

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА И МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ проводов и кабелей в гермопроходках атомных станций



Особенность герметичной проходки для АЭС со стальной защитной оболочкой состоит в том, что длина ее корпуса в виде стальной трубы приблизительно равна 0,2 м.

Схема конструкции гермопроходки приведена на рисунке. В стальной защитной стене 1 с помощью фланца закреплена стальная труба ввода 2, в торцевых частях трубы установлены фланцы 3 (сталь). Через трубу и фланцы пропущены модули 6 с изолированными медными проводниками 5. На фланцах 3 закреплены защитные кожухи 4 (нержавеющая сталь). В узлах прохода модулей через фланцы установлены герметичные уплотнения. В гермопроходках ЗАО «Элокс-Пром» в каждом модуле число изолированных проводников – от 1 до 40, сечение

проводников для силовых и контрольных кабелей – от 0,81 до 254 мм². Токи в длительном режиме составляют от 2,5 до 640 А.

Во вводах с применением кабелей КМЖ с магнетальной изоляцией в оболочке в виде медной трубки каждый кабель расположен отдельно и каждая оболочка отдельно припаяна к фланцам.

Движение теплоты вдоль трубы ввода приводит к тому, что температура короткой трубы мало отличается от температуры защитной оболочки. Расчеты показали, что разность температур между торцами трубы и защитной оболочкой не превышает 2–3 °С, поэтому при расчете температуры проводников принимаем, что температура трубы T_T не зависит от координаты x на рисунке.

При работе АЭС температуру окружающей среды снаружи гермозоны («чистая» зона) принимаем $T_{02} = 30$ °С, внутри гермозоны («грязная» зона) она может достигать $T_{01} = 60$ °С в нормальном режиме, 90 °С в режиме «малой течи» и 150 °С в режиме «большой течи».

Для расчета температуры проводников рассмотрим три области вдоль проводника и запишем для них три уравнения для движения теплоты вдоль медных проводников:

$$\lambda SR_{TC} \frac{d^2 T_1}{dx^2} - (T_1 - T_T) + p_1 R_{TC} = 0, \text{ при } -x_1 < x < x_1, \quad (1)$$

$$\lambda SR_{T1} \frac{d^2 T_2}{dx^2} - (T_2 - T_{01}) + p_1 R_{T1} = 0, \text{ при } x > x_1, \quad (2)$$

$$\lambda SR_{T1} \frac{d^2 T_3}{dx^2} - (T_3 - T_{02}) + p_1 R_{T1} = 0, \text{ при } x < -x_1, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность меди; S – площадь сечения проводника; p_1 – мощность потерь энергии одно-

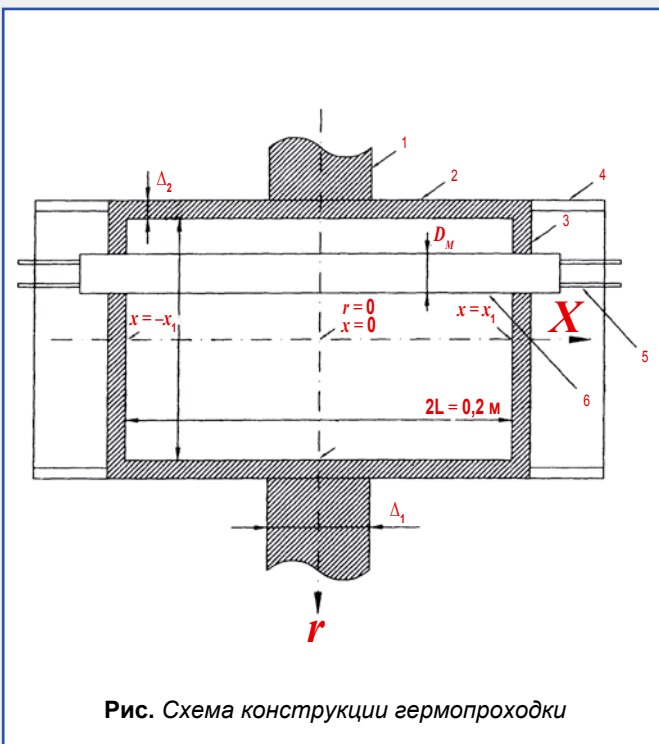


Рис. Схема конструкции гермопроходки

го проводника; R_{TC} – суммарное тепловое сопротивление внутри трубы ввода; R_{T1} – тепловое сопротивление одного изолированного проводника в воздухе вне гермопроходки; T_1, T_2, T_3 – температура проводников соответственно внутри трубы, в «грязной» зоне, в «чистой» зоне.

