

УДК 662.997

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА С  
НАНОЧАСТИЦАМИ НА АЭС  
USE OF A SOLAR CONCENTRATOR WITH NANOPARTICLES AT NPP**

Э.В. Авсюкевич, В.М. Кузьмич

Научный руководитель – И.А. Некало, ассистент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
nekalobntu.by

E. Avsyukevich, V. Kuzmich  
Supervisor – I. Nekalo, assistant

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной научной работе рассматривается возможность использования параболоцилиндрического солнечного концентратора с наножидкостью, в качестве теплоносителя, для улучшения технико-экономических показателей атомных электрических станции (далее – АЭС) с реакторами типа ВВЭР.*

***Abstract:** in this scientific work, the possibility of using a parabolic-cylindrical solar concentrator with nanofluid as a heat carrier is considered to improve the technical and economic indicators of nuclear power plants (NPP) with VVER-type reactors.*

***Ключевые слова:** атомная электрическая станция; параболоцилиндрический солнечный концентратор; наночастицы; наножидкость; высокотемпературный теплоноситель.*

***Keywords:** nuclear power plant; parabolic-cylindrical solar concentrator; nanoparticles; nanofluid; high temperature coolant.*

### **Введение**

Все АЭС с реакторами типа ВВЭР имеют довольно высокий срок окупаемости и низкий коэффициент полезного действия (далее – КПД) в сравнении с тепловыми станциями схожей мощности. Низкий КПД связан с работой АЭС на низких параметрах из-за конструкционных материалов, что способствует маленькому теплоперепаду в паротурбинной установке, а это, в свою очередь, имеет влияние на выдаваемую электрическую мощность.

Для повышения термодинамических характеристик пара, выходящего из парогенератора, предлагается использование дополнительного циркуляционного контура, теплоноситель которого будет нагреваться в параболоцилиндрических солнечных концентраторах (далее – ПЦК).

Для подогрева пара с начальной температурой в 285,8°C на выходе из ПГВ-1000МКП необходимо затратить большие объемы теплоносителя, который способен выдерживать температуры от 350°C и выше. Для подогрева воды до таких температур требуется поднять давление выше 10 МПа, что сильно скажется на количестве конструкционных материалов, используемых в устройствах и трубопроводах, а это, в свою очередь, скажется на стоимости проекта. Поэтому в качестве теплоносителя в данной работе предлагается

использовать наножидкость на основе синтетического высокотемпературного теплоносителя и различных наночастиц.

### Основная часть

Наножидкости делаются на основе наночастиц и базовой жидкости путем диспергирования ультразвуком для стабильности дисперсионной системы и отсутствия слипания наночастиц в агломераты. Для расчета термодинамических параметров наножидкости, необходимо рассмотреть дисперсионную среду и диспергированное вещество по отдельности. В качестве дисперсионной среды предлагается использование высокотемпературного синтетического теплоносителя SCHULTZ S740. В качестве диспергированных веществ предлагается использование наночастицы графита и оксида железа (III), характеристики которых приведены в таблице.

Циркуляционный контур, в котором будет находится наножидкость, будет находится под давлением не более 0,5 МПа. И температура нагретого теплоносителя должна составлять 350°C. На рисунке 1 изображена схема циркуляционного контура, использующего в качестве теплоносителя наножидкость. Предполагается, что пароперегреватель, по трубкам которого будет циркулировать наножидкость, а в межтрубное пространство будет поступать пар от парогенераторов, будет иметь теплоперепад в 15°C.

