

ВПЛИВ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОХОЛОДЖУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС

Галацан М.П., бакалавр Науковий керівник – доц. каф. «Атомні електростанції», д.т.н, Кравченко В.П.

УДК 621.311.25

В.П. Кравченко, М.П. V.P.Kravchenko,
Галацан. Влияние снижения M.P.Galatsan.
температуры охлаждающей The influence of
среды на эффективность temperature decrease of
работы энергоблока АЭС. В the coolant on an overall
работе рассмотрен вопрос performance of the NPP
влияния снижения unit. In work the question
температуры охлаждающей of influence of decrease in
среды на эффективность an ambient temperature on
работы энергоблока АЭС (на an overall performance of
примере 4-го энергоблока the power unit of the
Ровенской АЭС). Предложено atomic power station (on
в качестве охладителя an example of 4-th power
(охлаждающей среды) — unit of the Rovno NPP) is
раствор этиленгликоля. considered. It is offered as
Экономически доказана a cooler (the cooling
целесообразность environment) - a solution
использования данного of etilenglikol. The
раствора в системе expediency of use of this
циркуляционного solution in NPP cooling is
водоснабжения (СЦВ) АЭС. economically proved.

Пріоритетною задачею на АЕС є забезпечення безпеки і ефективності діючих енергоблоків з реактором ВВЕР. Одним з шляхів рішення цієї задачі є модернізація і удосконалення працюючого устаткування.

Розглянемо можливості підвищення ефективності атомних електростанцій за допомогою використання низьких температур навколишнього середовища [1].

До останнього часу основною перешкодою в зближенні низькотемпературної техніки і теплоенергетики було традиційне вживання води як єдиного можливого і незамінного робочого тіла на більшості електростанцій всіх видів.

Збільшення термічного ККД паросилового циклу може бути досягнуто, як відомо з термодинаміки, за інших рівних умов лише двома шляхами.

Перший з них – це підвищення температурного рівня тепла, що

підводиться, як в самому паровому циклі, так і за допомогою підключення «надбудов»: від МГД (магнітогазодинамічних генераторів) до газових турбін. Газотурбінний варіант виявився практично найбільш прийнятним|допустимим| і дозволив підняти термічний ККД| електростанції приблизно до 60 %.

Однак далі «рухатися вгору» стає все важче і дорожче, тим більше що по непорушних законах термодинаміки кожен градус підвищення температури дає все менший додатковий енергетичний ефект. У цій ситуації представляється доцільним йти по другому шляху підвищення ККД – розширити теплосиловий цикл «вниз». Тут за тими ж законами термодинаміки термічний ККД циклу зростає за інших рівних умов внаслідок його розширення «вниз» набагато швидше, ніж при русі «вгору».

Стосовно АЕС, використання низькотемпературних циклів можливо і доцільно на тих із них, які або розташовані в зонах із низькою температурою навколишнього середовища, або їх будівництво в таких зонах доцільно.

Важливо відзначити, що вибір варіанту низькотемпературного «хвоста» циклу АЕС ніяк не відобразиться на реакторній його частині, в якій будь-які нововведення вимагають ретельної і тривалої перевірки. Така «автономність» додаткового циклу пояснюється тим, що при одній і тій же потужності основного атомного енергоблоку потужність низькотемпературного циклу (а отже, і електростанції в цілому) змінюється лише внаслідок зміни температурного інтервалу його експлуатації. Тому параметри роботи «атомної» частини електростанції в різних умовах практично не залежать від режиму низькотемпературного «хвоста».

При однаковій використаній теплоті атомного реактора кількість тепла, що відводиться в навколишнє середовище в конденсаторі, буде тим менше, чим нижче температура конденсації пари. Таким чином, з позицій екології жодних спеціальних претензій до даного варіанту енергопостачання немає, навпаки, він лише покращує ситуацію і зменшує теплове забруднення.

При практичному використанні низьких температур навколишнього середовища в енергетиці необхідно рішати низку серйозних інженерних проблем.

Якщо залишити осторонь існуючий у таких ситуаціях консерватизм, то залишаються реальні труднощі, пов'язані з двома головними питаннями: вибором робочого тіла нового теплотилового циклу і організацією роботи обладнання в своєрідному змінному режимі, який диктується змінами температури навколишнього середовища. У їх рішенні може бути корисним і досвід холодильної техніки.

Метою цієї роботи є дослідження доцільності зниження температури конденсації на АЕС України на прикладі 4-го енергоблоку Рівненської АЕС, як самої північної АЕС України.

