

**УДК 621.577**

А.В. КОНОНЧУК, А.С. НОВИКОВ учащиеся (УО «Национальный  
детский технопарк»)  
Научный руководитель И.А. НЕКАЛО, старший преподаватель (БНТУ) г.  
Минск

### **АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В ТЕПЛОВОЙ СХЕМЕ АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1200**

На рисунке 1 представлены основные элементы в тепловой схеме АЭС с реактором ВВЭР-1200: ядерный реактор (ЯР); главный циркуляционный насос (ГЦН); парогенератор (ПГВ); паровая турбина, состоящая из цилиндра высокого давления (ЦВД) и цилиндра низкого давления (ЦНД); электрогенератор (ЭГ); конденсатор (К); подогреватель низкого давления (ПНД); деаэратор (Д); подогреватель высокого давления (ПВД).

В конденсаторе АЭС происходит процесс конденсации пара, при котором оставшееся тепло отработавшего пара отдается охлаждающей воде, которая циркулирует по трубкам конденсатора и отдает свое тепло окружающей среде. Факторы, влияющие на процесс конденсации в конденсаторе: температура окружающей среды; скорость потока охлаждающей; величина площади поверхности трубок в конденсаторе.

Во избежание теплового загрязнения водоемов, в случае прямоточной системы охлаждения, и строительства градирен, в случае оборотной системы охлаждения, предлагается использование тепла отработавшего пара как низкопотенциальный источник тепловой энергии для тепловых насосов.

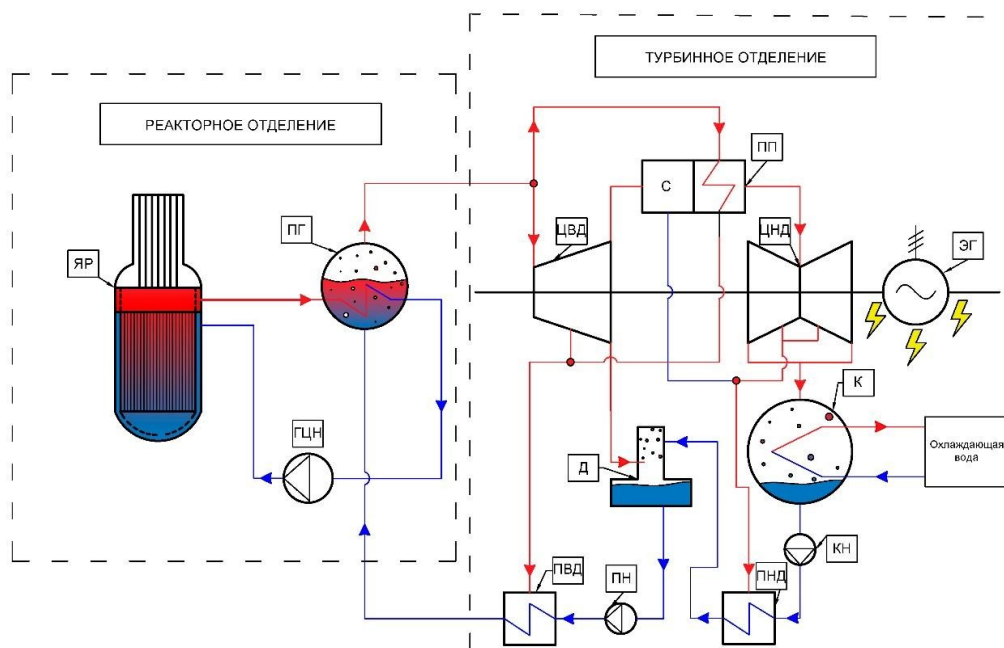
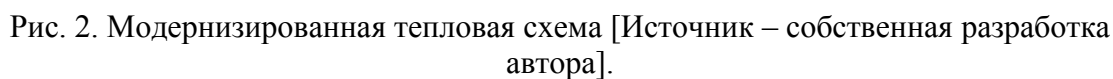


Рис. 1. Упрощенная тепловая схема двухконтурной АЭС с реактором ВВЭР-1200  
[Источник – собственная разработка автора].

При использовании отработанного тепла, тепловой насос может снизить расходы на циркуляционную воду для охлаждения конденсаторов и повысить электрическую мощность турбоустановки. Рассмотрим схему с использованием теплового насоса, изображенную на рисунке 2.

В данной схеме предполагается использование остаточной теплоты отработавшего пара, выходящего из ЦНД, для нагрева хладагента в испарителе теплового насоса и его перехода в газообразное состояние. После чего газообразный хладагент поступает в компрессор для увеличения термодинамических параметров и направляется в конденсатор теплового насоса, где конденсируется и отдает свое тепло подогревателю низкого давления.


$$N_{mk} = G_K \left( h_{\text{бвх}}^{\text{ПНД}} - h_{\text{вх}}^{\text{ПНД}} \right) / \eta_{m-k} = 1019,7 \cdot (251,4 - 163,636) / 0,985 = 90,856 \text{ MBm}$$

При коэффициенте преобразования теплового насоса  $\phi=3,7$  количество тепла, приходящего на испаритель, составит:

$$N_{TI} = \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) N_{mk} / \eta_{mh} = \left(1 - \frac{1}{3,7}\right) 90,856 / 0,985 = 67,309 \text{ MBm}$$

где  $\eta_{mn}$  – КПД теплового насоса, принято  $\eta_{mn} = 0,985$ .

$$\Delta t = \frac{N_{mn} \eta_{mn}}{W_c} = \frac{67,309 \cdot 10^6 \cdot 0,985}{29910 \cdot 4190} = 0,529^\circ\text{C}$$

где  $W$  – расход охлаждающей воды;  $W = 108000 \text{ т/ч} = 29910 \text{ кг/с}$ ,  $c$  – теплоемкость воды,  $c = 4,19 \text{ кДж/(кг К)}$ ;  $\eta_{mn}$  – КПД теплообменника-испарителя, принято  $\eta_{mn} = 0,985$  [1].

