

УДК 621.311

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ АЭС

¹Ростунцова И.А., ²Шевченко Н.Ю.

¹ ФГБОУ ВПО Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов

² ФГБОУ ВПО Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО Волгоградский государственный технический университет, Россия, Камышин, e-mail: kti@kti.ru

Проведена разработка и оценка эффективности схем модернизации системы технического водоснабжения блоков АЭС. На большинстве АЭС с реактором ВВЭР-1000 охлаждение циркуляционной воды происходит только в пруду-охладителе. Сброс нагретых вод определяет тепловое воздействие атомных электростанций на экологию водных объектов, используемых для охлаждения циркуляционной воды. Для решения проблемы предотвращения теплового загрязнения водных ресурсов применяют дополнительные охладители иных типов: градирни и брызгательные бассейны. Проведено сравнение трех схем оборотного водоснабжения АЭС с реакторами ВВЭР-1000: стандартной схемы охлаждения циркуляционной воды с прудом – охладителем и схем с последовательным и параллельным включением градирни и пруда охладителя в системе охлаждения циркуляционной воды. Разработана методика оценки технико-экономической эффективности при усовершенствовании системы технического водоснабжения АЭС. Проведен экономический анализ целесообразности модернизации системы технического водоснабжения.

Ключевые слова: атомная электростанция, система технического водоснабжения, пруд-охладитель, градирня, последовательная схема, параллельная схема

EVALUATION OF SCHEMES MODERNIZATION OF THE SYSTEM OF TECHNICAL WATER SUPPLY OF NUCLEAR POWER PLANT

¹Rostovtseva I.A., ²Shevchenko N.Ju.

¹ FGBOU Saratov State Technical University, Saratov, Russia, Saratov

² Kamyshin Institute of Technology (branch) of state educational institution of higher professional Education Volgograd State Technical University, Russia, Kamyshin, e-mail: kti@kti.ru

The authors have developed a methodology to assess the effectiveness of schemes of modernization of the system of technical water supply unit nuclear power plant. On the majority of nuclear power plants with VVER-1000 reactor cooling water is circulating in the cooling pond. Reset hot water determines the thermal effect of nuclear power plants on the ecology of water bodies used for the cooling water circulation. To solve the problem of preventing thermal pollution of water resources used more other types of coolers: cooling towers and bryzgatelnnye pools. A comparison of the three circuits water recycling nuclear power plant with VVER-1000: standard cooling circulating water to the pond - cooler and circuits with serial and parallel connection of the cooling tower and the cooling pond cooling system circulating water. A method for evaluating the technical and economic efficiency in the improvement of the system of technical vodosnabzheniyaatomnoy power station. An economic analysis of the feasibility of upgrading the system of technical water supply.

Keywords: nuclear power plant, the system of technical water supply, cooling pond, cooling tower, series circuit, parallel circuit

Введение

В настоящее время на большинстве АЭС с реактором ВВЭР-1000 охлаждение циркуляционной воды происходит только в пруду-охладителе. Сброс нагретых вод определяет тепловое воздействие тепловых и атомных электростанций на экологию водных объектов, используемых для охлаждения циркуляционной воды. С другой стороны при увеличении нагрузки пруда-охладителя снижается качество охлаждения циркуляционной воды, что негативно отражается на работе основного оборудования в схеме АЭС [1]. Для решения проблемы предотвращения теплового загрязнения водных объектов и соблюдения норм на температуру охлаждения в цикле тепловой схе-

мы применяют дополнительные охладители иных типов: градирни, брызгательные установки или другие водные объекты. В большинстве случаев эти охладители используются для предварительного охлаждения части циркуляционной воды с последующим охлаждением всего количества в основном водоеме или водотоке.

Методика определения температуры воды охладителя

Эффективность работы охлаждающего устройства определяется температурой воды на выходе из него, стремящейся к минимальному значению. Температура циркуляционной воды на выходе из пруда-охладителя определяется:

$$T1в^n = Tнв + \delta t, \quad (1)$$

где, $Tнв$ – температура наружного воздуха °С; δt – поправка, определяемая по номограмме пруда-охладителя, используя исходные данные для расчетов, °С.