Для досягнення цієї мети, необхідно вирішити низку питань (задач), а саме:

розрахувати теплову схему турбоустановки (ТУ) 4-го блоку РАЕС К-1000-60/3000 при номінальному режимі роботи, та при різних значеннях тиску у конденсаторі;

на основі метеорологічних даних Рівненської області вибрати необхідний хладоносій;

визначити техніко-економічні показники енергоблоку та встановити, чи доцільно (ефективно) змінити звичайну воду у системі циркуляційного водопостачання на вибраний хладоносій.

Вибір нового охолоджувача для СЦВ АЕС

Оскільки низькі тиски у конденсаторі можливо отримати лише у найхолодніших місяцях року та на півночі країни, тобто тиск залежить від температури охолоджуючої води, то будемо враховувати період роботи енергоблоку у такому режимі з жовтня по березень включно (півроку).

При використанні води у якості охолоджуючої речовини є деякі обмеження по температурі. Зараз, відповідно інструкції по експлуатації ПТУ, температура охолоджуючої води після охолоджувача (градирні) тов2 не може бути менше 10-15 °С [2,3]. При низьких температурах можливо обмерзання басейну, градирні та каналів. При цьому температура пари у конденсаторі буде дорівнювати:

$$t_k = t_{ов2} + \Delta t_{конд} + \partial t = 15 + 10 + 3 = 28 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $P_k = P_s(t_k) = 4 \text{ кПа}$,

тов2 — температура води після охолодження у СЦВ, наприклад, у градирні, тов2=15 °С,

$\Delta t_{конд}$ — різниця температур технічної води на вході і виході з градирні, $\Delta t_{конд} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$,

∂t — температурний напір між парою та охолоджуючою водою у конденсаторі, $\partial t = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ [4].

Можливість використання низьких температур охолоджуючої води може бути досягнута за допомогою використання розчинів рідин з низькою температурою замерзання. У цій якості можливо розглянути наступні речовини: солі, етиленгліколь, спирти.

Як показує досвід використання цих речовин, солі мають великий корозійний вплив на метали, особливо на вуглецеві сталі, які саме використовуються у СЦВ. Спирти мають відносно велику вартість. Дуже сприятливим здається використання бутилового спирту, який має низьку летучість, тобто парціальний тиск бутилового спирту при одній і тій же температурі менший за парціальний тиск води (температура кипіння його значно вища за $t_{кип}$ води).

Порівняння вартості етиленгліколю та бутилового спирту показує перевагу першого ($C_{ет} = 6500 \text{ грн/т}$, $C_{бут} = 8100 \text{ грн/т}$ [5]). Дуже важливим питанням при виборі речовини є чи утворює вона азеотроп з водою, тобто розчин, киплячий при постійній температурі. Температура кипіння цього розчину зазвичай нижча за найнижчу температуру кипіння його компонентів.

Склад пари визначається довідковими даними. Виявилося, що етиленгліколь азеотроп з водою не утворює [6]. Бутиловий спирт з водою утворює азеотроп, тому його далі можна не розглядати.

Таким чином для подальшої роботи вибрано етиленгліколь. Однією з задач є вибір оптимальної концентрації етиленгліколю у водному розчині. В табл. 1 наведена залежність температури замерзання етиленгліколю від його масової концентрації у водному розчині [7].

Таблиця 1

Залежність температури замерзання етиленгліколю від концентрації (К) у воді.

tзам, °С	-3	-5	-8	-11	-14	-22
К, %	10	15	20	25	30	40

Для вибору необхідної концентрації етиленгліколю у водному розчині необхідні метеорологічні дані по Рівненській області, які представлені у табл. 2 [8].

Як бачимо з табл. 2, мінімальна температура повітря в Рівненській області становить $t_{пов\min} = -7,4$ °С у січні. Економічно обґрунтована величина для температури охолодженої води визначається як:

$$t_{ов2\min} = t_{м.терм} + 4,$$

де $t_{м.терм}$ — температура мокрого термометра, °С.

Таблиця 2.

Середньомісячні температури повітря у Рівненський обл., °С

вересень	жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень
13,2	6,9	0,2	-4,8	-7,4	-6,0	-1,2	7,0	14,4	18,3

Для забезпечення надійної експлуатації (уникнення можливого замерзання охолоджуючої рідини) у подальших розрахунках прийнято: $t_{м.терм} = t_{пов}$, звідси $t_{ов2\min} = 1$ °С.