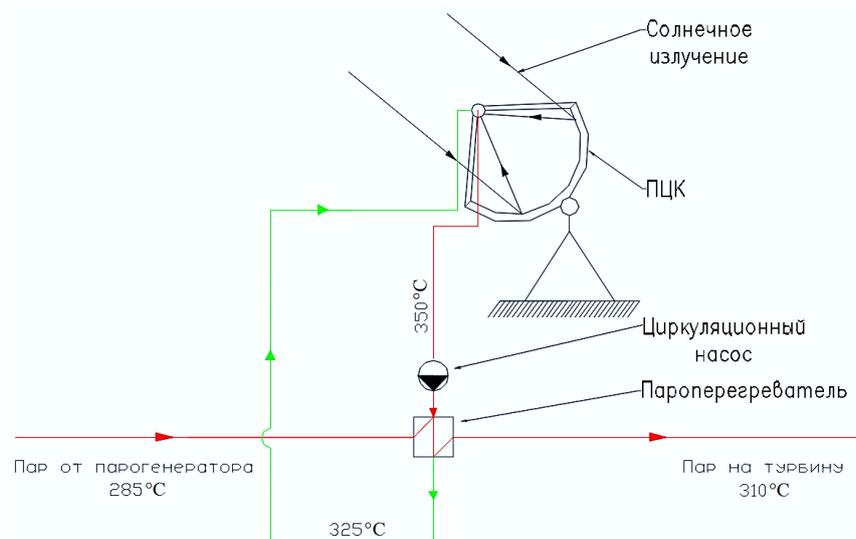


Рисунок 1 – Циркуляционный контур с ПЦК [Источник: собственная разработка автора]

Принимаем температуру наножидкости приходящую в пароперегреватель 350°C, а температуру наножидкости на выходе из пароперегревателя в 325°C. Теплоемкость и плотность наножидкости на основе графита и оксида железа (III) будет рассчитывается по суммарной массовой концентрации этих вещества в наножидкости. Принимаем массовую концентрацию наночастиц в наножидкости 3%.

Был выбран ПЦК с системой трекинга Gaia PT-20 Shandong, использующий прозрачные вакуумные трубки из боросиликатного стекла. Характеристики выбранного ПЦК приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики солнечного концентратора [1]

Характеристики	Параметры
Длина модуля	6 м
Площадь общей диафрагмы 1го модуля	15,3 м <sup>2</sup>
Рабочая температура	от 370°С
КПД	62,8 %
Стоимость	1600 \$

Эффективность ПЦК должна выражаться через КПД, который определяется как отношение производимой полезной энергии к полной солнечной энергии, принятой концентратором, однако использование ПЦК с наножидкостью увеличивает его эффективность до 20 %. Это связано с нагревом наножидкости в объеме, а не только на зачерненной стенке. Таким образом КПД ПЦК будет рассчитываться последующей формуле:

$$\eta = \frac{Q_U}{G_0 S_a}, \quad (1)$$

где  $Q_U$  – полезная энергия кДж;

$S_a$  – площадь незатененной апертуры ПЦК, принимаем 15 м<sup>2</sup> для одного модуля;

$G_0$  – плотность потока прямой солнечной радиации, принимаем 200 Вт/м<sup>2</sup> [2].

Зная значение полезной энергии, можно рассмотреть температуру жидкости на выходе теплоприемника [3]:

$$T_{f,L} = T_{f,0} + \frac{Q_U}{m \cdot C_p / 3,6}. \quad (2)$$

где  $m$  – массовая скорость потока жидкости в теплоприемнике, принимаем 26000 кг/ч;

$C_p$  – средняя теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С);

$T_{f,0}$  – входная температура жидкости, принимаем 325°С.

На АЭС с реакторами ВВЭР-1200 пар вырабатывается в парогенераторах ПГВ-1000МКП объемом 1605 т/ч на один парогенератор. Значит суммарный расход пара, проходящий через пароперегреватель составит 6420 т/ч = 1783 кг/с.

При выборе оборудования для циркуляционного контура необходимо произвести расчет расхода наножидкости в пароперегревателе:

$$G_{\text{нж}} = \frac{Q_{\text{пп}}}{c_{\text{нж}} \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (3)$$

где  $c_{\text{нж}}$  – удельная теплоемкость наножидкости, кДж/(кг·°С);

$t_1, t_2$  – начальная и конечная температура наножидкости при прохождении через пароперегреватель, °С;

$Q_{пп}$  – количество теплоты переданное пару от наножидкости через пароперегреватель, кДж, и рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{пп} = c_{п} \cdot G_{п}(t_2 - t_1), \quad (4)$$

где  $t_1, t_2$  – температура перед пароперегревателем и после соответственно, принимаем  $t_1 = 285^{\circ}\text{C}, t_2 = 310^{\circ}\text{C}$ ;

$c_{п}$  – удельная теплоемкость пара при среднем диапазоне температур  $t_1$  и  $t_2$  в  $297^{\circ}\text{C}$  и давлении 7 МПа,  $c_{п} = 4,45$  кДж/(кг · °С).

В таблице 2 приведены результаты расчета циркуляционного контура с ПЦК.

