

**VI Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
114-1  
17-23 ноября 2023 года**

---

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 теплота 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 избежания 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.

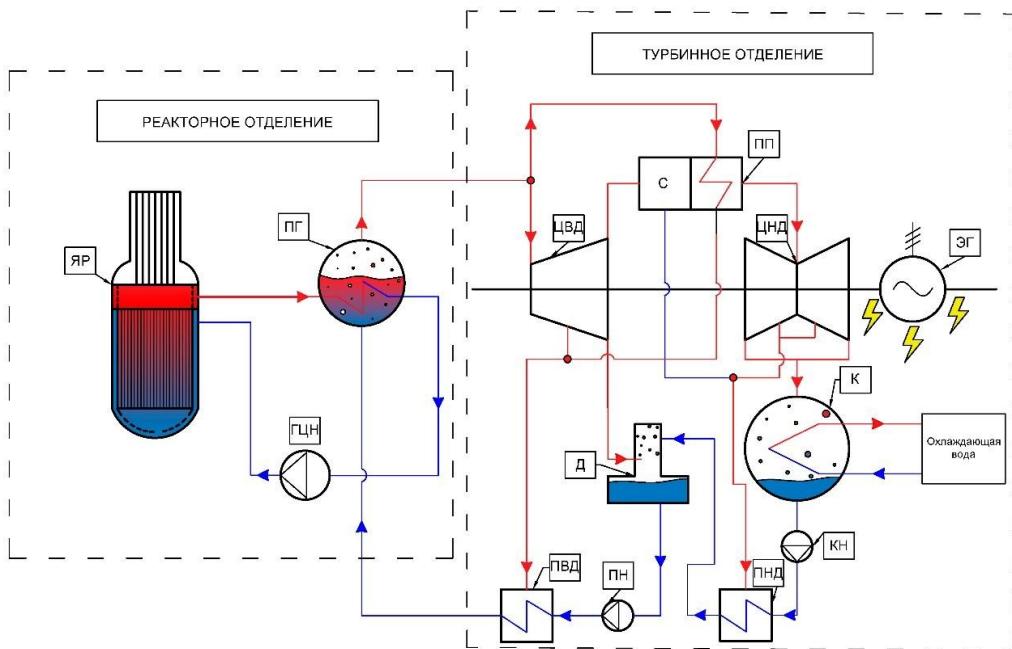


Рис. 1. Упрощенная тепловая схема двухконтурной АЭС с реактором ВВЭР-1200  
[Источник – собственная разработка автора].

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 хладогента в испарителе теплового насоса и его перехода в газообразное состояние. После чего газообразный хладогент поступает в компрессор для увеличения термодинамических параметров и направляется в конденсатор теплового насоса, где конденсируется и отдает свое тепло подогревателю низкого давления.

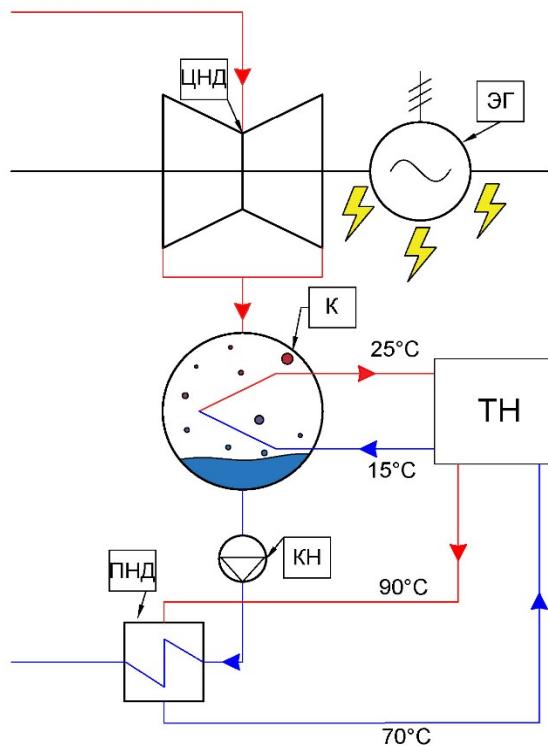


Рис. 2. Модернизированная тепловая схема [Источник – собственная разработка автора].

Расчет экономичности включения теплового насоса проанализируем на работе паровой турбины К-1200/6,8. Нагрузка теплообменника-конденсатора теплового насоса, от которого теплоноситель направляется на подогреватель низкого давления:

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

где  $G_K$  - расход конденсата турбины, проходящий через подогреватель низкого давления;  $D_K = 3671,025 \text{ т/ч} = 1019,7 \text{ кг/с}$ ;  $h_{\text{вх}}^{\text{ПНД}}$ ,  $h_{\text{вых}}^{\text{ПНД}}$  - энталпии конденсата на входе и выходе подогревателя соответственно;  $h_{\text{вх}}^{\text{ПНД}} = 163,636 \text{ кДж/кг}$ ,  $h_{\text{вых}}^{\text{ПНД}} = 251,4 \text{ кДж/кг}$  [3];  $\eta_{mk}$  – КПД теплообменника-конденсатора; принято  $\eta_{mk} = 0,985$  [1].

При коэффициенте преобразования теплового насоса  $\varphi = 3,7$  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  $\eta_{mh}$  – КПД теплового насоса, принято  $\eta_{mh} = 0,985$ .

**VI Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
114-4  
17-23 ноября 2023 года**

---

$$\Delta t = \frac{N_{th} \eta_{th}}{W_c} = \frac{67,309 \cdot 10^6 \cdot 0.985}{29910 \cdot 4190} = 0,529 \text{ } ^\circ\text{C}$$

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

Увеличение мощности турбины за счет снижения температуры:

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

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:

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

Таким образом, общее увеличение мощности энергоустановки электростанции составит:

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

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

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

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:

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

**VI Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
114-5  
17-23 ноября 2023 года**

---

---

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:

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

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

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

Годовой отпуск тепловой энергии рассчитывается по формуле:

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

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

Прибыль за год от теплового насоса  $\Pi_t$ :

$$\Pi_{TH} = \tau_{m3} \cdot \mathcal{E}_{omn} - I = 0,10 \cdot 268034 \cdot 10^3 - 5,71 \cdot 10^6 = 21,093 \text{ млн \$/год}$$

где  $\tau_{m3}$  – тариф на электрическую энергию, принимаем  $\tau_{m3} = 0,10$  \\$/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.

**VI Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
114-6  
17-23 ноября 2023 года**

---

---

**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