Тоді при $t_{пов} \leq -3$ °С, температура пари у конденсаторі $t_k = t_{ов2\min} + 10 + 3 = 14$ °С.

Відповідно даним табл. 1, оптимальна концентрація етиленгліколю (з запасом) буде дорівнювати: $K = 15$ %. Визначимо витрати, потрібні для впровадження цього розчину у СЦВ.

Об'єм води у СЦВ становить $V_{СЦВ} = 88583$ м³ [9], тобто маса дорівнює:

$$m_{СЦВ} = 88583000 \text{ кг} = 88583 \text{ т.}$$

Враховуючи вибрану концентрацію, маса необхідного етиленгліколю визначається як:

$$m_{em} = m_{СЦВ} \cdot K = 88583 \cdot 0,15 = 13287,45 \text{ т.}$$

Враховуючи відносно велику масу потрібного етиленгліколю, слід зауважити що він використовується при виробництві досить великої кількості товарів і виробляється у великій кількості, тому це не може стати перепорою на шляху використання його в енергетиці.

Визначимо витрати на підживлення.

Оскільки основне охолодження у градирні відбувається за рахунок випарного охолодження, то приймаємо що втрати за рахунок випарення у градирні дорівнюють витраті пара у конденсаторі ($G \approx 3600$ т/г) [4].

Тоді кількість підживленої води у СЦВ дорівнює:

$$G_{H2O \text{ під}} = 3600 \text{ т/г} = 3600 \cdot 7000 = 2520000 \text{ т/р.}$$

Доля етиленгліколю у воді підживлення буде дорівнювати:

$$G_{\text{нід}}^{em} = \left(\frac{P_s^{em}}{P_{атм}} \right) \cdot K \cdot G^{H_2O \text{ нід}} = \left(\frac{7}{10^5} \right) \cdot 0,15 \cdot 2520000 = 26,46 \text{ т/р,}$$

де $P_{сет} = 7$ Па, — тиск насичення етиленгліколю при 20 °С,

$P_{атм} = 105$ Па, атмосферний тиск [10],

K — масова концентрація етиленгліколю у воді.

Треба відмітити, що взимку доля теплоти, яка відводиться за рахунок випарювання зменшується. Практично все тепло у градирні відводиться теплопровідністю та конвекцією. Тому втрати етиленгліколю будуть тільки влітку.

Результати розрахунку теплової схеми турбоустановки К-1000-60/3000 при різних тисках (температурах) у конденсаторі

Розрахунок теплової схеми ТУ був проведений за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Розрахунок ведеться для найхолодніших 6 місяців у Рівненській області. Для кожного місяця тиск у конденсаторі вибирається у відповідності з середньомісячною температурою повітря (див. табл. 2), за алгоритмом:

якщо $t_{пов} \leq -3$ °С, то $t_{ов2} = 1$ °С; тоді $t_{ов1} = t_{ов2} + 10 = 11$ °С, а $t_k = t_{ов1} + 3 = 14$ °С, $P_k = P_s(t_k) = 1,59$ кПа;

в інших випадках: $t_{ов2} = t_{пов} + 4$, $t_k = t_{ов2} + 10 + 3$; $P_k = P_s(t_k)$.

Впродовж трьох місяців табл. 2, температура повітря не перевищує -3 °С, отже тиск P_k буде однаковий для цих місяців.

Результати розрахунку ККД та електричної потужності N_e в залежності від тиску у конденсаторі наведено у табл. 3.

Таблиця 3.

Залежність ККД та електричної потужності (N_e) ТУ К-1000-60/3000 від кінцевого тиску (P_k)

Температура, тк, °С	14	15,8	17,2	24	29
Тиск Рк, кПа	1,59	1,79	1,96	3	4
ККД енергоблоку	0,3585	0,3544	0,3482	0,3405	0,3348
Потужність генератора, МВт	1095,1	1082,8	1059,9	1038,3	1016,1
Час роботи	грудень, січень, лютий	березень	листопад	жовтень	тов2=15 °С, (6-ть місяців)

Відповідно наведеним результатам можливо зробити висновок, що розглянута залежність лінійна, та зниження температури у конденсаторі на 1 °С відповідає підвищенню ККД на 0,0018 (0,18 %).

Розрахунок енерговиробітку блоку в залежності від зміни тиску у конденсаторі

Для вказаного періоду (6 місяців) енерговиробіток енергоблоку визначиться як:

$$\mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^6 N_{\mathcal{E},i} \cdot \tau_i, \text{ МВт}\cdot\text{г},$$

де τ_i — час роботи блоку на даній потужності в і-ому місяці, г,

$N_{\mathcal{E},i}$ — потужність на клеммах генератора в і-ому місяці, МВт.

