпусе гермоввода – 26°C [121]. Во время испытания со стороны пожара ни один из паяных швов не разгерметизировался, тем более не потерял герметичности противоположный конец гермоввода. Во время пожара гермоввод находился под напряжением. Температуры, до которых произошел нагрев жилы на «горячем» конце, даже не потребовали снижения электрических параметров.

Все это говорит о том, что гермовводы серии ВГКК не горят, обеспечивают нераспространение пожара в другие помещения и при этом выполняют свое основное назначение – передают электрические сигналы на уровне, соответствующем техническим требованиям. С учетом радиационной стойкости материалов, герметичной сборки пайкой и сваркой, при соответствии конструкции всем остальным требованиям ТУ7434-4740909-001-92Э [55], обеспечивающим непрерывную и безопасную работу в течение всего срока службы (40 лет), можно заключить, что гермоввод серии ВГКК обеспечивает выполнение всех требований нормативных документов Росэнергоатома, Госатомэнергонадзора, Госпожнадзора и стандартов МЭК.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин, Л.М. Особенности проектирования и сооружения АЭС. – М.: Атомиздат, 1980. – 192 с.
2. А.с. 758934 (СССР). Устройство для ввода электрических проводников в загрязненную зону / Костюков Н.С., Минаков Н.В., Князев В.А.
3. Технические условия ТУ16-528.195-81.
4. Конобеевский, С.Д. Действие облучения на материалы. – М.: Атомиздат, 1967. – 401 с.
5. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций. Справочник / под ред. Н.А. Сидорова, В.К. Князева. – М.: Советское радио, 1976. – 568 с.
6. Скоров, Д.М., Бычков, Ю.Ф., Дашковский, А.И. Реакторное материаловедение / под ред. Д.М. Скорова. – М.: Атомиздат, 1979. – 344 с.
7. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение. Сб. трудов НИИАР. – М.: Атомиздат, 1970. – 264 с.
8. Зеленский, В.Ф., Неклюдов, И.М., Черняева, Т.П. Радиационные дефекты и распухание металлов. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 296 с.
9. Керамика и ее спаи с металлом в технике / Коллектив авторов. – М.: Атомиздат, 1969. – 232 с.
10. Костюков, Н.С., Антонова, Н.П., Асеев, Н.А., Зильберман, М.И. Радиационное электро материаловедение. – М.: Атомиздат, 1979. – 220 с.
11. Костюков, Н.С., Минаков, Н.В., Антонова, Н.П. и др. Герметичные изоляторы для атомной энергетики. – Благовещенск: ДВО АН СССР, 1990. – 228 с.
12. Леб, Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. – М.: ГИТТЛ, 1950.
13. Вольф, Е.М. //ЖТФ. – 1966. – Т. 36. – Вып. 3.
14. Костюков, Н.С., Антонова, Н.П., Харитонов, Ф.Я. Всемирный электрический конгресс. – М.: Секция ЗА, доклад 29, 1977. – 20 с.
15. Адамчевский, И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. – М.: 1972. – 296 с.
16. Воробьев, А.С., Костюков, Н.С., Граф, И.С., Атраш, С.М. Современное состояние исследований в области радиационной стойкости электроизоляционных материалов и систем электрической изоляции. – М.: Информэлектро, 1987. – 66 с.

