

14. ТЕПЛОВОЙ, ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ И ИНЕРЦИОННЫЙ АККУМУЛЯТОРЫ

Тепловое аккумулярование – это физические процессы, посредством которых происходит накопление тепла в тепловом аккумуляторе энергии.

Применяется классификация аккумуляторов тепла по виду аккумулирующей и теплообменной среды: прямое и косвенное аккумулярование.

Прямое аккумулярование: аккумулирующей и теплообменной является одна и та же среда. Аккумулирующая среда может быть твердой, жидкой, газообразной или двухфазной (жидкость плюс газ).

Косвенное аккумулярование: энергия аккумулируется только посредством теплообмена (например, теплопроводностью через стенки резервуара) либо в результате массообмена специальной теплообменной среды (в жидком, двухфазном или газообразном состоянии). Собственно аккумулирующая среда может быть твердой, жидкой или газообразной (процесс может протекать без фазового перехода, с фазовым переходом твердое тело – твердое тело, твердое тело – жидкость или жидкость – пар).

Аккумуляторы также могут быть с постоянной или переменной массой, объемом и давлением.

Рассмотрим ненасыщенный водяной аккумулятор с косвенным аккумулярованием насыщенным паром (рис. 15.1). При нагревании в аппарате воды, пар конденсируется при температуре, соответствующей его давлению. Количество нагреваемой воды M_2 в аппарате остается постоянным. Вследствие того, что температура конденсации пара t_H постоянна во времени, а температура воды t_2 увеличивается (рис. 15.1), температурный напор $\Delta t = t_H - t_2$ с течением времени уменьшается.

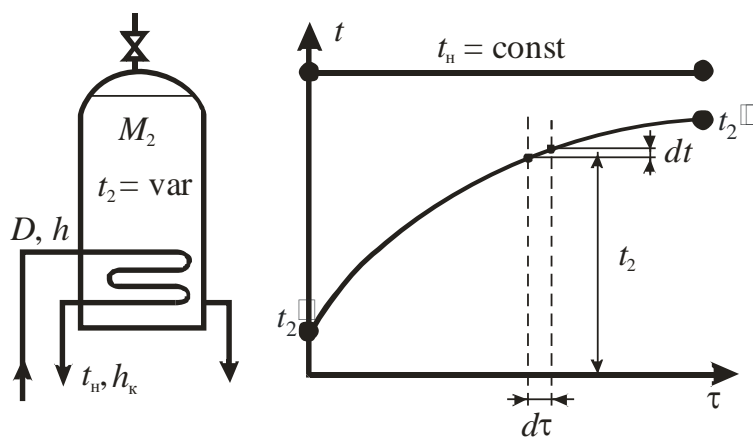


Рис. 15.1. Ненасыщенный водяной аккумулятор с косвенным аккумулярованием насыщенным паром

Дифференциальные уравнения теплопередачи и теплового баланса для элемента времени dt , в течение которого температура воды повышается на dt , имеют вид:

$$dQ = D(h - h_k) d\tau = kS\Delta t d\tau = M_2 c_2 dt,$$

где D – расход пара, кг/с; h – энтальпия перегретого пара, Дж/(кг·°С); h_k – энтальпия конденсата пара, Дж/(кг·°С); k – коэффициент теплопередачи через поверхность теплообмена, Вт/(м²·°С), S – поверхность теплообмена, м².

Этими уравнениями выражается равенство расходов тепла, отданного паром, переданного через поверхность нагрева и полученного водой.

Средняя за время τ температура воды определяется по формуле

$$t_2^{\text{cp}} = t_H - \Delta t = t_H - \frac{t_2'' - t_2'}{\ln \frac{t_H - t_2'}{t_H - t_2''}},$$

где t_2' , t_2'' – соответственно начальная и конечная через промежуток времени τ температура воды в баке-аккумуляторе.

Если известна поверхность нагрева аккумулятора, то необходимо найти конечную температуру нагреваемой воды:

$$t_2'' = t_H - (t_H - t_2') e^{-\frac{kS\tau}{M_2 c_2}}.$$

Зависимость расхода пара от времени выражается формулой

$$D = kS \frac{t_H - t_2'}{h - h_k} e^{-\frac{kS\tau}{M_2 c_2}}.$$

Особенностью режима работы водяного аккумулятора с косвенным аккумулированием водой (рис. 15.2) является то, что при постоянном расходе G_1 и температуре воды t_1' температура ее на выходе из аппарата по мере нагревания воды в аккумуляторе увеличивается. Дифференциальные уравнения теплопередачи и теплового баланса для элемента времени $d\tau$, в течение которого температура воды повышается на dt , имеют вид:

$$dQ = G_1 c_1 (t_{11} - t_{12}) d\tau = kS\Delta t d\tau = M_2 c_2 dt,$$

где G_1 – расход горячей воды, кг/с.

