

Ц.А. МАЛАКЯН

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ ВО ВСАСЫВАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ АВАРИЙНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО НАСОСА ААЭС ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

При крупных авариях или проектных сейсмических воздействиях, при которых исключается возможность штатного расхолаживания, проектно предусмотрено использование системы аварийного расхолаживания высокого давления. Вода к аварийным сейсмическим насосам (АСН) подается по всасывающему трубопроводу, где возможно ее замерзание при низких температурах окружающей среды. Результаты расчетов показали, что температура окружающей среды, при которой начинается замерзание воды во всасывающем трубопроводе, равна $-31,5^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: безопасность атомных станций, система аварийного расхолаживания высокого давления, экстремальные природные условия.

Введение. Анализ расчета возможности замерзания воды во всасывающем трубопроводе аварийного сейсмического насоса (АСН) на участке соединения с баком запаса обессоленной воды (БЗОВ) при экстремальных природных условиях выполнен в рамках вероятностного анализа безопасности ААЭС.

Баки с запасом обессоленной воды находятся на площадке АЭС. Основная роль данных баков заключается в подаче химобессоленной воды насосам системы аварийного расхолаживания высокого и низкого давления при крупных авариях или сейсмических воздействиях в случае повреждений основного оборудования второго контура, исключающих возможность штатного расхолаживания АЭС. Химобессоленная вода из БЗОВ подается на АСН по всасывающему трубопроводу АСН, который, проходя под землей, соединяется с БЗОВ в бетонном помещении, находящемся на площадке АЭС и граничащем с окружающей средой.

Согласно технологическому регламенту, температура в БЗОВ должна поддерживаться не ниже 5°C [1]. В холодное время года вода в баках обогревается паром, который подается в БЗОВ через обогревающий трубопровод и проходит через то же самое помещение (рис. 1), т.е. является единственным источником тепла для нагревания данного помещения. Кроме того, во избежание замерзания воды в баках и всасывающих трубопроводах АСН при температуре наружного воздуха $\leq 8^{\circ}\text{C}$ ежедневно с 2^{00} до 4^{00} включают на рециркуляцию два АСН поочередно по одному часу каждый.

Бетонное помещение, через которое проходят всасывающий трубопровод АСН и обогревающий трубопровод, в холодное время не обогревается отопительной системой. Единственным источником тепла для нагрева данного помещения являются потери энергии из обогревающего трубопровода. Часть бетонного помещения находится ниже нулевой отметки. Исходя из вышесказанного, при

температуре окружающей среды ниже 0°C возможно понижение температуры в бетонном помещении и тем самым замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН.

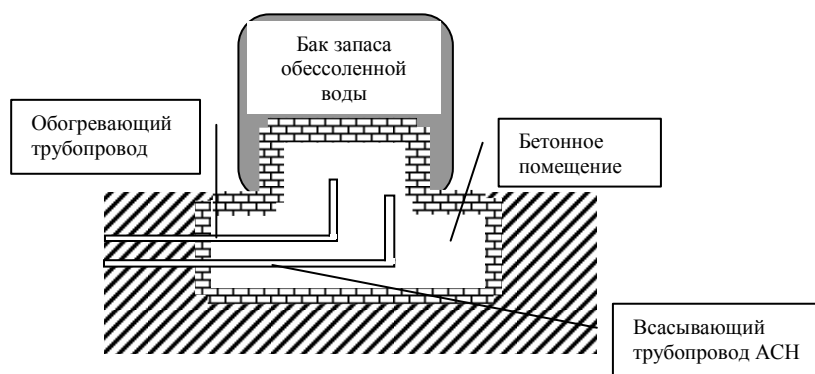


Рис. 1. Схематическое изображение помещения и трубопроводов

Целью расчета является определение температуры окружающего воздуха, при которой происходит замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН на участке соединения с БЗОВ. При этом температура воды на концах трубопровода принимается равной 5°C.

Методика расчета. Задача определения температуры во всасывающем трубопроводе АСН разделена на две стадии. В первой стадии вычисляется температура в помещении, исходя из потерь энергии через бетонные стенки в окружающую среду и поступления энергии из греющего трубопровода БЗОВ. Во второй стадии, исходя из результатов, полученных для температуры в помещении, вычисляется температура во всасывающем трубопроводе. В обеих стадиях коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности материалов считаются постоянными в течение всего расчета. Тепловые потери от бетонной стенки к земле не учитываются, поскольку незначительны по отношению к утечкам энергии через бетонные стенки в окружающую среду.