Температура на выходе из конденсатора:

$$T2в^n = T1в^n + \Delta t_{цв}, \quad (2)$$

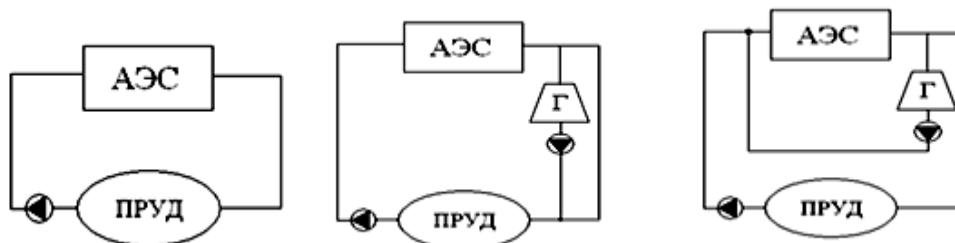
где $\Delta t_{цв}$ – нагрев циркуляционной воды в конденсаторе, °С.

Анализ схем охлаждения циркуляционной воды

На рис. 1 приведены три схемы охлаждения циркуляционной воды: в пруде охладите-

ле; в пруде охладителя и градирни при последовательном их включении; в пруде охладителя и градирни при параллельном их включении.

Принцип работы модернизированной схемы №2 (рис. 1 б) заключается в том, что часть циркуляционной воды в количестве $\alpha гр$) на выходе из конденсатора последовательно охлаждается в градирне и в пруде охладителя. После чего смешения потоков вода поступает в конденсатор турбины. При этом параметры циркуляционной воды на входе в пруд-охладитель будут ниже, тем самым уменьшая показатель Δt который прямопропорционально влияет на поправку δt .



а - схема №1

б - схема №2

в - схема №3

Рис. 1. Схемы технического водоснабжения при охлаждении циркуляционной воды: а – в пруде охладителя; б – в пруде охладителя и градирни при последовательном их включении; в – в пруде охладителя и градирни при параллельном их включении

В схеме №3 (рис. 1 в) главное отличие от предыдущей заключается в том, что точка смешения находится непосредственно перед конденсатором. Вода с градирни не проходит через пруд-охладитель, что позволяет при том же значении $f_{уд}$ существенно снизить общую площадь зеркала пруда-охладителя.

Для корректного сравнения схем следующие значения примем постоянными:

$q_r = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2/\text{сут})$ – плотность орошения в градирни; $f_{уд} = 1,6 \text{ м}^2/(\text{м}^3/\text{сут})$ – удельная плотность пруда-охладителя; $\Delta t_{цв} = 10 \text{ }^\circ\text{С}$; $\alpha_{гр} = 60\%$ от $G_{цв}$ – количество воды, проходящей через градирню.

Для схемы №1 по представленной выше методике определены температуры воды на входе и выходе из пруда охладителя в зависимости от температуры наружного воздуха. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры воды в схеме №1

Месяц	$Tнв, \text{С}$	$\delta t, \text{С}$	$T1в^n, \text{С}$	$T2в^n, \text{С}$
Апрель	8,2	8,8	17	27
Май	15,8	6,7	22,5	32,5
Июнь	20,5	5,2	25,7	35,7
Июль	22,5	5	27,5	37,5
Август	20,3	5,1	25,4	35,4
Сентябрь	14,2	6,5	20,7	30,7
Октябрь	6,5	9,2	15,7	25,7

Оценка эффективности схем с градирней

Оценка эффективности схем с градирней проводится по следующей методике: расчет начинается с определения параметров циркуляционной воды на выходе из градирни, затем считаются параметры в

точке смешения, определяется новое значение Δt и пересчитывается температура циркуляционной воды на выходе из пруда-охладителя:

1. Определяются параметры воды на выходе из градирни:

$$t_{1в}^{рп} = T_{1в} + 0,5 \cdot V_{ветра}, \quad (3)$$

где $T_{1в}$ – температура по номограмме градири, находится по начальным данным для расчета; $0,5 \cdot V_{ветра}$ – поправка на скорость ветра.

