

## РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ЗАТВОРОВ МАЛЫХ ГЭС

*А.П. Балянов, Д.В. Виноградов, А.В. Шипилов*

---

Рассмотрен процесс теплоотдачи от затвора в окружающую среду в зависимости от температуры воды и воздуха в зимних условиях. Получено уравнение, позволяющее рассчитать мощность обогревателя.

*Ключевые слова:* обогреватель; затвор; теплоотдача.

Малые ГЭС Кыргызской Республики расположены в горных и предгорных районах и при их эксплуатации в зимний период возникают трудности, связанные с обледенением и примерзанием затворов к направляющим устройствам ГЭС. Это приводит к тому, что при технологических маневрированиях затворами происходит обрыв тяговых органов. Обмерзают не только затворы, но и со-роудерживающие решетки. Уменьшается или пре-

кращается подача воды к гидротурбинам. Зимой 2007–2008 г. по причине обмерзания на неделю были остановлены Калининская и Быстровская малые ГЭС.

Была поставлена задача разработать систему сигнализации о начале обледенения элементов ГЭС, а также экономную систему обогрева затворов. Опыт эксплуатации существующих систем обогрева малых ГЭС Кыргызстана показал, что

наиболее эффективно обогрев затворов можно обеспечить подводом тепла к кинематической паре “направляющее устройство – подвижный затвор”.

Рассчитаем мощность обогрева, необходимую для предотвращения обледенения и примерзания затвора к закладным частям (направляющие устройства) простейшего регулятора расхода воды [1, 2].

При рассмотрении схемы подвода тепла, считаем, что подвод тепла к закладной части более экономичен, это связано с тем, что температура бетона и земли за закладной частью заведомо больше температуры самого затвора, поэтому если мысленно расположить нагревательный элемент в промежутке между затвором и закладной частью (даже пренебрегая теплоизоляцией) поток тепла будет более интенсивен в сторону затвора. А если мы расположим нагревательный элемент за закладной частью, то более интенсивный тепловой поток направится именно к защищаемому элементу, тем самым расход энергии на полезное тепло увеличится и соответственно увеличится КПД (см. рисунок 1).

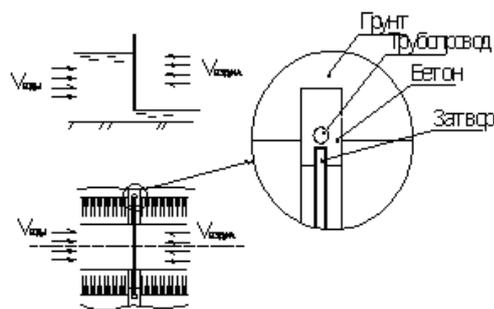


Рисунок 1 – Расчетная схема теплоотдачи затвора

Для расчета мощности обогрева необходимо рассчитать тепловой поток, идущий от трубопровода с горячим теплоносителем, к затвору. Если трубопровод изолировать теплоизоляцией со стороны земли, то задачу можно считать одномерной. По сути, необходимо рассчитать тепло, отдаваемое затвором в окружающую среду, с учетом симметрии затвора.

При расчете сделаем ряд следующих допущений: все среды изотропны, температура воздуха и воды, и их коэффициенты теплоотдачи остаются постоянными.

Принимая допущение о постоянстве температуры по высоте затвора, найдем мощность, отдаваемую затвором в окружающую среду, считая, что тепло к нему подводится с краев, получим следующую расчетную схему:

Принимая обозначения на рисунке 2, можно записать, что

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ. \quad (1)$$

Согласно закону Фурье:  $Q_x = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot f$ , где  $f$  – площадь поперечного сечения затвора,  $\frac{\text{м}^2}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности затвора,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

$$\begin{aligned} \text{Также } Q_{x+dx} &= -\lambda \cdot \frac{d}{dx} \left( t + \frac{dt}{dx} dx \right) \cdot f = \\ &= -\lambda \cdot f \cdot \frac{dt}{dx} - \lambda \cdot f \cdot \frac{d^2t}{dx^2} dx. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } Q_x - Q_{x+dx} &= -\lambda \cdot f \cdot \frac{dt}{dx} + \lambda \cdot f \cdot \frac{dt}{dx} + \\ &+ \lambda \cdot f \cdot \frac{d^2t}{dx^2} dx = \lambda \cdot f \cdot \frac{d^2t}{dx^2} dx. \end{aligned}$$