Для расчета коэффициентов теплоотдачи использовались следующие критериальные уравнения [2]:

- ламинарное течение пара в трубопроводе между обогревающим паром и трубопроводом:

$$Nu_L = 4,264;$$

- свободная конвекция около горизонтальной трубы между трубопроводом и воздухом:

$$Nu_D = 0,36 + \frac{0,518Ra_D^{1/4}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{4/9}};$$

- свободная ламинарная конвекция вдоль вертикальной пластинки между бетонной стенкой и окружающей средой:

$$\text{Nu}_L = 0,678\text{Ra}_L^{1/4} \left(\frac{\text{Pr}}{0,952 + \text{Pr}} \right)^{1/4}.$$

Для расчета температуры воздуха в помещении используется точечная модель. Температура в помещении усреднена по всему объему и рассчитывается по уравнению теплового баланса

$$M c_p \frac{dt}{d\tau} = R_h l_h (t_s - t) - R_{ata} S_r (t - t_{ata}), \quad (1)$$

где M - масса воздуха в помещении; c_p - удельная теплоемкость воздуха; t_s - температура пара в греющем трубопроводе; t - температура воздуха в помещении; t_{ata} - температура окружающей среды; l_h - длина греющего трубопровода; S_r - площадь помещения, граничащего с окружающей средой.

Потери через бетонные стены и приток энергии от греющего трубопровода БЗОВ учитываются, соответственно, коэффициентом теплопередачи для бесконечной пластинки R_{ata} и линейным коэффициентом теплопередачи для бесконечного цилиндра R_h :

$$R_{ata} = \frac{1}{1/h_{ata} + d_{con}/\lambda_{con} + 1/h_{con}}, \quad (2)$$

$$R_h = \frac{\pi}{1/h_r d_{cl_o} + 1/2\lambda_{cl} \ln d_{cl_o}/d_{cl_i} + 1/h_s d_{cl_i}}, \quad (3)$$

где h_r , h_s , h_{ata} , h_{con} - коэффициенты теплоотдачи между паром греющего трубопровода и трубопроводом, трубопроводом и воздухом, бетонной стеной и окружающей средой, бетонной стеной и воздухом в помещении соответственно; λ_{cl} , λ_{con} - коэффициенты теплопроводности греющего трубопровода и бетона соответственно; d_{cl_o} - внешний диаметр греющего трубопровода; d_{cl_i} - внутренний диаметр греющего трубопровода; d_{con} - толщина бетонной стены.

Решая уравнение (1) для температуры воздуха в помещении, с учетом начального условия $t(0)=0^\circ\text{C}$ получим

$$t = t_0 e^{-\frac{(R_h l + R_{ata} S_r) \tau}{M c_p}} + \frac{R_h l t_{ata} + R_{ata} S_r t_s}{R_h l + R_{ata} S_r} \times \left(1 - e^{-\frac{(R_h l + R_{ata} S_r) \tau}{M c_p}} \right). \quad (4)$$

Из (4) видно, что при стационарном состоянии ($\tau \rightarrow \infty$):

$$t = \frac{R_h l t_{ata} + R_{ata} S_r t_s}{R_h l + R_{ata} S_r}. \quad (5)$$

Во второй стадии для расчета температуры воды во всасывающем трубопроводе АСН использовалось уравнение теплового баланса с граничными условиями $t(x, 0) = 5^0 C, t(\pm H, \tau) = 5^0 C$:

$$\rho c_{p_w} S \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_w S \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - R_{cl_a} 2H(t - t_{ss}), \quad (6)$$

где ρ - плотность воды в трубопроводе; c_{p_w} - удельная теплоемкость воды; S -площадь поперечного сечения всасывающего трубопровода АСН; λ_w - коэффициент теплопроводности воды; R_{cl_a} - линейный коэффициент теплопередачи для бесконечного цилиндра.