17. Костюков, Н.С., Маслов, В.В., Муминов, М.И. Радиационная стойкость диэлектриков. – Ташкент: Фан, 1981. – 216 с.
18. Ванников, А.В., Матвеев, В.К., Сичкарь, В.П., Тютнев, А.П. Радиационные эффекты в полимерах. Электрические свойства. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
19. Тютнев, А.П., Ванников, А.В., Мингалеев, Г.С., Саенко, В.С. Электрические явления при облучении полимеров. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.
20. Сандаков, В.С., Костюков, Н.С., Дубинин, Г.В. Влияние облучения на радиационную термостойкость керамики. – Димитровград: НИИАР. – Препр. 8(620), 1984. – 28 с.
21. Очилов, А.Б. Электрическая прочность электрокерамических материалов в процессе стационарного гамма-облучения: Автореферат дис. ...канд. техн. наук. – Ташкент, 1981. – 20 с.
22. Лансков, В.М. Действие смешанного гамма-нейтронного облучения атомного реактора на электрическую прочность керамических материалов: Автореферат дис. ...канд. техн. наук. – Ташкент, 1988. – 27 с.
23. Костюков, Н.С., Атраш, С.М., Ворбьев, А.С. Электрическая изоляция в полях радиации. Препр. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1987.
24. Костюков, Н.С., Муминов, М.И., Лансков, В.М. Влияние гамма-нейтронной радиации на электрическую прочность микролита // Атомная энергия. – 1984. – Т. 56. – Вып. 5. – С. 300-302.
25. Костюков, Н.С., Лансков, В.М., Муминов, М.И. Электрическая прочность керамики ГБ-7, облучаемой  $n$ - $\gamma$ -потоками реактора ВВР-СМ // Электрон. Техника. Сер. 6. Материалы. – 1984. – Вып. 1(186). – С. 52-54.
26. Kita, J. Dielectric relaxation in distributed dielectric layers // J. Appl. Phys. – 1984. – Vol. 55 (10) May. – P. 3747-3755.
27. Каталог ВДНХ. Электроника СССР. Электрокерамические изделия. Силовые модульные вводы ВСМ-6/15-800 и ВСМ-0.4/3-500 для энергетических установок. – М.: Информэлектро, 1986. – С. 1-2.
28. Kostjukov, N.S., Minakov, N.V., Knyazev, V.A. Traversee electrique pour enveloppe protectrice separant une zone polluee d'une installation electrique on de production d'energie. Патент Франции № 2414781 от 19.09.1979.
29. Kostjukov, N.S., Minakov, N.V., Knyazev, V.A. Anordning for genomforing av elektriska ledare. Патент Швеции № 7810637-4 от 1986-07-31

30. Костюков, Н.С., Минаков, Н.В., Князев, В.А. Патент Японии № 1143306.

31. Kostjukov, N.S., Minakov, N.V., Knyazev, V.A. Sinrichtung zur sin-führung elektrischer zeiter von elektrotechnischen und Energicanlagen durch eine schutz hiille die eine reine und eine verunreinigte zone voneinander trennt. Патент ФРГ, DE2843707C2, 4.8.83.

32. Kostjukov, N.S., Minakov, N.V., Knyasev, V.A. Dispositivo per il passagio dei conduttori di installazichi elettriche e centrali generatrici di energia attraverso un involucro protettivo separante una zona pulita da una contaminuta. Патент Италии № 1162002 от 18 марта 1987.

33. Kostjukov, N.S., Minakov, N.V., Knyazev, V.A. Einrichtung zur Einfiihrung cloktrischer Leiter durch eine schutzhule. Патент ГДР № 140822 от 26.03.80.

34. Kostjukov, Nikolai S., Minakov, Nikolai V., Knyasev, Vladimir A. Devece for passing electrical and power installation conductors through protective shell separating clean zone from contaminated one and method of assembling same. Патент США № 4,237,336 от 2 декабря 1980 г.

35. Костюков, Н.С., Минаков, Н.В., Карманский, П.Я. Устройство для ввода электрических проводников. А.С. № 1105065 от 10 декабря 1980 г.

36. Костюков, Н.С., Минаков, Н.В., Карманский, П.Я. Устройство для ввода электрических проводников. Патент Чехословакии № 23ш7989 от 13 гijна 1986 г.

37. Костюков, Н.С., Минаков, Н.В., Желанкина, З.В., Дунашев, А.П., Сидоренко, В.Н. Герметичный ввод. А.С. № 1230278 от 12.05.82.

38. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков. Область сильных полей. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. – 908 с.

39. Бенинг, П. Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций / пер. с нем; под ред. А.А. Воробьева. – М.: Энергия, 1960.

40. Мантров, М.И. Расчет пробивного напряжения высоковольтного ввода конденсаторного типа // Электротехника. – 1969. – № 10.

41. Валеев, Х.С., Есиков, Ю.Г. О разрядном напряжении изоляторов при высокой относительной влажности // Электричество. – 1963. – № 4.

42. Фельдман, М.Л., Черновец, А.К. Особенности электрической части атомных электростанций. – Л.: Энергия, 1972. – 168 с.

43. Будников, П.П., Харитонов, Ф.Я. Керамические материалы для агрессивных сред. – М.: Стройиздат, 1971. – 272 с.

44. Костюков, Н.С., Астапова, Е.С., Пивченко, Е.Б., Ванина, Е.А.. Механическая и электрическая прочность и изменение структуры при облучении. Диэлектрики и радиация: В 4 кн. / под общ. ред. Н.С. Костюкова. Кн. 3. – М.: Наука, 2003. – 256 с.

45. Костюков, Н.С., Лукичев, А.А., Муминов, М.И., Атраш, С.М., Скрипников, Ю.С.  $\varepsilon$  и  $tg\delta$  при облучении. Диэлектрики и радиация: В 4 кн. / под общ. ред. Н.С. Костюкова. Кн. 2. – М.: Наука, 2002. – 326 с.

46. ГОСТ 8024-69. Аппараты переменного тока высокого напряжения. Нормы нагрева при длительной работе и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1969.

47. Безопасность ядерной энергетики / под ред. Дж. Раста, Л. Уивера; пер. с англ. О.М. Ковалевича, А.Н. Исаева, Л.М. Векслера. – М.: Атомиздат, 1980.

48. ГОСТ 12.1.004-76 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1976.

49. Шельман, А.М., Плютинский, В.И. Контроль и управление на атомных электростанциях. – М.: Энергия, 1979.

50. СТ СЭВ 1000-78. Противопожарные нормы строительного проектирования. Метод испытания строительных конструкций на огнестойкость. – М.: Изд-во стандартов, 1979.

51. Костюков, Н.С., Минаков, Н.В., Антонова, Н.П. и др. Герметичные изоляторы для атомной энергетики. – Благовещенск: ДВО АН СССР, 1990. – 283 с.

52. Костюков, Н.С., Еранская, Т.Ю., Охотникова, Г.Г., Головки, Т.А. Герметичные кабельные вводы нового поколения для АЭС. – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 258 с. с ил.

53. ТУ 16-93 ИМЖК 689.351.008 Вводы герметичные серии ВГКо. Технические условия.

54. Костюков, Н.С., Холодный, С.Д. и др. Герметичные вводы контрольных кабелей для АЭС. Препринт ИТЦ АмурНТЦ ДВО АН СССР. – Благовещенск: ДВО АН СССР, 1990. – 68 с.

55. Технические условия. Вводы герметичные контрольных кабелей типа ВГКК для АЭС. ТУ 7434-4740909-001-92Э.

56. Алексеев, А.П., Гуреев, В.А. Монтаж жаростойких кабелей. Библиотека электромонтера. Вып. 424. – М.: Энергия, 1975. – 88 с.