Увеличение мощности турбины за счет снижения температуры:

$$N = W \cdot c \cdot \Delta t \cdot \eta_m = 29910 \cdot 4190 \cdot 0,529 \cdot 0,8 = 59,037 \text{ МВт}$$

где  $\eta_t$  – КПД части низкого давления турбины;  $\eta_t = 0,8$ .

Увеличение мощности паровой турбины за счет установки теплового насоса составит 59,037 МВт. При принятом коэффициенте преобразования теплового насоса  $\varphi = 3,7$  мощность компрессора составит:

$$N_{\text{комп}} = N_{\text{тк}} / \varphi = 90,856 / 3,7 = 24,556 \text{ МВт}$$

Таким образом, общее увеличение мощности энергоустановки электростанции составит:

$$N = 59,037 - 24,556 = 34,481 \text{ МВт}$$

Минимальные удельные капиталовложения ( $k_{\text{уд}}$ ) предполагаем 2400\$ за 1 кВт дополнительной мощности. Тогда полные капиталовложения будут рассчитываться по следующей формуле:

$$K = k_{\text{уд}} \cdot N = 2400 \cdot 34481 = 82,754 \text{ млн \$}$$

где  $N$  – производительность в режиме нагрева, кВт.

Рассчитаем издержки для контура с тепловых насосом:

Издержки на амортизацию:

$$I_a = K \cdot \frac{H_a}{100} = 82,754 \cdot 10^6 \cdot \frac{4}{100} = 3,31 \text{ млн. \$ / год},$$

где  $H_a$  – норма амортизации для АЭС определяется по формуле:

$$H_a = \frac{1}{T_{\text{ну}}} \cdot 100 \% = \frac{1}{25} \cdot 100 = 4 \% / \text{год},$$

где  $T_{\text{пи}}$  – срок полезного использования теплового насоса, принимаем 25 лет.

Издержки на ремонт:

$$I_p = 0,5 \cdot I_a = 0,5 \cdot 3,31 \text{ млн. \$} = 1,655 \text{ млн. \$ / год}$$

Прочие издержки:

$$I_{\text{np}} = 0,15 \cdot (I_a + I_p) = 0,15 \cdot (3,31 + 1,655) = 0,745 \text{ млн. \$ / год}$$

Сумма всех издержек  $I$ , тыс. \$/год, определяется по формуле:

$$I = I_a + I_p + I_{\text{np}} = 3,31 + 1,655 + 0,745 = 5,71 \text{ млн. \$ / год}$$

Годовой отпуск тепловой энергии рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{отп}} = N \cdot h = 34,381 \cdot 7796 = 268034 \text{ МВт} \cdot \text{ч},$$

где  $N$  – тепловая мощность, МВт;  $h$  – число часов использования теплового насоса, примем 7796 часов.

Прибыль за год от теплового насоса  $\Pi_{\text{и}}$ :

$$\Pi_{\text{ТН}} = \tau_{\text{мэ}} \cdot \mathcal{E}_{\text{отп}} - I = 0,10 \cdot 268034 \cdot 10^3 - 5,71 \cdot 10^6 = 21,093 \text{ млн \$ / год}$$

где  $\tau_{\text{мэ}}$  – тариф на электрическую энергию, принимаем  $\tau_{\text{мэ}} = 0,10$  \$/кВт·ч;

Замена градирен на тепловые насосы позволит избавиться: от нестабильности параметров, на которые влияет температура окружающей среды; от присосов грязной охлаждающей воды; от лишних капиталовложений на строительство градирен или других источников технического водоснабжения.

Список литературы

1. Ефимов, Н. Н. Анализ использования тепловых насосов на тепловых и атомных электростанциях / Н. Н. Ефимов, В. В. Папин, П. А. Малышев, Р. В. Безуглов. // Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2010. – № 4. – С. 35–39.

2. Григорьев, В.А. Тепловые и атомные электрические станции : учеб. пособие / В.А. Григорьев, В.М. Зорин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

3. Атомные электрические станции [Электронный ресурс] : учебно-методический комплекс для студентов специальности 1-43 01 08 "Паротурбинные установки атомных электрических станций" / Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Тепловые электрические станции" ; сост.: А. В. Седнин, Н. Б. Карницкий. – Минск : БНТУ, 2017.

Информация об авторах:

Конончук Артём Владимирович, учащийся УО «Национальный детский технопарк», 220114, Республика Беларусь, г. Минск, улица Франциска Скорины, 25к3, kononcuka0808@gmail.com.

Новиков Андрей Сергеевич, учащийся УО «Национальный детский технопарк», 220114, Республика Беларусь, г. Минск, улица Франциска Скорины, 25к3, brawpoit@gmail.com.

Некало Игорь Андреевич, старший преподаватель, БНТУ, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65, nekalo@bntu.by