Таблица 2 – Результаты расчета циркуляционного контура с ПЦК [Источник: собственная разработка автора]

Характеристика	Результат
Плотность и теплоемкость графитовой наножидкости	813,15 кг/м <sup>3</sup> ; 2,3881 кДж/(кг · °С)
Плотность и теплоемкость наножидкости на основе оксида железа (III)	905,85 кг/м <sup>3</sup> ; 2,3893 кДж/(кг · °С)
Количество полезной энергии ПЦК ( $Q_U$ )	1559,88 МДж
Температура на выходе из ПЦК ( $T_{f,L}$ )	350°С
Количество теплоты пароперегревателя ( $Q_{пп}$ )	198,40 МДж
Расход наножидкости через ПП ( $G_{нж}$ )	3320 кг/с
Количество линий ПЦК	460 шт.
Количество модулей ПЦК	92 тыс.

На рисунке 2 изображена тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/50 с ПЦК.

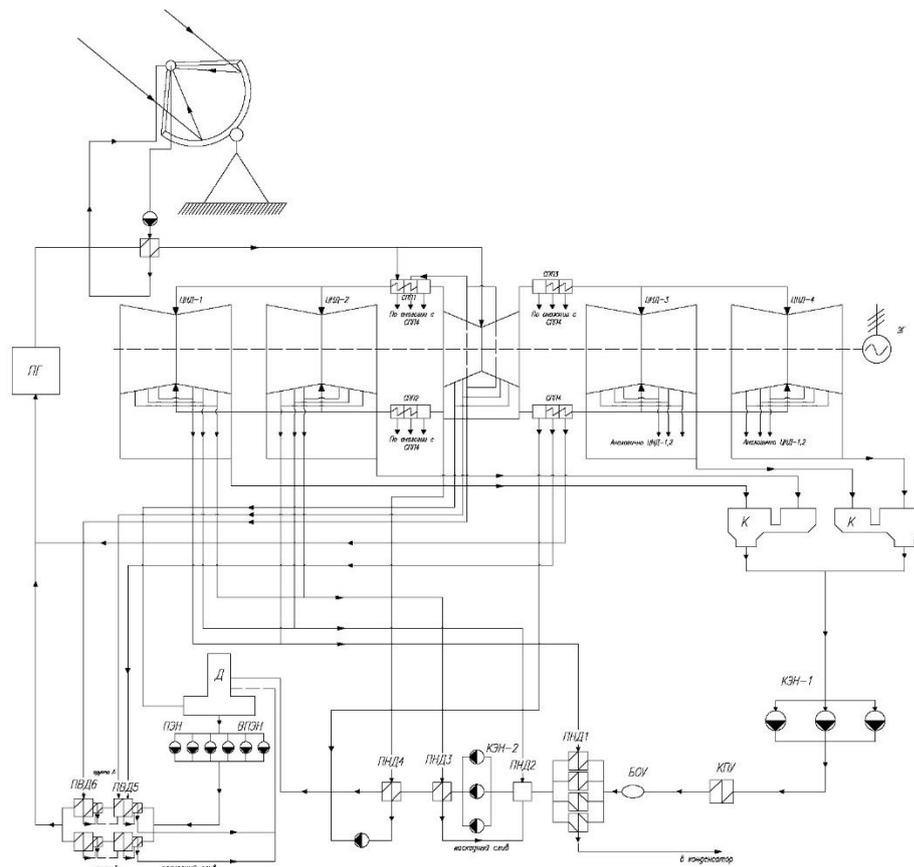


Рисунок 2 – Тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/50 с ПЦК [Источник: собственная разработка автора]

В модернизированной схеме принимаем лишь физическое увеличение цилиндров турбины, в то время как давление и температуру отборов оставляем, как и в схеме без модернизации. В схеме с ПЦК произошло изменение энтальпий всех отборов (таблица 3). Это связано с изменением начальных параметров пара.