57. Гроднев, И.И., Фролов, П.А. Коаксиальные кабели связи. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
58. Сучков, В.Ф., Светлова, В.И., Финкель, Э.Э. Жаростойкие кабели с минеральной изоляцией. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
59. Технические условия. Кабели термостойкие. ТУ-16-505.870-75. – М., 1987. – С. 64.
60. Белоусов, Н.И., Саакян, А.Е., Яковлева, А.И. Электрические провода и шнуры: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 231 с.
61. Холодный С.Д., Костюков Н.С., Еранская Т.Ю. Тепловой расчет гермовводов для атомных электростанций с железобетонной герметичной оболочкой // Электричество. – 2000. – № 11.
62. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов; под ред. В.А. Привезенцева. – М., 1975.
63. Холодный, С.Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов. – М., 1991.
64. Холодный, С.Д., Костюков, Н.С., Еранская, Т.Ю. Расчет гермовводов для атомных электростанций со стальной герметичной оболочкой // Электричество. – 2003. – № 3. – С. 57-60.
65. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – Изд. 2-е. – М., 1976. – Т. 2.
66. Лыков, А.В. Теплообмен: Справочник. – М., 1978.
67. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1971.
68. Гроднев, И.И., Фролов, П.А. Коаксиальные кабели связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
69. Костюков, Н.С. и др. Радиационное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1979. – 224 с.
70. Бравинский, В.Г. и др. Влияние внешней среды на механическую прочность керамики // Вопр. радиоэлектроники. – Сер. 1. 1961. № 6. – С. 76 – 82.
71. Костюков, Н.С., Харитонов, Ф.Я., Антонова, Н.П. Радиационная и коррозионная стойкость керамических материалов. – М.: Атомиздат, 1973. – 223 с.
72. Выдрик, Г.А., Костюков, Н.С. Физико-химические основы производства и эксплуатации электрокерамики. – М.: Энергия, 1971. – 328 с.

73. Бравинский, В.Г. и др. Радиационная стойкость керамики и ее спаев с металлами, используемых в приборах СВЧ // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1974. – № 7.
74. Батыгин, В.Н. и др. Вакуумплотная керамика и ее спаи с металлами / под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Энергия, 1973. – 409 с.
75. Создание радиационностойких вакуумплотных изоляторов для систем управления атомным реактором: Отчет ВНИИЭЖ. № ТР 760 665 95. – М., 1978. – 24 с.
76. Костюков, Н.С. и др. Радиационная стойкость диэлектриков / отв. ред. П.К. Хабибуллаев. – Ташкент: Фан, 1981. – 244 с.
77. Клименков, В.И., Кирсанов, В.В. Влияние энергетического спектра нейтронного потока на распределение по размерам скоплений дефектов // Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1970.
78. Герметичные изоляторы для атомной энергетики / Н.С. Костюков, Н.В. Минаков, Н.П. Антонова и др.; под ред. Н.С. Костюкова. – Благовещенск: ДВО АН СССР, 1990. – 288 с.
79. Керамика и ее спаи с металлом в технике / под ред. В.А. Преснова, И.А. Иофиса. – М.: Атомиздат, 1969. – 231 с.
80. Белинская, Г.В. и др. Металлизация и пайка оксидной керамики. Препринт. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. – 70 с.
81. Костюков, Н.С. и др. Объемные изменения керамических материалов при облучении // Электрон. техника. Сер. 6. Материалы. – 1981. – Вып. 1. – С. 54 – 58.
82. Уваров, В.И. и др. Радиационная стойкость проходных металлокерамических изоляторов // Электротехн. промышленность. Сер. Электротехн. материалы. – 1979. – Вып. 5. – С. 7.
83. Козловский, Л.В. Исследования в области интенсификации процессов получения металлокерамических соединений: Автореферат дис. ...д-ра техн. наук. – Л.: ЛТИ, 1974.
84. Костюков, Н.С., Антонова, Н.П. (СССР), Берк, Дж., Терхьюн, Дж. (США). Электрокерамические материалы для атомной энергетики. Совместный доклад специалистов СССР и США на Всемирном электротехническом конгрессе (ВЭЛК). – М., 1997. – 20 с. (Доклад ВЭЛК. Секция 3А; № 77).
85. Ерошев, В.К. Металлокерамические вакуумплотные конструкции. – М.: Энергия, 1970. – 160 с.