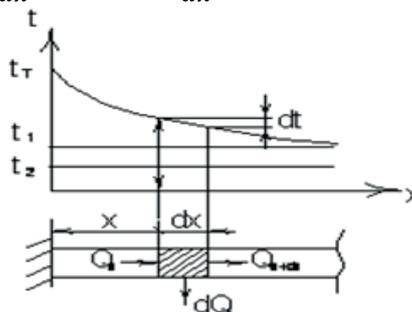


Рисунок 2 – Расчетная схема:  $Q_x$  – тепло, подводимое к элементу  $dx$ , через площадь поперечного сечения  $f$  за единицу времени;  $Q_{x+dx}$  – тепло, отводимое от элемента  $dx$ , через площадь поперечного сечения  $f$  за единицу времени;  $dQ$  – тепло, отводимое от элемента  $dx$ , в окружающую среду

Что касается отвода тепла в окружающую среду, то по закону Ньютона–Рихмана:

$$dQ = \alpha_1 \cdot (t - t_1) \cdot h \cdot dx + \alpha_2 \cdot (t - t_2) \cdot h \cdot dx,$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;  $h$  – высота затвора, м.

В этой связи уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \lambda \cdot f \cdot \frac{d^2t}{dx^2} dx &= \alpha_1 \cdot (t - t_1) \cdot h \cdot \\ &\cdot dx + \alpha_2 \cdot (t - t_2) \cdot h \cdot dx \end{aligned}$$

или после преобразования:

$$\frac{d^2t}{dx^2} - t \cdot \frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h}{\lambda \cdot f} = -h \cdot \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\lambda \cdot f}. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка, решением которого является сумма общего решения однородного дифференциального уравнения и частного решения неоднородного уравнения.

Общим решением однородного уравнения является:

$$t_{00} = C_1 \cdot e^{kx} + C_2 \cdot e^{-kx}, \quad (3)$$

где  $k = \sqrt{\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h}{\lambda \cdot f}}$ .

Величина  $k$  имеет размерность  $\frac{1}{\text{м}}$ .

Найдем частное решение неоднородного дифференциального уравнения методом вариации постоянных:

$$\begin{cases} C_1'(x) \cdot e^{kx} + C_2'(x) \cdot e^{-kx} = 0 \\ C_1'(x) \cdot k \cdot e^{kx} - C_2'(x) \cdot k \cdot e^{-kx} = -h \cdot \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\lambda \cdot f} \end{cases}$$

Откуда находим частное решение неоднородного уравнения:

$$t_{\text{ч.н}} = \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Тогда решением неоднородного уравнения является:  $t = C_1 \cdot e^{kx} + C_2 \cdot e^{-kx} + \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$ , (4) где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, значения которых определяются из граничных условий.

В начале, где край затвора прилегает к закладной части, мы задаемся необходимой нам температурой, т.е. при:  $x = 0$ ;  $t = t_T$ ,

$$\text{Или } t = C_1 + C_2 + h \cdot \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (5)$$

В середине затвора мы имеем равенство температур слева и справа, в связи с чем наблюдается экстремум температуры, т.е.:

$$x = l; \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=l} = 0 \text{ или } C_1 \cdot k \cdot e^{kl} - C_2 \cdot k \cdot e^{-kl} = 0. \quad (6)$$

Объединяя условия (5) и (6) в систему, находим постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{\left(t_T - \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}\right) \cdot e^{-2kl}}{1 + e^{-2kl}} \text{ и } C_2 = \frac{t_T - \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}}{1 + e^{-2kl}}.$$

