

УДК 621.039.534.2

В.П. Кравченко, д-р техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-т

ТЕМПЕРАТУРНАЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫХОДНОГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ТИПА ПГВ-1000

В.П. Кравченко. Температурна нерівномірність на поверхні вихідного колектора теплоносія парогенераторів типу ПГВ-1000. Наведено методика та результати розрахунку температури теплоносія на виході теплообмінних трубок в залежності від висоти та місця на колі вихідного колектора теплоносія.

В.П. Кравченко. Температурная неравномерность на поверхности выходного коллектора теплоносителя парогенераторов типа ПГВ-1000. Приведены методика и результаты расчета температуры теплоносителя на выходе теплообменных трубок в зависимости от высоты и места на окружности выходного коллектора теплоносителя.

V.P. Kravchenko. Temperature non-uniformity on a coolant target collector surface of the steam generators of ПГВ-1000 type. The technique and results of calculation of coolant temperature on the tubes output depending on height and place on the circle of a coolant target collector are presented.

В конце 80-х годов прошлого века на АЭС с ВВЭР-1000 имело место “парогенераторное бедствие”: более 30 парогенераторов (ПГ) было заменено из-за возникновения сквозной трещины в перфорированной зоне выходного или “холодного” коллектора теплоносителя [1]. В результате анализа были определены причины этой аварии. После реализации целого ряда мероприятий аварии прекратились, однако вклад каждой причины на критическую нагрузку, приводящую к повреждению, определен не был. Более того, возникают новые повреждения, и парогенератор остается элементом первого контура АЭС, из-за которого имеет место основная часть недовыработки электроэнергии. Поэтому продолжают проводиться работы, направленные на повышение надежности парогенератора.

В перечне причин указанной аварии была неравномерность температуры стенки на поверхности коллектора [2]. Поэтому целесообразным является определение изменения температуры стенки по высоте выходного коллектора и длине его окружности, что позволит в дальнейшем определить соответствующие дополнительные напряжения.

Температурная неравномерность на поверхности выходного коллектора имеет место из-за конструктивных особенностей трубной доски и разной длины теплообменных труб. В коротких теплообменных трубках, входящих во внутреннюю полуокружность “холодного” коллектора, теплоноситель охладится меньше, чем в длинных (рис. 1). Следовательно, температуру стенки на внутренней полуокружности “холодного” коллектора будет выше, чем внешней. При рассмотрении трубной доски (зоны перфорации) коллектора отмечается переменное количество трубок в горизонтальных рядах (таблицы 1 и 2). При движении теплоносителя вверх по коллектору скорость воды в трубках горизонтальных рядов будет падать, а значит, будет изменяться температура теплоносителя на выходе из трубки и соответственно температура стенки “холодного” коллектора.