2. Рассчитаются параметры воды после точки смешения, на входе в пруд-охладитель. Для этого составим тепловой баланс точки смешения:

$$h_{1в}^{рп} \cdot \alpha + h_{2в}^{п} \cdot (\alpha - \alpha_{п}) = \alpha \cdot h_{см} = 0,6 \cdot h_{1в}^{рп} + 0,4 \cdot h_{2в}^{п} = 1 \cdot h_{см} \quad (4)$$

Значения энтальпии определяем по температуре и заданному давлению циркуляционной воды. По полученному $h_{см}$ и $P_{ц.в.}$ опре-

деляем температуру воды $t_{см}$ на входе в пруд-охладитель.

3. Для пруда-охладителя в каждом месяце рассчитывается новое значение нагрева воды в конденсаторе: $\Delta t' = t_{см} - t_{1в}^{п}$

4. Рассчитывается температура на выходе из пруда охладителя в каждом месяце для новых значений $\Delta t'$: $T_{1в} = t_{нв} + \delta t'$

Так как параметры воды на входе в градирию и сами градири одинаковые, то значения $T_{1в}^{рп}$ и $h_{1в}^{рп}$ для схем №2 и №3 будут одинаковыми.

В табл. 2 приведены параметры циркуляционной воды для схем №2 и №3 в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 2

Параметры воды для схем №2 и №3

Месяц	$T_{1в}^{п}$, С	$T_{см}$, С	$\Delta t'$, С	$\delta t'$, С	$T_{1в}$, С
Апрель	17	26,4	9,4	8,5	16,7
Май	22,5	30,48	8	5,5	21,3
Июнь	25,7	33	7,3	3,1	23,6
Июль	27,5	34,2	6,7	2,8	25,3
Август	25,4	32,8	7,4	3,7	24
Сентябрь	20,7	29,6	8,9	5,8	20
Октябрь	15,7	25,65	9,9	9,1	15,6

В табл. 3, 4 приведены параметры циркуляционной воды отдельно для схем №2 и №3 соответственно в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 3

Расчетные параметры схемы №2

Месяц	$T_{1в}$, С	$T_{1в}^{рп}$, С	$h_{1в}^{рп}$, кДж/кг	$h_{2в}^{п}$, кДж/кг	$h_{см}$, кДж/кг	$T_{см}$, С
Апрель	24,5	26	109,5	113,7	111,2	26,4
Май	27,7	29,1	122,5	136,7	128,2	30,48
Июнь	29,9	31,3	131,7	149,5	138,8	33
Июль	30,6	32	134,6	157,6	143,8	34,2
Август	29,9	31,1	130,9	148,8	138	32,8
Сентябрь	27,5	28,8	121,3	129,2	124,5	29,6
Октябрь	24,1	25,6	107,9	108,3	108	25,65

Таблица 4

Расчетные параметры схемы №3

Месяц	$T_{1в}^{рп}$, С	$h_{1в}^{рп}$, кДж/кг	$T_{1в}^{п}$, С	$h_{2в}^{п}$, кДж/кг	$h_{см}$, кДж/кг	$T_{см}$, С
Апрель	26	109,5	17	72	94,5	22,4
Май	29,1	122,5	22,5	95	111,6	26,5
Июнь	31,3	131,7	25,7	108,3	122,34	29
Июль	32	134,6	27,5	116	127,16	30,2
Август	31,1	130,9	25,4	107	121	28,8
Сентябрь	28,8	121,3	20,7	87,4	107,74	25,6
Октябрь	25,6	107,9	15,7	66,5	91,34	21,7

Определены параметры в конденсаторе для получившихся значений температуры циркуляционной воды. Для этого принят недогрев воды в конденсаторе до температуры насыщения греющего пара – $\Delta t_k = 5 \text{ С}$.