Откуда

$$kS(t_{11} - t_{12}) / \ln \frac{t_{11} - t_2}{t_{12} - t_2} = G_1 c_1 (t_{11} - t_{12}); \quad \frac{t_{11} - t_2}{t_{12} - t_2} = e^{\frac{kS}{G_1 c_1}}.$$

Температура греющей воды на выходе из аккумулятора

$$t_{12} = t_2 + (t_{11} - t_2) e^{-\frac{kS}{G_1 c_1}}.$$

Конечная температура нагреваемой воды

$$t_2'' = t_{11} - (t_{11} - t_2') \exp \left(-\frac{G_1 c_1 \tau}{M_2 c_2} \left(1 - \exp \left(-\frac{kS}{G_1 c_1} \right) \right) \right).$$

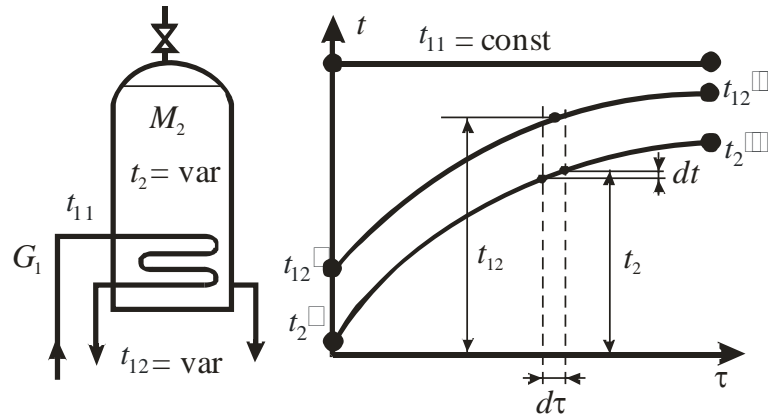


Рис. 15.2. Ненасыщенный водяной аккумулятор с косвенным аккумулярованием водой

В большой энергетике наибольшее применение получили гидравлические аккумулирующие электростанции (ГАЭС). ГАЭС состоит из двух емкостей, расположенных на разных геометрических высотах и соединенных трубопроводом (рис. 15.3).

В момент зарядки рабочая жидкость (как правило, вода) перекачивается из нижней емкости в верхнюю. В момент разрядки жидкость движется из верхнего резервуара в нижний. Энергия зарядки

$$E = V\rho gH,$$

где V – объем закачиваемой жидкости; H – геометрическая высота между свободными уровнями жидкости двух емкостей.

Основные потери энергии при работе ГАЭС связаны с потерями при прокачке жидкости по водоводам:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где l , d – длина и диаметр водовода, м; λ – коэффициент гидравлического трения; v – скорость потока, м/с.

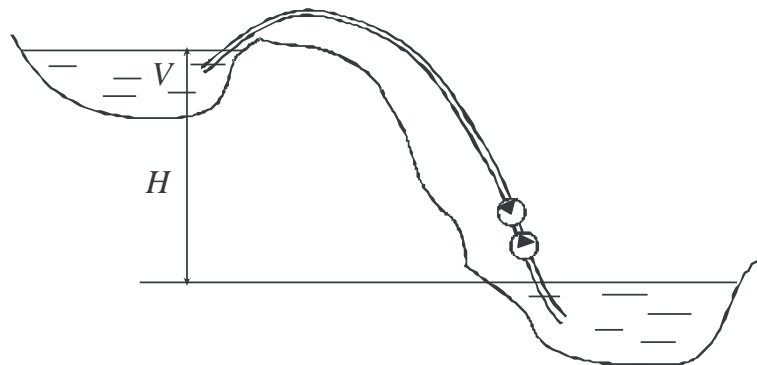


Рис. 15.3. Гидравлическая аккумулирующая электростанция

Тогда КПД ГАЭС равен произведению КПД гидравлического η_r ,

турбины η_T и насоса η_H

$$\eta_{\text{ГАЭС}} = \frac{E_{\text{турб}}}{E_{\text{насоса}}} = \frac{gV(H - h_{\text{дл}})\eta_T}{gV(H + h_{\text{дл}})/\eta_H} = \frac{H - h_{\text{дл}}}{H + h_{\text{дл}}} \eta_T \eta_H = \eta_r \eta_T \eta_H,$$