Для учета тепловых потерь в боковом направлении в уравнение теплового баланса был введен член, где в качестве функции от температуры по длине трубопровода задается количество тепла, проходящего через боковую поверхность:

$$R_{cl_a} = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_{asn}} \ln \frac{d_{asn} + 2\Delta_1}{d_{asn}} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{asn} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2}{d_{asn} + 2\Delta_1} + \frac{1}{h_{at_a} (d_{asn} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2)}}$$

где λ_{asn} - коэффициент теплопроводности всасывающего трубопровода АСН; λ_{iz} - коэффициент теплопроводности изоляции; $2H$ - длина трубопровода АСН; h_{at_a} - коэффициент теплоотдачи между трубопроводом и воздухом; d_{asn} - диаметр всасывающего трубопровода АСН; Δ_1 - толщина стенки всасывающего трубопровода АСН; Δ_2 - толщина изоляции всасывающего трубопровода АСН.

Данная функция является решением дифференциального уравнения теплопроводности для бесконечной цилиндрической поверхности. Правомочность использования такой модели исходит из того, что длина трубопровода намного больше его радиуса ($r/L=0,118/18 \approx 0,0065$).

Для определения температуры во всасывающем трубопроводе АСН приняты следующие допущения:

- в трубопроводе не возникают конвективные токи и теплообмен осуществляется только за счет теплопроводности. Данное допущение обосновано тем, что вода во всасывающем трубопроводе АСН при нормальной эксплуатации находится в стоячем состоянии. Всасывающий трубопровод АСН имеет горизонтальную ориентацию в помещении [3];
- температура на концах трубопровода считается постоянной и равной минимально допустимой температуре в БЗОВ [1].

Решение уравнения (6) будем искать в виде разложения в ряд Фурье по собственным функциям однородного уравнения:

$$t = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \varphi_n. \quad (7)$$

Собственными функциями однородного уравнения (6) с учетом граничных условий являются

$$\varphi_n = \cos(\eta_n x), \quad \eta_n = \frac{2n-1}{2H} \pi.$$

Решение уравнения (6) для температуры воды в трубопроводе с использованием (7) имеет следующий вид:

$$t(x, \tau) = t_0 + (t_{ss} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} (1 - e^{-\xi_n \tau}) \cos\left(\frac{2n-1}{2H} \pi x\right), \quad (8)$$

$$\xi_n = \frac{R_{cl_a} 2H}{Sp c_{p_w}} + a \left(\frac{2n-1}{2H} \pi \right)^2,$$

$$f_n = \frac{4 \frac{R_{cl_a} 2H}{Sp c_{p_w}} \sin\left(\frac{2n-1}{2} \pi\right)}{(2n-1)\pi}.$$

Из (8) видно, что при стационарном состоянии ($\tau \rightarrow \infty$):

$$t_{s_asn}(x) = t_0 + (t_{ss} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} \cos\left(\frac{2n-1}{2H} \pi x\right),$$

$$\min(t_{s_asn}(x)) = t_0 + (t_{ss} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n}.$$

Результаты расчета. Так как в холодное время года в течение суток всасывающий трубопровод АСН находится в состоянии контроля только в продолжение 2 часов, при котором насосы АСН включаются в рециркуляцию, то одним из факторов для данной задачи является определение времени, при котором температура в трубопроводе опустится ниже 0°C . Если данная температура достигается в течение времени больше, чем 22 часа, то можно утверждать, что замерзание невозможно.

Результаты расчета показали, что при $t_{\text{ата}} = -40^{\circ}\text{C}$ температура в помещении снижается до -17°C (рис. 2), а температура во всасывающем трубопроводе АСН достигает 0°C в течение 13,5 часов, и вода замерзает (рис. 3).