Подставляя их в уравнение (4), и делая преобразования, получаем:

$$t = t_T \cdot \frac{ch[k \cdot (l-x)]}{ch(kl)} + \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot \left(1 - \frac{ch[k \cdot (l-x)]}{ch(kl)}\right). \quad (7)$$

Наконец мы можем определить количество теплоты, отдаваемое половиной затвора в окружающую среду, оно будет равно теплу, подведенному к торцу затвора, а именно:

$$Q_T = -\lambda \cdot f \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0}$$

Из уравнения (7) находим:

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=0} = -t_T \cdot k \cdot \frac{sh(kl)}{ch(kl)} + \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2} k \cdot \frac{sh(kl)}{ch(kl)}$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда: } Q_T &= \lambda \cdot f \cdot t_T \cdot k \cdot th(kl) - \\ &- \lambda \cdot f \cdot k \cdot \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot th(kl). \end{aligned}$$

Наконец, подставляя значение  $k$  получаем:

$$Q_T = t_T \cdot \sqrt{\lambda \cdot f \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h} \cdot th\left(l \cdot \sqrt{\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h}{\lambda \cdot f}}\right) - \sqrt{\lambda \cdot f \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h} \cdot \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \cdot th\left(l \cdot \sqrt{\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h}{\lambda \cdot f}}\right)$$

Или:

$$Q_T = \left(t_T - \frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}\right) \cdot \sqrt{\lambda \cdot f \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h} \cdot th\left(l \cdot \sqrt{\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h}{\lambda \cdot f}}\right),$$

где величина  $\frac{\alpha_1 \cdot t_1 + \alpha_2 \cdot t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$  является средневзвешенной температурой по коэффициенту теплоотдачи, тогда можно записать:

$$Q_T = \theta_{\text{ср}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot f \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h} \cdot th\left(l \cdot \sqrt{\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot h}{\lambda \cdot f}}\right),$$

где:  $\theta_{\text{ср}}$  – температурный напор между закладной частью и средневзвешенной температурой среды.

Тогда для всего затвора:  $Q_3 = 2 \cdot Q_T$ . (8)

Пренебрегая теплопотерями через лобовые части закладных частей, мощность, необходимую для обогрева, можно рассчитать по выражению (8) с учетом коэффициента надежности, который увеличивает расчетную мощность на 30–50 %.

$$Q_0 = K_H \cdot Q_3,$$

где  $Q_0$  является тепловым потоком, который необходимо подвести к затвору, чтобы предотвратить его примерзание к закладным частям.

Для примера определим мощность, необходимую для обогрева стабилизатора расхода типа ССКЩ, со следующими геометрическими параметрами: ширина 4 м, высота 2 м, толщина 0,1 м.

Температуру воздуха примем равной  $-7^\circ\text{C} = 266^\circ\text{K}$ , так как наблюдения показали, что при данной температуре наблюдается наиболее интенсивное шугообразование.

Температуру воды примем равной  $0^\circ\text{C} = 273^\circ\text{K}$ , как наиболее неблагоприятную.

Температура у закладной части составляет  $1^\circ\text{C} = 274^\circ\text{K}$ .

Принимая коэффициент теплоотдачи воды  $1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$ , воздуха  $60 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$ , коэффициент теплопроводности стали  $64 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$ , находим:

$$Q_T = \left( 274 - \frac{1000 \cdot 273 + 60 \cdot 266}{1000 + 60} \right) \cdot \sqrt{64 \cdot 0,2 \cdot (1000 + 60) \cdot 2} \cdot th \left( 2 \cdot \sqrt{\frac{(1000 + 60) \cdot 2}{64 \cdot 0,2}} \right) = 230 \text{ Вт.}$$

Тогда,  $Q_0 = K_H \cdot 2 \cdot Q_T = 1,5 \cdot 2 \cdot 230 = 690 \text{ Вт.}$

### *Литература*

1. *Исаченко В.П. и др.* Теплопередача: учебник для вузов. 4-е изд. М.: Энергия, 1981. 416 с.
2. *Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина.* М.: Высшая школа, 2005.