а гидравлический КПД η_r ГАЭС определяется по формуле

$$\eta_r = \frac{1 - \lambda \frac{l}{Hd^5} \frac{8V^2}{g\pi^2 T_{\text{разр}}^2}}{1 + \lambda \frac{l}{Hd^5} \frac{8V^2}{g\pi^2 T_{\text{заряд}}^2}},$$

где $T_{\text{разр}}$, $T_{\text{заряд}}$ – время разрядки и зарядки ГАЭС соответственно, с.

Мощность, выдаваемая ГАЭС,

$$N_{\text{турб}} = gG_{\text{турб}}(H - h_{\text{дл}})\eta_T.$$

В качестве инерционных аккумуляторов применяют маховики, которые могут быть двух типов:

- 1) в виде диска радиусом r , у которого собственный момент инерции определяется по формуле $I = mr^2/2$;
- 2) в виде обруча, т. е. когда масса сконцентрирована на периферии маховика, а собственный момент инерции определяется по формуле $I = mr^2$.

Кинетическая энергия вращающегося тела, Дж,

$$E = I\omega^2/2,$$

где ω – угловая скорость, рад/с.

Маховику, для более эффективного использования, необходимо сообщить максимальную скорость, которая ограничена напряжениями, разрывающими маховик под действием центробежных сил (например, для однородного маховика), Н/м²:

$$\sigma_{\text{max}} = \rho\omega^2 r^2,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³.

При этом плотность энергии, запасаемая однородным диском,

$$w = E/m = r^2\omega^2/4 = \sigma_{\text{max}}/(4\rho)$$

зависит от соотношения разрывающего напряжения к плотности материала.

Так, для стального маховика плотность энергии невелика – около 0,03 МДж/кг. Более высокую плотность энергии (около 0,5 МДж/кг) можно получить при использовании стеклокомпозитных материалов, имеющих большее разрывающее напряжение при меньшей плотности.

Задачи для практических занятий

Задача 15.1

В ненасыщенном водяном аккумуляторе с косвенным через трубчатый теплообменник аккумулярованием тепла насыщенным паром нагревали 5000 кг воды в течение 3 ч. Температура насыщения пара 105°C , начальная температура воды в баке 20°C . Диаметр трубки теплообменника $15 + 0,5 \cdot N$ мм, длина – 8 м. Коэффициент теплопередачи $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Определить конечную температуру воды в баке и расход пара, если использованный перепад энтальпии пара $220 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Задача 15.2

В ненасыщенном водяном аккумуляторе с косвенным через трубчатый теплообменник аккумулярованием горячей водой нагревали 5000 кг воды в течение 2 ч. Расход горячей воды через теплообменник $0,03 + 0,01 \cdot N$ кг/с, температура горячей воды на входе в теплообменник 85°C , начальная температура воды в баке 20°C . Диаметр трубки теплообменника $15 + 0,5 \cdot N$ мм, длина – 8 м. Коэффициент теплопередачи $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Определить конечную температуру воды в баке и конечную температуру воды на выходе из теплообменника.

Задача 15.3

Определить выдаваемую мощность ГАЭС и период разрядки, если КПД ГАЭС 72%, перепад уровней между верхним и нижнем водохранилищем 50 м, длина трубопровода 100 м, диаметр – $0,5 + 0,01 \cdot N$ м, коэффициент гидравлического трения трубопровода 0,03. Расход турбины $0,65 + 0,05 \cdot N \text{ м}^3/\text{с}$, время зарядки 14 часов. КПД турбины 85%, КПД насоса 93%.

Задача 15.4

Пассажирский автобус, испытывавшийся в Швейцарии, приводился в движение с помощью энергии, запасенной в маховике. Маховик разгонялся на стоянках электромотором, подключенным к электросети. Маховик представлял собой сплошной стальной диск массой $m = 100 \text{ кг}$, диаметром $d = 100 + 5 \cdot N$ см и мог вращаться с частотой 3000 об/мин. Какова кинетическая энергия маховика при максимальной скорости? Какое среднее время между стоянками для зарядки, если средняя мощность, потребляемая автобусом, $2 + 0,5 \cdot N$ кВт?