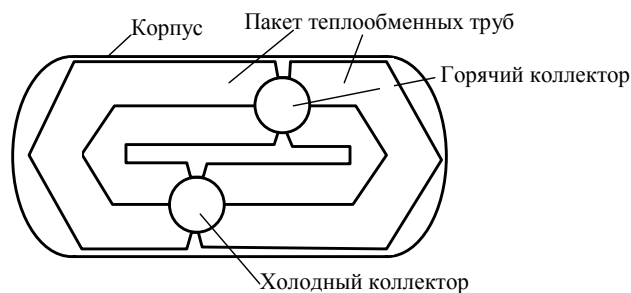


Рис. 1. Схематичный горизонтальный разрез парогенератора

Таблица 1

Длина труб в вертикальных рядах*

№ ряда	Длина трубы, м	№ ряда	Длина трубы, м	№ ряда	Длина трубы, м	№ ряда	Длина трубы, м	№ ряда	Длина трубы, м	№ ряда	Длина трубы, м
1	9,861	21	9,791	41	10,147	61	11,037	81	12,001	101	13,273
2	9,843	22	9,803	42	10,171	62	11,073	82	12,057	102	13,345
3	9,827	23	9,811	43	10,199	63	11,115	83	12,113	103	13,421
4	9,813	24	9,825	44	10,227	64	11,155	84	12,173	104	13,497
5	9,799	25	9,835	45	10,253	65	11,197	85	12,229	105	13,573
6	9,789	26	9,851	46	10,283	66	11,239	86	12,289	106	13,649
7	9,779	27	9,863	47	10,309	67	11,285	87	12,347	107	13,729
8	9,771	28	9,879	48	10,341	68	11,333	88	12,411	108	13,809
9	9,765	29	9,893	49	10,369	69	11,379	89	12,471	109	13,891
10	9,761	30	9,913	50	10,401	70	11,429	90	12,535	110	13,975
11	9,755	31	9,927	51	10,433	71	11,477	91	12,595	111	14,059
12	9,755	32	9,949	52	10,463	72	11,529	92	12,661	112	14,147
13	9,755	33	9,965	53	10,497	73	11,577	93	12,723	113	14,231
14	9,755	34	9,987	54	10,529	74	11,631	94	12,789	114	14,323
15	9,757	35	10,005	55	10,569	75	11,679	95	12,853	115	14,409
16	9,759	36	10,027	56	10,605	76	11,733	96	12,923	116	14,505
17	9,765	37	10,051	57	10,645	77	11,785	97	12,989	117	14,597
18	9,769	38	10,071	58	10,683	78	11,837	98	13,061	118	14,697
19	9,777	39	10,097	59	10,727	79	11,891	99	13,129	119	14,793
20	9,785	40	10,119	60	10,769	80	11,945	100	13,201		

* Нумерация вертикальных рядов в полуокружности коллектора начинается от внутренней образующей к внешней, находящейся около корпуса ПГ.

Методика определения температуры стенки коллектора в зависимости от координаты по высоте и окружности заключается в определении температуры теплоносителя на выходе из теплообменной трубки в результате решения системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{вых}} &= f(h_{\text{вых}}, P_{\text{вых}}), & h_{\text{вых}} &= h_{\text{вх}} - Q/G_{\text{тн}}, \\
 Q &= kF\Delta t, & \Delta t &= (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}) / \ln[(t_{\text{вх}} - t_s) / (t_{\text{вых}} - t_s)], \\
 F &= \pi d l_{\text{тр}}, & k &= (1/\alpha_{\text{тн}} + \delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}} + 1/\alpha_{\text{кип}})^{-1}, \\
 G_{\text{тн}} &= F w_{\text{тн}} / v_{\text{тн}}, & \alpha_{\text{тн}} &= 0,021 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $t_{\text{вых}}, t_{\text{вх}}, h_{\text{вых}}, h_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$ — температура, энтальпия, давление теплоносителя на выходе и входе теплообменной трубки, соответственно;

$Q, G_{\text{тн}}$ — количество теплоты, передаваемое через трубку и расход теплоносителя через трубку, соответственно;

$k, F, \Delta t$ — коэффициент теплопередачи от теплоносителя к кипящей воде; площадь живого сечения трубки, среднелогарифмический температурный напор при теплопередаче от теплоносителя к кипящей воде;

$d, l_{\text{тр}}$ — внутренний диаметр и длина трубки;

$\alpha_{\text{тн}}, \delta_{\text{ст}}, \lambda_{\text{ст}}, \alpha_{\text{кип}}$ — коэффициент теплоотдачи от теплоносителя стенке; толщина стенки трубки; коэффициент теплопроводности материала трубки; коэффициент теплоотдачи к кипящей воде;

$w_{\text{вх}}, v_{\text{вх}}$ — скорость и удельный объем теплоносителя на входе в теплообменные трубки;

λ, Re, Pr — коэффициент теплопроводности теплоносителя при средней температуре, числа Рейнольдса и Прандтля.

Таблица 2

Количество труб в горизонтальных рядах*

№ ряда	Колич. труб, шт.	№ ряда	Колич. труб, шт.	№ ряда	Колич. труб, шт.
1	16	23	76	42, 43	104
2	26	24, 25	84	44, 45	106
3	32	26, 27	86	46, 47	108
4	40	28, 29	90	48, 49	110
5	44	30, 31	92	50, 51	112
6	50	32, 33	94	52, 53	114
7	54	34, 35	96	54, 55, 57	116
8	58	36, 37	98	56, 58, 59, 61, 63, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87, 89, 91, 93, 95, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 109	118
9	60	38, 39	100	60, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 84, 86, 88, 90, 92, 94, 96, 98, 100, 102, 104, 106, 108, 110	119
10-22	60	40, 41	102		

* Нумерация рядов снизу вверх

При расчете изменения температуры теплоносителя на выходе из трубки по высоте коллектора в качестве длины принимается средняя длина трубки и средняя скорость теплоносителя в горизонтальном ряду. При расчете изменения температуры на выходе трубок в горизонтальном ряду берется длина трубки соответствующего вертикального ряда и скорость в этой трубке.