Температура насыщения в конденсаторе составит:

$$t_k = t_{1в} + \Delta t_k \quad (5)$$

Результаты расчета представлены в табл. 5 и на рис. 1.

Таблица 5

Температура насыщения в конденсаторе

Месяц	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
t_k , схема №1, °С	22	27,5	30,7	32,5	30,4	25,7	20,7
t_k , схема №2, °С	21,7	26,3	28,6	30,3	29	25	20,6
t_k , схема №3, °С	27,4	31,5	34	35,2	33,8	30,6	26,7

Как видно из табл. 5 и рис. 1 более глубокое охлаждение воды происходит в схеме № 2. Снижение температуры охлаждающей воды увеличивает вакуум в конден-

саторе паровой турбины, что способствует выработке дополнительной электрической мощности в последнем отсеке турбины.

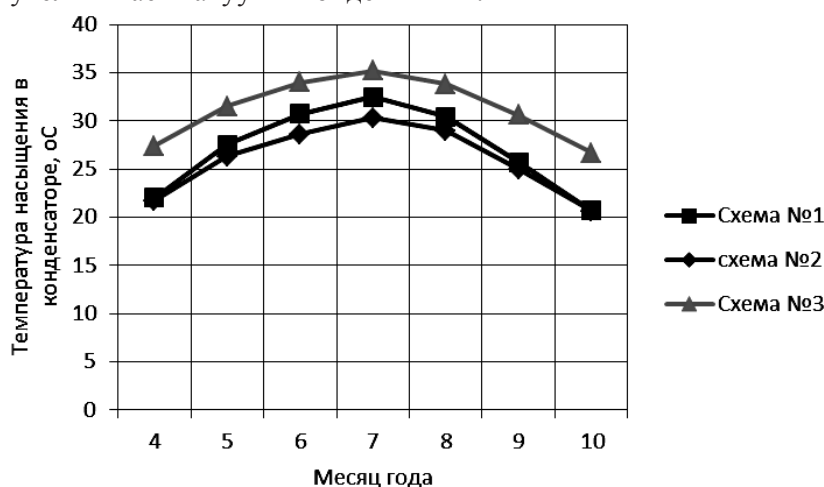


Рис. 1. Параметры насыщения пара в конденсаторе

Расчет мощности в последнем отсеке турбины проведен исходя из условия, что пар в последнем отсеке турбины влажный

со степенью сухости = 87,55. Результаты расчета мощности в последнем отсеке турбины представлены в табл. 6.

Таблица 6

Расход пара, энтальпии и электрическая мощность в последнем отсеке турбины

Месяц	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Расход пара, D	893,5	893,5	893,5	893,5	893,5	893,5	893,5
H_7 , кДж/кг	2388	2388	2388	2388	2388	2388	2388
H_k схема №1, кДж/кг	2236	2248	2254,5	2258,3	2254	2244	2233,5
H_k схема №2, кДж/кг	2235,7	2245,3	2250,1	2253,6	2251	2242,5	2233,2
H_k схема №3, кДж/кг	2247,5	2256,2	2261,5	2264	2259,7	2254,3	2246,2
N схема №1, кВт	135812	125090	119282,25	115887	119729	128664	138045,8
N схема №2, кВт	136080,05	127502,5	123213,65	120086,4	122409,5	130004,2	138313,8
N схема №3, кВт	125536,75	117763,3	113027,75	110794	114636,05	119460,9	126698,3

Оценивается прирост мощности в схеме №2 (как наиболее эффективной) по сравнению со схемой №1 по формуле: $\delta N = N_{\text{схема №2}} - N_{\text{схема №1}}$. Результаты представлены в табл. 7.

Таблица 7

Прирост электрической мощности в схеме модернизации

Прирост мощности, кВт/час	268,05	2412,45	3931,4	4199,45	2680,5	1340,25	268,05
Выработка эл. энер. за месяц, кВт	192996	1794863	2830608	3124391	1994292	964980	199429,2
Прибыль, млн. руб.	0,154397	1,43589	2,264486	2,499513	1,595434	0,771984	0,159543

Проведен экономический анализ целесообразности модернизации системы технического водоснабжения по схеме №2.