86. Кингери У.Д. Введение в керамику / пер. с англ. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. – 499 с.

87. Костюков, Н.С., Антонова, Н.П. Компенсационный принцип повышения радиационной стойкости керамических материалов. Препринт. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. – 55 с.

88. Аитов, А., Костюков, Н.С., Муминов, М.И., Нурматов, Х., Скрипников, О.Ю. Способ изготовления металлокерамических узлов. Авторское свидетельство № 1708800 от 20.09.1989.

89. Гнеушева, В.И. и др. Исследование влияния интенсивного реакторного излучения на герметичность паяных металлокерамических узлов // Электрон. техника. Сер. Материалы. – 1980. – Вып. 10. – С. 109 – 111.

90. Гнеушева, В.И. и др. Результаты исследования герметичности металлокерамических спаев в изделиях под облучением // Электрон. техника. Сер. Материалы. – 1979. – Вып. 9. – С. 82 – 89.

91. Костюков, Н.С., Маслов, В.В., Муминов, М.И. Радиационная стойкость диэлектриков. – Ташкент: ФАН, 1981. – 216 с.

92. Костюков, Н.С., Харитонов, Ф.Я., Антонова, Н.П. Радиационная и коррозионная стойкость электрокерамики. – М.: Атомиздат, 1973.

93. Стринадко, Е.Н., Калинин, Б.Б., Костюков, Н.С. Исследование герметичности кабелей с минеральной изоляцией // Тезисы конф. Физика. Фундаментальные и прикладные исследования. – Владивосток: ДВО РАН, 2003. – С. 90.

94. Физическая энциклопедия. Т. I. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – 704 с.

95. Герцфельд, К.Ф. Кинетическая теория материи. – М.; Л.: ОНТИ СССР, 1935. – 499 с.

96. Беляева, Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 131 с.

97. ГОСТ Р 52287-2004. Вводы электрические в структуре оболочки ядерных энергетических установок. – М., 2005.

98. Костюков, Н.С., Демчук, В.А., Охотников, В.А., Муминов, М.И., Нурматов, Х.Б. Надежность и срок службы гермовводов серии ВГКК для АЭС // Атомная энергия. – 2008. – Т 104, № 3. – С. 161-164.

99. Костюков, Н.С., Демчук, В.А., Охотников, В.А. Адекватность нормативных документов реальным условиям эксплуатации герметичных вводов для АЭС // Атомная энергия. – 2008. – Т 104, № 5. – С. 311-312.

100. Сумм, Б.Д., Горюнов, Ю.В.. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

101. Kang, Shinho, Dunn, Edmund M., Selverian, Jonh H., Kim, Han J. Issues in Ceramic-to- Metal Joining: An Investigation of Brazing a Silicon Nitride-Based Ceramic to a Low-Expansion Superalloy // Am. Ceram. Soc. Bulletin. –1989, September. – P. 1608-1617.

102. Метелкин, И.И., Павлова, М.А., Поздеева, Н.В. Сварка керамики с металлами. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.

103. Батыгин, В.Н., Метелкин, И.И., Решетников, А.М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. – М.: Энергия, 1973. – 408 с.

104. Жмудь, Е.С., Шмелев, А.Е.. Рентгенофазовое исследование взаимодействие титана с окисью алюминия // Неорганические материалы – 1973. – Т. 11, № 10. – С. 1733-1737.

105. Жмудь, Е.С., Шмелев, А.Е. Исследование механизмов активной пайки металла с керамикой с помощью рентгеноструктурного анализа // Электронная техника. – 1966. – Сер. 1, № 10. – С. 128-142.

106. Жмудь, Е.С., Шмелев, А.Е. Исследование спаев титана с керамикой // Электронная техника. – 1970. – Сер. 1, № 8. – С. 102-112.