Система уравнений (1) решается итеративно в соответствии со следующим алгоритмом. Принимается температура теплоносителя на выходе трубки $t_{\text{вых}}$. Определяются температурный напор, затем – количество теплоты Q_1 , переданное через стенку, и количество теплоты по тепловому балансу Q_2 . Перебор значений $t_{\text{вых}}$ заканчивается при выполнении условия $|(Q_1 - Q_2)/Q_1| < 0,01$.

Расчетная схема методики определения средних скоростей в трубках горизонтальных рядов (т.е. по высоте коллектора) представлена на рис. 2. При заданной скорости теплоносителя в трубке 1 скорость в трубке 2 определяется решением уравнения

$$\Delta p_1 = \Delta p_{\text{уч.гор.кол.1}} + \Delta p_2 + \Delta p_{\text{уч.хол.кол.1}}, \quad (2)$$

где Δp_1 — гидравлическое сопротивление при течении теплоносителя по трубке 1;

$\Delta p_{\text{уч.гор.кол.1}}$ — гидравлическое сопротивление при течении теплоносителя по горячему коллектору от трубки 1 до трубки 2;

Δp_2 — гидравлическое сопротивление при течении теплоносителя по трубке 2;

$\Delta p_{\text{уч.хол.кол.1}}$ — гидравлическое сопротивление при течении по холодному коллектору от трубки 2 до трубки 1.

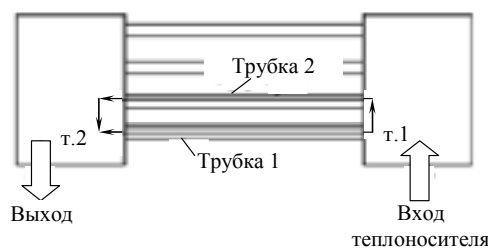


Рис. 2. Расчетная схема определения скорости в трубках

В свою очередь, трубки 1 гидравлическое сопротивление определялись как:

$$\Delta p_1 = \xi_{\text{вх}} \frac{w_{1,\text{вх}}^2}{2v_{\text{вх}}} + \lambda_{\text{тр}}^{\text{трубки1}} \frac{l_{\text{тр,1}} w_{1,\text{ср}}^2}{d_{\text{вн}} 2v_{\text{ср}}} + \xi_{\text{вых}} \frac{w_{1,\text{вых}}^2}{2v_{\text{вых}}}, \quad (3)$$

1-го участка входного коллектора

$$\Delta p_{\text{уч.гор.кол.1}} = \lambda_{\text{тр}}^{\text{уч.гор.кол.1}} \frac{l_{\text{уч.гор.кол.1}} w_{\text{уч.гор.кол.1}}^2}{d_{\text{вн}} 2v_{\text{вх}}}, \quad (4)$$

трубки 2

$$\Delta p_2 = \xi_{\text{вх}} \frac{w_{2,\text{вх}}^2}{2v_{\text{вх}}} + \lambda_{\text{тр}}^{\text{трубки2}} \frac{l_{\text{тр,2}} w_{2,\text{ср}}^2}{d_{\text{вн}} 2v_{\text{ср}}} + \xi_{\text{вых}} \frac{w_{2,\text{вых}}^2}{2v_{\text{вых}}}, \quad (5)$$

участка выходного коллектора

$$\Delta p_{\text{уч.хол.кол.1}} = \lambda_{\text{тр}}^{\text{уч.хол.кол.1}} \frac{l_{\text{уч.хол.кол.1}} w_{\text{уч.хол.кол.1}}^2}{d_{\text{вн}} 2v_{\text{вых}}}. \quad (6)$$

В (3)...(6) $\xi_{\text{вх}}$, $\xi_{\text{вых}}$ — коэффициенты местного сопротивления входа и выхода из трубки, $\xi_{\text{вх}}=0,5$; $\xi_{\text{вых}}=1$; $\lambda_{\text{тр}}$ — коэффициент трения, $\lambda_{\text{тр}} = [1,74 + 2\lg(d/\Delta)]^{-2}$, $\Delta=0,00005$ м — шероховатость трубки; $l_{\text{уч.гор.кол.}} = l_{\text{уч.хол.кол.}} = 0,019$ м — высота участка коллектора, т.е. вертикальный шаг расположения труб.