Для расчета используется формула для чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot a_t - K, \text{ млн.руб.}, \quad (6)$$

где K – капиталовложения, млн. руб.; T – срок модернизации, три года; срок полезного использования – двенадцать лет ($E_{\text{н}} = 0,12$).

Дисконтированные капиталовложения определяются по формуле:

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \cdot a_t; \quad (7)$$

R_t – доход от реализации электроэнергии; Z_t – затраты при эксплуатации, определяются по формуле: $Z_t = I_t - I_{\text{ам}}$, где I_t – затраты связанные с эксплуатацией градирни; $I_{\text{ам}}$ – амортизационные издержки, которые определяются: $I_{\text{ам}} = (1/\text{СПИ}) \cdot K$.

Результаты расчета представлены в табл. 8.

Таблица 8

Технико-экономические показатели модернизации технического водоснабжения по схеме №2

Шаг расчета	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Капиталовложения, млн. руб.	5	5	5												
Доход млн.руб.				8,881	9,071	10,19	10,63	10,78	10,81	10,85	10,85	10,85	10,85	10,85	10,85
Затраты млн. руб.				0,25	0,223	0,199	0,177	0,158	0,141	0,126	0,113	0,101	0,090	0,080	0,071
Накопленный ЧДД, млн. руб.	-0,025	-13,3	-18,	-0,26	-0,42	8,576	19,03	29,66	40,33	51,05	61,79	72,55	83,31	94,09	104,8

Графическое определение срока окупаемости представлено на рис. 2. Срок окупаемости схемы модернизации составляет 5 лет.

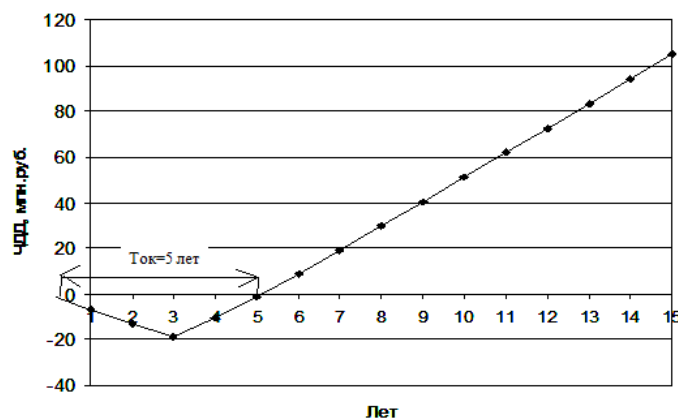


Рис. 2. Определение срока окупаемости при модернизации по схеме №2

Выводы

Произведена оценка эффективности схем оборотного водоснабжения АЭС с реакторами ВВЭР-1000: стандартной схемы охлаждения циркуляционной воды с прудом – охладителем и схем с последовательным и параллельным включением градирни и пруда охладителя в системе охлаждения циркуляционной воды. Доказана экономическая целесообразность модернизации системы технического водоснабжения по схеме последовательного включения пруда охладителя и градирни.

Список литературы

1. Аминов Р.З. АЭС с ВВЭР: режимы, характеристики, эффективность / Р.З. Аминов, В.А. Хрусталева, А.С. Духовенский, А.И. Осадчий / М.: Энергоатомиздат, 1990. 245 с.: ил.
2. Аркадьев В.А. Режимы работы турбоустановок АЭС / В.А. Аркадьев. М.: Энергоатомиздат, 1986. 219 с.:ил.
3. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гилли: Пер. с англ. В.Я. Сидорова, Е.В. Сидорова. М.: Мир, 1987. 272 с.: ил.
4. Белоконова А.Ф. Водно-химический режим тепловых электростанций / А.Ф. Белоконова. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.:ил.