107. Chidambaram, P.R., Edwards, G.R., Olson, D.L. // Metall. Trans. B 23 B (1992) – P. 215.

108. Do Nascimento, R.M., Nartinelli, A.E., DE A. Buschinelli, A.J., Klein, A.N. Brazing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to sintered Fe-Ni-Co alloys // Journal of materials science 34 (1999). – P. 5839-5845

109. Hanson, W.B., Ironside, K.I., Fernie, J.A. Active metal brazing of zirconia // Acta mater.48 (2000) – P. 46-73.

110. Chidumbarum, P.R., Edwards, G.R., Olson, D.L. // Metal. Mater. Trans. A. 25A (1994). – P. 2083.

111. Suenaga, Nakahashi, M., Maruyama, M., Fukasawa, T. // J. Amer. Ceram. Soc. 80 (1997). – P. 439.

112. Park, J.-W., Mendez, P.F., Eagar, T.W. Strain energy distribution in ceramic-to metal joints // Acta mater. 50 (2002) – P. 883-899.

113. Hsueh, C.H., Evants, A.G. // J. Amer. Ceram. Soc. 68 (1985). – P. 241.

114. Xian, Ai-Ping, Si, Zhong-Yao. Residual stress in a soft-buffer-inserted metal/ceramic joint // J. Amer. Ceram. Soc. 73 (1990). – P. 3462-3465.

115. Mizuhara, Hovard, Huebel, E., Oyama, T. High-reliability joining of ceramic to metal // Am. Ceram. Soc. Bulletin. – P 1591-1599, september 1989.

116. Микеев, А.К. Противопожарная защита АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.

117. Требования к пожарной безопасности кабелей, применяемых на АЭС/ А.К. Микеев, И.Ф. Поединцев, В.Ф. Бойцов, В.В. Смирнов. – М.: ВНИИ-ПО МВД СССР, 1980. – 28 с.

118. Кабели и провода для ядерных энергетических установок. – М.: Энергоиздат, 1983. – 133 с.

119. Снижение пожарной опасности кабельных трасс: Обзор. информ. / Г.И. Смелков, В.Ф. Бойцов, И.Ф. Поединцев, В.В. Смирнов. – М.: ГИЦ МВД СССР, 1990. – 50 с.

120. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость кабельных проходок и герметичных кабельных вводов. НПБ237-97 от 31.07.1997 г.

121. Протокол испытаний на огнестойкость герметичного кабельного ввода. Утвержден зам. начальника ВНИИПО МВД СССР А.Я. Корольченко 28 апреля 1988 г.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Номенклатура и основные параметры гермовводов серии ВГКК

Обозначение гермоввода <sup>4)</sup>	Установка в стене герметичного помещения АЭС толщиной, мм	Номер <sup>2)</sup> электрической схемы	Количество тоководов (шт.) и магистрал				Сечение токовода, мм <sup>2</sup>		номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А <sup>1)</sup>
			основных		дополнительных		основных	дополнительных		
			основных	дополнительных	основных	дополнительных				
1	3	4	5	6	7	8	9	10		
ВГКК-194-1-44-4,0-800-04	800	1	44		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)		
ВГКК-194-1-44-4,0-1500-04	1500	1	44		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)		
ВГКК-194-1-144-4,0-800-04	800	2, 4	144		4,0		380,220 перем 220 пост	14 (30)		
ВГКК-194-1-144-4,0-800-04	1500	2, 4	144		4,0		380,220 перем 220 пост	14 (30)		
ВГКК-194-1-133-2,5-800-04	800	3	133		2,5		380,220 перем 220 пост	14 (30)		
ВГКК-194-1-133-2,5-1500-04	1500	3	133		2,5		380,220 перем 220 пост	14 (30)		
ВГКК-194-2-146-1,5-800-04	800	6	146		1,5		60 перем. пост.			
ВГКК-194-2-146-1,5-1500-04	1500	6	146		1,5		60 перем. пост.			