Значение R_T рассчитаем по формуле:

$$R_T = \frac{1}{2\pi\lambda_u} \ln \frac{r_n + \Delta_u}{r_n} + \frac{1}{2\pi(r_n + \Delta_u)\alpha_n}, \quad (4)$$

где λ_u – теплопроводность изоляции; Δ_u – толщина изоляции; r_n – радиус проводника; α_n – коэффициент теплопередачи от изолированного проводника к воздуху.

Суммарное тепловое сопротивление:

$$R_{TC} = R_{TM} + R_{TMT,1} N_M, \quad (5)$$

где R_{TM} – тепловое сопротивление для потока теплоты от центральных проводников к поверхности модуля; $R_{TMT,1}$ – тепловое сопротивление от поверхности модуля к трубе корпуса ввода; N_M – число проводников в модуле.

В кабельной технике известна формула:

$$R_{TMT,1} = \frac{0,85}{2\pi\lambda_g} \ln \left(4,15 \frac{\Delta_g}{r_M} + 1 \right), \quad (6)$$

где λ_g – теплопроводность воздуха; r_M – радиус модуля; Δ_g – толщина промежутка между поверхностью модуля и внутренней поверхностью трубы.

При расчете учитывалось увеличение λ_g вследствие влияния конвекции и теплового излучения [4]. По приблизительной оценке $R_{TMT,1} \cong 2,2 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$.

Расчет R_{TM} проводим с учетом теплового сопротивления между соседними повивами изолированных проводников для правильной скрутки. По приблизительной оценке значение R_{TM} для трех, двух и одного повива равно соответственно 20–24, 8–9 и 1,2–1,3 $^\circ\text{C}\cdot\text{м/Вт}$.

Наибольший вклад в R_{TC} дает слагаемое $R_{TMT,1} N_M$, значение R_{TC} находится в пределах от 20 до 124, соответственно R_{T1} будет от 3 до 8.

Решения уравнений (1), (2), (3) в общем виде:

$$T_1 = T_T + p_1 R_{TC} + a_1 e^{-k_1 x} + b_1 e^{k_1 x}, \quad (7)$$

$$T_2 = T_{01} + p_1 R_{T1} + a_2 e^{-k_2 x}, \quad (8)$$

$$T_3 = T_{02} + p_1 R_{T1} + a_3 e^{k_2 x}, \quad (9)$$

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{\lambda S R_{TC}}}, \quad k_2 = \frac{1}{\sqrt{\lambda S R_{T1}}}.$$

Значение произвольных коэффициентов a_1, b_1, a_2, a_3 определили по граничным условиям:

при $x = x_1, T_1 = T_2, \frac{dT_1}{dx} = \frac{dT_2}{dx}$, при $x = -x_1, T_1 = T_3,$

$$\frac{dT_1}{dx} = \frac{dT_3}{dx}.$$

При анализе расчета a_1 и b_1 учтено, что k_2 в несколько раз больше k_1 , для $x = x_1$ получена приближенная формула:

$$T_1 \cong T_T + \frac{k_2}{k_1 + k_2} (T_{01} - T_T) + p_1 \left[R_{TC} - \frac{k_2}{k_1 + k_2} (R_{TC} - R_{T1}) \right]. \quad (10)$$