Таблица 3 – Параметры отборов пара из турбины К-1200-6,8/50 [4]

№ отбора	Потребитель греющего пара	$p$ , МПа	$t$ , °С	$h$ , кДж/(кг · °С)	$h_{ПЦК}$ , кДж/(кг · °С)
-	ПП2	6,56	283,8	2769,23	2888,943
I	ПП1	2,6	226,1	2638,23	2737,233
	ПВД6				
II	ПВД5	1,94	207,6	2586,53	2690,725
III	Деаэратор	0,86	173,4	2481,57	2567,725
IV	ПНД4	0,58	157,7	2406,69	2510,417
	Сепаратор				
V	ПНД3	0,14	138,9	2751,07	2810,483
VI	ПНД2	0,053	82,8	2674,451	2665,93
VII	ПНД1	0,025	65	2497,16	2556,937

Термический КПД определяется по следующей формуле:

$$\eta_t = \frac{\bar{H}}{h_0 - h_{\text{ПВ9}}} \quad (5)$$

где  $\bar{H}$  – теплоперепад в турбине, кДж/(кг · °С);

$h_0$  – энтальпия с начальными параметрами пара кДж/(кг · °С);

$h_{\text{ПВ9}}$  – энтальпия питательной воды после последнего ПВД, принимаем 940,61 кДж/(кг · °С).

Электрическая мощность турбоустановки:

$$N_э = G_0 \cdot \bar{H} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (6)$$

где  $N_э$  – электрическая мощность турбины;

$\eta_m, \eta_g$  – механический КПД и КПД генератора.

Для технико-экономических расчетов принимаем: минимальные удельные капиталовложения для АЭС примем 4100 \$/кВт; минимальные удельные капиталовложения для ПЦК примем 2500 \$/кВт; КПД АЭС без модернизации 36%.

Чистая приведенная стоимость (NPV) будет рассчитываться по формуле:

$$NPV = - \sum_{t=1}^{t=T_{\text{стр}}} \frac{K_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=T_{\text{экс}}}^{t=T_{\text{пи}}} \frac{\Pi_t}{(1+r)^t} - \frac{C_{\text{ос}}^{\text{л}}}{(1+r)^{T_{\text{пи}}}} \quad (7)$$

где  $K_t$  – капиталовложения в год строительства  $t$ , млн.\$;

$\Pi_t$  – прибыль в год эксплуатации  $t$ , млн.\$;

$C_{\text{ос}}^{\text{л}}$  – ликвидная стоимость основных средств, принимаем 10% от полных капиталовложений, млн.\$;

$r$  – реальная ставка рефинансирования, принимаем 11%;

$T_{\text{стр}}$  – время строительства станции, принимаем 7 лет;

$T_{\text{экс}}$  – время начала эксплуатации станции, с 5 лет первый энергоблок;

$T_{\text{пи}}$  – время полезного использования, для АЭС 60 лет.

Изменения технико-экономических показателей тепловой схемы АЭС с реактором ВВЭР-1200 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты технико-экономических показателей [Источник: собственная разработка автора]

№	Параметр	Без модернизации	С модернизацией
1	Начальная температура пара, °С	284	310
2	Теплоперепад в турбине, кДж/(кг·°С)	677,777	737,128
3	Начальное давление пара, МПа	6,8	6,8
4	Энтальпия пара перед приходом на турбину, кДж/(кг·°С)	2769,23	2888,943
5	Теплоперепад в турбине, кДж/(кг·°С)	677,777	737,128
6	КПД тепловой схемы, %	36%	38%
7	Электрическая мощность турбины, МВт	1200	1305
8	Капиталовложения, млрд \$	10,291	10,606
9	Суммарные издержки, млн. \$/год	453,011	492,978
10	NPV, млн \$	1240	1390
11	Срок окупаемости, лет	25	24

### **Заключение**

Внедрение циркуляционного контура с ПЦК позволило увеличить технико-экономические параметры турбоустановки: термический КПД увеличился на 2%; электрическая мощность на один блок увеличилась на 105 МВт; срок окупаемости АЭС уменьшился на один год, при ставке рефинансирования в 11%.

Данный вариант модернизации может быть использован в странах с умеренным климатом, где количество солнечных часов в год составляет не менее 1800.

### **Литература**

1. Параболический солнечный концентратор Gaia PT-20 Shandong [Электронный ресурс] / Параболический солнечный концентратор Gaia PT-20 Shandong. – Режим доступа: <https://gaiasolar.en.made-in-china.com/product/QFaAtRIDVgYj/China-2021-Concentrated-Solar-Parabolic-Collector-for-Space-Heating.html> |. – Дата доступа: 11.04.2023.
2. СНБ 2.04.05-2000. Строительная климатология. Министерство архитектуры и строительство Республики Беларусь, Минск, 2001.
3. Ароян, О.С. Программа расчета параметров солнечного параболоцилиндрического концентратора // О.С. Ароян, С.П. Геруни / Ереван: НИИ радиофизики, 2005. – 4 с.
4. 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.