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВГКК-194-3-100ХА-0,9-2-4,0-800-04	МСПТ IC	80-0	7	100ХА	2	0,9	0,4	60 перем. пост.	
ВГКК-194-3-100ХА-0,9-2-4,0-1500-04		1500	7	100ХА	2	0,9	0,4	60 перем. пост.	
ВГКК-194-3-100ХК-0,9-2-4,0-800-04		800	7	100ХК	2	0,9	0,4	60 перем. пост.	
ВГКК-194-3-100ХК-0,9-2-4,0-1500-04		1500	7	100ХК	2	0,9	0,4	60 перем. пост.	
ВГКК-194-4-19-2,5-800-04	МСПТ COAX	800	8	19		2,5		60 перем. пост.	
ВГКК-194-4-19-2,5-1500-04		1500	8	19		2,5		60 перем. пост.	
ВГКК-194-5-122-1,5-800-04	МСПТ IC	800	5	122		1,5		220 перем. пост.	
ВГКК-194-5-122-1,5-1500-04		1500	5	122		1,5		220 перем. пост.	
ВГКК-168-1-36-4,0-600-04	МСПТ LVC	600	1	36		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)
ВГКК-168-1-36-4,0-800-04		800	1	36		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)
ВГКК-168-1-36-4,0-1000-04		1000	1	36		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВГКК-168-1-98-4,0-1200-04	МСПТ LVC	1200	2,4	98		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)
ВГКК-168-1-98-4,0-1400-04		1400	2,4	98		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)
ВГКК-168-1-98-4,0-1500-04		1500	2,4	98		4,0		380,220 перем 220 пост	17 (35)
ВГКК-168-2-54-1,5-600-04	МСПТ IC	600	6	54		1,5		60 перем. пост	
ВГКК-168-2-54-1,5-800-04		800	6	54		1,5		60 перем. пост	
ВГКК-168-2-54-1,5-1000-04		1000	6	54		1,5		60 перем. пост	
ВГКК-168-2-54-1,5-1200-04		1200	6	54		1,5		60 перем. пост	
ВГКК-168-2-54-1,5-1400-04		1400	6	54		1,5		60 перем. пост	
ВГКК-168-2-54-1,5-1500-04		1500	6	54		1,5		60 перем. пост	
ВГКК-168-3-100ХА-0,9-2-4,0-600-04	МСПТ IC	600	7	100ХА	2	0,9	0,4	60 перем. пост.	
ВГКК-168-3-100ХА-0,9-2-4,0-800-04		800	7	100ХА	2	0,9	0,4	60 перем. пост.	



Схемы подключения кабелей к гермовводам

Номер эл. схемы	Количество токовводов, шт.		Схемы соединения токовводов
	ВГКК-194	ВГКК-168	
1	44	36	
2	144	98	
3	133	-	
4	144	98	
5	122	54	
6	146	54	
7	100XA(XK)+2		
8	19		

Режимы эксплуатации гермовводов на АЭС

Параметры	Режим нормальной эксплуатации	Режим нарушения теплоотвода из гермозоны	Режим малой течи	Режим максимальной течи
1. Температура, °С	15-60	До 75	До 90	До 150
2. Давление (разрежение), МПа (ати)	0,085-0,103 (0,85-1,03)	0,05-0,12 (0,5-1,2)	0,17 (1,7)	До 0,5
3. Влажность, %	90 при T=60 °С	100	Паровоздушная смесь	Паровоздушная смесь
4. Удельная активность, Ки/л (БК/л)	До 2·10 <sup>-6</sup> (7,4·10 <sup>4</sup> )	До 2·10 <sup>-6</sup> (7,4·10 <sup>4</sup> )	До 1,5·10 <sup>-4</sup> (5,56·10 <sup>6</sup> )	До 2,5 (9,25·10 <sup>10</sup> )
5. Мощность поглощенной дозы, рад/час (Гр/час)	До 100 (1)	До 100 (1)	До 100 (1)	До 10 <sup>5</sup> (10 <sup>3</sup> )
6. Время существования режима, час.	-	До 15	До 5	До 10
7. Частота возникновения режима	-	1 раз в год	1 раз в два года	1 раз за срок службы
8. Послеаварийная температура, °С	-	-	До 60	-
9. Послеаварийное давление, МПа	-	-	0,05-0,12	0,05-0,12
10. Время существования послеаварийных режимов, сутки	-	-	30	30