В табл. 1 приведены расчетные максимальные значения температуры трубы и проводников при номинальных токах, рекомендованных изготовителем гермопроходок ЗАО «Элокс–Пром». В строках 1 и 2 они рассчитаны по формуле (7), а в строках 3 и 4 – по приближенным формулам:

$$T_T = (T_{01} + T_{02})/2 + \Delta T_T, \quad (11)$$

$$T_1 = T_T + \Delta_{T1}. \quad (12)$$

Таблица 1

Температура трубы и проводников

Параметр	Температура окружающей среды в гермозоне $T_{01}, \text{ }^\circ\text{C}$		
	60	90	150
Температура трубы, $^\circ\text{C}$	48	64	97
Температура проводника, $^\circ\text{C}$	63	84	137
Температура трубы по (11), $^\circ\text{C}$	48	64	97
Температура проводника по (12), $^\circ\text{C}$	63	84	137

Таблица 2

Некоторые параметры для расчетов по модульным вводам ЗАО «Элокс-Пром»

Параметры	Тип модуля										
	5A18	5A16	5A14	5A12	5A10	5A8	5A6	5A4	5A2	5A1	5M-250
Число проводников в модуле	40	37	30	20	19	12	9	6	3	3	1
Номинальный ток, А	2,5	3,4	7	8	14	24	35	42	89	110	198
R_{TC} , °С·м/Вт	124	88	86	53	49,4	34	21	14,5	7	6,7	2,7
R_{T1} , °С·м/Вт	7,6	7	6,3	4,9	4,4	4	3,6	3	2,64	2,43	1,7
k_1 , 1/м	12,9	12,1	9,6	9,75	8	7,7	7,7	7,4	8,4	7,4	7
k_2 , 1/м	52,1	43	35,6	32,2	26,6	22,4	18,6	16,3	11,4	12,4	8,8
p_1 , Вт/м	0,19	0,22	0,53	0,55	0,9	1,73	2,21	2,06	5,7	5,6	5,3
Сечение жилы, мм ²	0,81	1,3	2,1	3,3	5,3	8,3	13,5	21	53	45	127

Таблица 3

Некоторые параметры для расчетов вводов ВГКК с применением кабелей КМЖ

Параметры	Тип ввода		
	194-1-44-4,0	194-1-144-4,0	194-1-133-2,5
Число кабелей во вводе	44	144	133
Сечение жилы, мм ²	4	4	2,5
Номинальный ток, А	17	14	14
p_1 , Вт/м	1,76	1,194	1,92
R_{T1} , °С·м/Вт	5,2	5,2	6,35
R_{TC} , °С·м/Вт	25,5	57,5	56,5
k_1 , 1/м	3,74	2,49	3,1
k_2 , 1/м	8,3	8,3	9,24

Значения ΔT_T и ΔT_1 при $T_{02} = 30$ °С приведены ниже:

T_{01} , °С	60	90	150
ΔT_T , °С	3	4	7
ΔT_1 , °С	15	20	40

Если приравнять T_1 в уравнении (10) к максимально допустимой температуре изоляции T_M , то определим p_1 :

$$p_1 = \frac{T_M - T_T \frac{k_2}{k_2 + k_1} (T_{01} - T_T)}{R_{TC} - \frac{k_2}{k_2 + k_1} (R_{TC} - R_{T1})} \quad (13)$$

и далее определим ток нагрузки

$$I = \sqrt{p_1 / R_{жс}} \quad (14)$$

где $R_{жс}$ – электрическое сопротивление проводника на единицу длины, Ом/м.

Параметры, необходимые для расчетов, приведены в табл. 2 и 3.

Таким образом, в результате теоретического анализа тепловых процессов в гермопроходках для АЭС со стальной защитной стеной получены полные теоретические и приближенные формулы для инженерных расчетов температуры трубы корпуса гермопроходок, максимальной температуры проводников и максимально допустимого тока нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА



1. Костюков Н.С., Холодный С.Д., Еранская Т.Ю., Демчук В.А., Соколов С.М. Герметичные кабельные вводы для АЭС / Под ред. Н.С. Костюкова. М.: Наука, 2004. 236 с.

2. Костюков Н.С., Холодный С.Д., Еранская Т.Ю. Тепловой расчет гермовводов для атомных электростанций с железобетонной герметичной оболочкой // Электричество. 2000. № 11.

3. Костюков Н.С., Холодный С.Д., Еранская Т.Ю. Расчет гермовводов для атомных электростанций со стальной герметичной оболочкой // Электричество. 2003. № 9.

4. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1971.