У розрахунках прийнято середнє значення кількості діб у місяці 30.

При реальній роботі блоку (при обмеженні по $t_{\text{ов}}$) маємо:

при $t_{\text{пов}} < 10$ °С, $t_{\text{ов}2} = 15$ °С, тоді $R_k = 4$ кПа,

при $t_{\text{пов}} > 10$ °С, $t_{\text{ов}2} = t_{\text{пов}} + 4$.

Оскільки для розглянутих місяців $t_{\text{пов}} < 10$ °С, тоді R_k буде постійним, а значить і енерговиробіток буде однаковим у кожному місяці:

$$\mathcal{E}_{\text{real}} = 1016,1 \cdot 6 \cdot 30 \cdot 24 = 389552 \text{ МВт}\cdot\text{г}.$$

Результати обчислення енерговиробітку при втіленні розглянутої пропозиції зведено у табл. 4.

Таблиця 4.

Місячний енерговиробіток блоку в залежності від тиску в конденсаторі

Рк, кПа	1,59	1,79	1,96	3	4
Э, МВт·год.	788472	779616	763128	747576	4389552

Загальний енерговиробіток за розглянутий період буде дорівнювати:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^6 \mathcal{E}_i = 3 \cdot 788472 + 779616 + 763128 + 747576 = 4655736 \text{ МВт год.}$$

Різниця у енерговиробітку при використанні розчину етиленгліколю у СЦВ дорівнює:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\Sigma} - \mathcal{E}_{\text{real}} = 4655736 - 4389552 = 266184 \text{ МВт}\cdot\text{г}.$$

Економічні показники

Витрати на впровадження етиленгліколю у СЦВ дорівнюють:

$$B_{imp} = m_{em} \cdot C_{em} = 13287,45 \cdot 6500 = 86368425 \text{ грн},$$

де $C_{em}=6500$ грн/т — вартість етиленгліколю [5],
мет — маса необхідного етиленгліколю.

Витрати на підживлення етиленгліколю у СЦВ дорівнюють:

$$\text{Витрпід} = G_{підет} \cdot C_{ет} = 26,46 \cdot 6500 = 171990 \text{ грн/р.}$$

Доходи енергоблоку за 20 років (припустимо що це залишковий період експлуатації 4-го блоку РАЕС):

$$Д = 20 \Delta Э \cdot C_э = 20 \cdot 266184 \cdot 0,12 \cdot 1000 = 638841600 \text{ грн} = 638,8 \text{ млн. грн},$$

де $C_э$ — тариф на електроенергію, прийнято 12 коп/кВт · г.

Прибуток енергоблоку за 20 років:

$$П = Д - \Sigma \text{Витр} = 638841600 - (86368425 + 20 \cdot 171990) = 549033375 \text{ грн} \approx 549 \text{ млн. грн.}$$

Висновок

Зниження тиску (температури) у конденсаторі призводить до лінійного збільшення ефективності роботи енергоблоку, а саме: зниження температури у конденсаторі на 1 °С відповідає підвищенню ККД на 0,18 %.

Відповідно розрахункам, впровадження етиленгліколю у систему циркуляційного водопостачання надає прибуток 27,45 млн. гривень у рік на один енергоблок АЕС потужністю 1000 МВт;

Література

Бродянский В.М. Повышение эффективности атомных и геотермальных электростанций посредством использования низких температур окружающей среды // Теплоэнергетика. — 2003. — №3. — с. 36-41.

Методические указания по эксплуатации вентиляторных градирен. — М.: Служба передового опыта эксплуатации, ОРГРЭС, 1997.—32 с.

Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84).—М.: ЦИТП, 1989.—192 с.

Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции: Учебник для вузов. — М.: Высш. школа., —1984. — 304 с.

<http://doska.us/cgi-bin/do/read.cgi?c=97&m=6>

Гордон А., Форд Р. Спутник химика. — М.: Мир. — 1976. — 541 с.

<http://www.chillers.ru/bibl/allowances/mat/glicolfreezing.php>

Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. — М.: Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 360 с.

Заклучение по работе «Анализ работы системы циркуляционного водоснабжения энергоблока №4 Ровенской АЭС при стационарных и переходных режимах». Под ред. С. И. Панас, Львов, 2001. — 33 с.

Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: «Наука», 1972. — 720 с.