Примечания:

1. Интегральная доза радиации с учетом всех аварий 5·10<sup>8</sup> рад.
2. Испытательное давление оболочки реактора 0,56 МПа.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 6. Работа гермовводов с кабелями КМЖ при высокой частоте [54, 68, 122] .....	3
6.1. Методика экспериментальных измерений и теоретических расчетов электрических параметров кабелей марок КМЖ-1 и КМЖ-7×2,5 .....	3
6.2. Системы заземления экранов и помехозащищенность кабельных сетей .....	6
6.3. Расчет электромагнитных параметров кабельной цепи при высокой частоте с применением кабелей КМЖ .....	8
Глава 7. Герметизирующие электроизоляционные металлокерамические узлы в полях реакторного излучения .....	15
7.1. Условия эксплуатации узлов в энергетических реакторах АЭС .....	15
7.2. Физико-технические свойства конструкционных материалов узлов в исходном и облученном состоянии .....	18
7.3. Технологические факторы и их взаимосвязь с определяющими параметрами радиационной стойкости металлокерамических узлов .....	22
7.4. Влияние эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов на основные параметры узлов при облучении .....	24
7.5. Технология изготовления паяных металлокерамических соединений .....	26
7.6. Внутрореакторные испытания основных типов соединений металл-керамика .....	29
7.7. Условия и результаты облучения исследуемых соединений в реакторах .....	34
7.8. Анализ результатов реакторного облучения соединений металл-керамика .....	34
7.9. Конструкции герметизирующих электроизоляционных узлов (ГЭУ) для СУЗ реакторов .....	41
7.10. Исследование свойств узлов в процессе реакторного облучения .....	43
Глава 8. Квалификация изделий .....	53
8.1. Качество и надежность изделий .....	53
8.2. Объем квалификационных испытаний .....	55
8.3. Методы испытаний .....	57
8.4. Сопоставление с международными нормативными документами .....	81
Глава 9. Физико-технологические основы создания металлокерамических соединений с повышенной прочностью .....	86
Глава 10. Пожарозащитные свойства гермовводов серии ВГКК .....	108
10.1. Требования к кабельному хозяйству современной АЭС .....	108
10.2. Гермовводы серии ВГКК как противопожарные барьеры .....	113
<i>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</i> .....	115
Приложение 1 .....	124
Приложение 2 .....	129
Приложение 3 .....	130

**Николай Сергеевич Костюков,**

*главный научный сотрудник НОЦ АмГУ, д-р техн. наук, профессор;*

**Станислав Дмитриевич Холодный,**

*д-р техн. наук, профессор, работал в МЭИ*

**Татьяна Юрьевна Еранская,**

*старший научный сотрудник лаборатории наукоемких технологий и переработки минерального сырья ИГиП ДВО РАН, канд. техн. наук;*

**Виктор Александрович Демчук,**

*зав. лабораторией керамического материаловедения ИГиП ДВО РАН, канд. физ.-мат. наук;*

**Владимир Александрович Охотников,**

*старший преподаватель кафедры ВиТ ДВВСКУ, канд. техн. наук;*

**Сергей Петрович Вашук,**

*научный сотрудник лаборатории космического материаловедения НОЦ АмГУ*

**Радиационно стойкие керамические изоляторы. Монография. Часть II.**

Изд-во АмГУ. Подписано к печати 07.05.14. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 7,67.

Тираж 500. Заказ 506.

Отпечатано в типографии АмГУ.