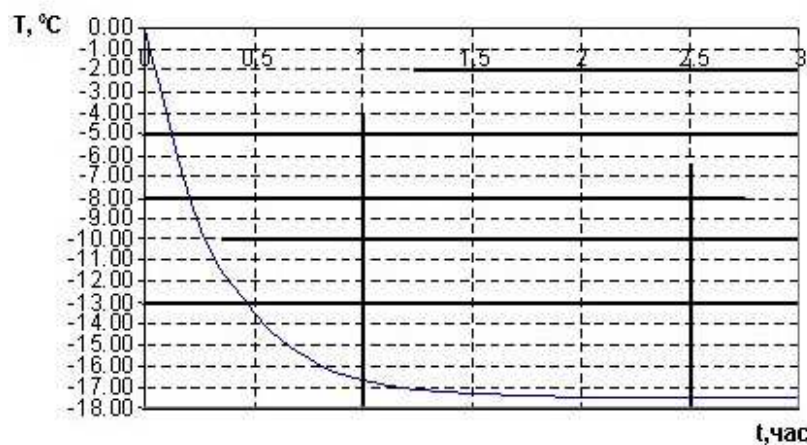


Рис.2.
Изменение температуры в помещении

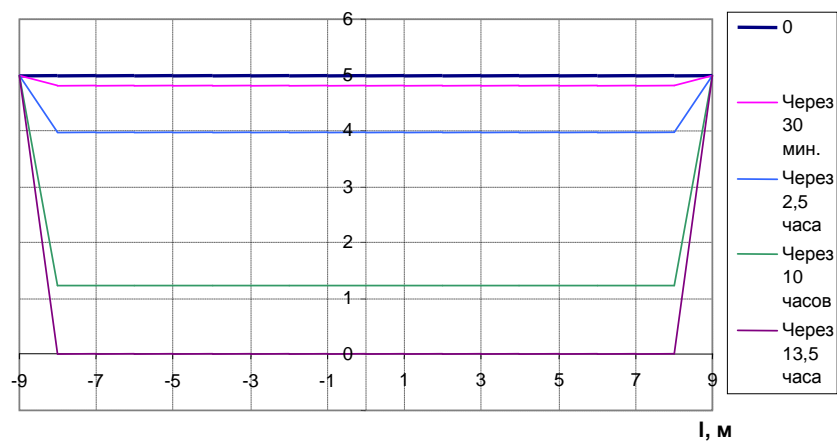


Рис.3. Температура во всасывающем трубопроводе АСН

Также был проведен обратный расчет для определения минимальной температуры окружающей среды, при которой температура воды во всасывающем трубопроводе будет выше 0°C в течение 22 часов.

Результаты показали, что температура окружающей среды в этом случае может быть не ниже $-31,5^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Таким образом, результаты расчетов показали, что при температуре окружающей среды, равной -40°C , возможно замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН, что может привести к невозможности подачи воды от системы аварийного расхолаживания высокого давления в парогенераторы при аварийных режимах. Температура окружающей среды, при которой температура воды во всасывающем трубопроводе будет выше 0°C в течение 22 часов, должна быть не ниже $-31,5^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологический регламент ААЭС.- Ереван, 1995.- 286 с.
2. **Lienhard John H.** Heat transfer text-book, third edition.- Cambridge Massachusetts, 2002. Phlogiston press.- 738 p.
3. **Исаченко И.** Теплопередача. Изд. 2-е. - М.: Энергия, 1969. - 440 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.12.2003.

Ց.Ա. ՄԱԼԱՔՅԱՆ

ՋՐԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՀԱՅԿԱԿԱՆ ԱԷԿ-Ի ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՄԱՆ ՎԹԱՐԱՅԻՆ ՀՈՎԱՅՄԱՆ ԵՆԹԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ ՇՐՋԱԿԱ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՑԱԾԻ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Մեծ վթարների կամ սեյսմիկ ազդեցությունների ժամանակ, երբ Հայկական ԱԷԿ-ի երկրորդ էներգաբլոկի երկրորդ կոնտուրի հիմնական սարքավորումները կարող են ենթարկվել վթարի, նախատեսված է բարձր ճնշման վթարային հովացման ենթահամակարգի օգտագործում: Մնուցման ջուրն այդ համակարգի պոմպերին տրվում է ստորգետնյա խողովակաշարով, որտեղ հնարավոր է ջրի սառեցում: Հաշվարկի արդյունքները ցույց են տալիս, որ շրջակա միջավայրի կրիտիկական ջերմաստիճանը (որի դեպքում խողովակաշարում սկսվում է ջրի սառեցումը) - 31,5°C է:

TS. A. MALAKYAN

WATER TEMPERATURE CALCULATION IN SUCTION PIPELINE OF EMERGENCY SEISMIC PUMP AT NPP RA AT LOW TEMPERATURE OF ENVIRONMENT

During super emergencies or design seismic actions when the possibility of standard cooling is excluded, the design foresees the use of a high pressure cooling emergency system. Water is fed into the emergency seismic pump by the suction pipeline where water freezing is possible at low temperatures of the environment. The results of calculation show that the temperature of the environment when water freezing begins in the suction pipeline is equal to - 31,5° C.