Подставив (3)...(6), $w_{\text{ср},i} = w_{\text{вх},i} v_{\text{ср},i} / v_{\text{вх},i}$, $w_{\text{вых},i} = w_{\text{вх},i} v_{\text{вых},i} / v_{\text{вх},i}$ в (2) и приняв скорость теплоносителя в трубке 1, определяется скорость в трубке 2. Зная скорость в трубке 2, можно найти скорость в трубке 3 и т.д. до последнего ряда. Правильность принятого значения скорости в трубке 1 определяется по выполнению условия равенства суммарного расхода теплоносителя в трубках последнего ряда расходу в последнем участке входного коллектора. При невыполнении этого условия расчет повторяется с новым значением скорости в трубке 1.

Графическая зависимость изменения скорости теплоносителя в горизонтальных рядах представлена на рис. 3. Анализ результатов расчета показал, что входные скорости зависят только от средней длины труб в рядах и уменьшаются от 4,25 до 3,95 м/с. Потери на участках входного и выходного коллекторов на 6 порядков меньше сопротивления трубки и не влияют на результаты. Полученная зависимость зеркальна изменению средней длины труб по высоте коллектора.

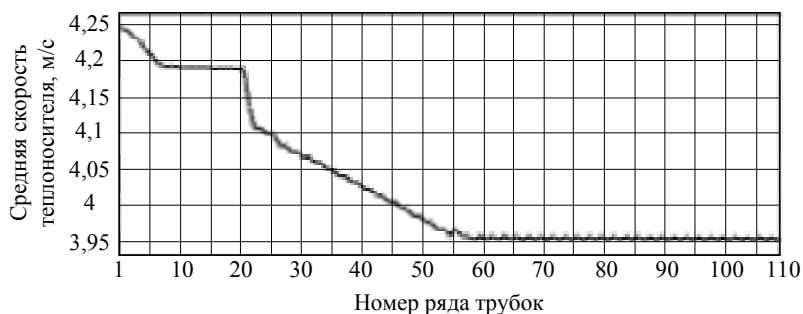


Рис. 3. Средняя скорость теплоносителя в горизонтальных рядах теплообменных труб

Используя значения средних скоростей теплоносителя в рядах труб, были рассчитаны температуры теплоносителя на выходе из трубок: температура теплоносителя по высоте перфорированной зоны плавно уменьшается от 289 до 286,95 °С.

Аналогичный расчет был проведен для труб в горизонтальном ряду. При этом для определения изменения скорости в трубках решалось уравнение (равенство гидравлического сопротивления всех трубок ряда) $\Delta p_{i+1} = \Delta p_i$. Приняв скорость в самой короткой трубке ряда, аналогично приведенному алгоритму определяется скорость в трубке 2. Затем, зная скорость в трубке 2, находится скорость в трубке 3 и т.д. до 119-й. Проверка правильности принятой скорости в трубке 1 осуществляется по выполнению условия $\Sigma G_i = 119G_{cp}$.

В результате расчета было получено, что средняя скорость теплоносителя в трубках горизонтального ряда из 119 трубок меняется от 4,16 до 3,43 м/с. При этом температура теплоносителя на выходе из трубок с ростом длины труб уменьшается с 289,3 до 283,06 °С.

В заключение можно отметить, что температура поверхности коллектора определяется по условию теплообмена между теплоносителем и кипящей водой. Реальная температура поверхности коллектора будет меньше полученных значений. Задача определения термических напряжений в стенке коллектора в результате температурной неравномерности на поверхности коллектора стандартными методиками не решается. Учитывая небольшие отличия температуры теплоносителя по высоте (2 °С на перфорированном участке длиной 110×0,019=2,09 м) и по окружности (6,2 °С на участке длиной 3,14×(0,834+0,168×2)/2=1,837 м), можно предположить, что возникающие термические напряжения будут незначительны и не внесут существенного вклада в критические напряжения, разрушившие коллектор.

Литература

1. Корякин, Ю.И. Парогенераторное бедствие / Ю.И. Корякин // Энергетическое стр-во. — 1992. — № 1. — С. 25 — 29.
2. Повреждение выходных коллекторов парогенераторов на АЭС с ВВЭР-1000/ [В.И. Бараненко, В.С. Киров, В.П. Кравченко и др.] //Атомн. энергия. — 1993. — Т. 75, вып. 5. — С. 391 — 394.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Мазуренко А.С.

Поступила в редакцию 6 мая 2008 г.