

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВТОРОГО КОНТУРА АЭС С ВВЭР

О.О. Кардасевич, М.И. Брагарь. Перспективы удосконалення водно-хімічного режиму другого контуру АЕС із ВВЕР. Розглянуто перспективи організації нейтрально-окисного водного режиму в другому контурі АЕС із ВВЕР. Побудовано залежності показника концентрування і електропровідності від продувки і вологості пари. Показано область параметрів, що дозволяє підтримувати питому електропровідність $\chi=0,3$ мкСм/см при якісному використанні ступінчатого випаровування, зміною режимів продувки й технології сепарації пари.

О.А. Кардасевич, М.И. Брагарь. Перспективы совершенствования водно-химического режима второго контура АЭС с ВВЭР. Рассмотрены перспективы организации нейтрально-окислительного водного режима во втором контуре АЭС с ВВЭР. Построены зависимости степени концентрирования и электропроводности от продувки и влажности пара. Показана область параметров, позволяющая поддерживать удельную электропроводность $\chi=0,3$ мкСм/см при качественном использовании ступенчатого испарения, изменением режимов продувки и технологии сепарации пара.

О.А. Kardasevych, M.I. Bragar. Prospects of organizing the water chemistry of the secondary coolant circuit of the nuclear power station with WWPR. Prospects of organising a neutral-oxidizing water mode in the secondary coolant circuit of the atomic power station with WWPR are considered. Dependences of concentration and conductivity degree upon the purge and humidity of steam are constructed. The area of the parameters is shown, allowing to support $\chi=0,3$ mkSm/sm at qualitative use of step evaporation, by changing the purge modes and steam separation technology.

Эксплуатационная надежность работы блоков АЭС ввиду больших единичных мощностей и особых требований к безопасности ее работы является одной из ключевых задач организации ее эксплуатации. Несмотря на значительный срок, на протяжении которого эксплуатируются АЭС, актуальным остается вопрос организации их водно-химических режимов (ВХР), в т.ч. и ВХР второго контура. Нормативные документы по ведению водного режима АЭС на Украине пересматривались только после 2000 г. три раза [1]. Это отражает, с одной стороны, уровень ответственности ВХР за обеспечение безопасности, а с другой стороны проявлениями коррозионных повреждений оборудования.

При организации ВХР второго контура АЭС вначале не ожидалось никаких проблем, поскольку в традиционной энергетике параметры теплоносителя во втором контуре были давно освоены, и вопросы длительной и надежной эксплуатации установок с такими параметрами и их ВХР практически были решены. Но уже первые годы эксплуатации АЭС показали, что для них не подходят стандартные подходы к ВХР, отработанные в традиционной энергетике. Казалось бы решение просто: повысить качество теплоносителя до максимально возможного уровня, уже достигнутого для блоков ТЭС на сверхкритические параметры, и тогда все проблемы будут сняты. Конечно, это удорожает эксплуатацию АЭС, но надежность и безопасность важнее. Поэтому все существующие энергоблоки АЭС имеют качество теплоносителя на уровне блоков сверхкритических параметров, чем практически снята проблема щелочно-земельных отложений как в конденсатно-питательном тракте, так и в парогенераторах [2]. Однако решить проблему предотвращения коррозии, в т.ч. коррозии парогенераторных трубок, а также миграции и последующего накопления и отложений этих продуктов коррозии в парогенераторе, фактически не удалось.

Таким образом, проблема дальнейшего совершенствования водного режима второго контура АЭС с ВВЭР в первую очередь связана с предотвращением коррозии. Основные усилия по снижению интенсивности коррозии свелись к выбору более стойких конструкционных материалов и корректирующих реагентов, главным образом, аминов гидразина, морфолина, этаноламина и др., которые смогли бы предотвратить указанные процессы [1]. Практически отсутствует поиск других подходов, например, существенного изменения режимных и конструктивных параметров парогенераторов. В то же время имеется убедительный опыт традиционной энергетики, где для блоков сверхкритических параметров при решении этой же задачи и при использовании гораздо менее стойких в отношении коррозии конструкционных

материалов обоснован успешный нейтрально-окислительный ВХР (НКВР) [3, 4]. Главные преимущества его в том, что совершенно не увеличивается содержание примесей в теплоносителе, не осложняется работа блочной обессоливающей установки (БОУ), и в то же время практически решаются вопросы коррозии. Считалось, что для второго контура АЭС НКВР бесперспективен из-за очень жестких условий реализации. Главное из них — снижение удельной электропроводности теплоносителя до минимально возможных значений, менее $0,3 \text{ мкСм/см}$, на всех участках тепловой схемы. Вследствие столь низкой электропроводности в воде отсутствуют кислые и щелочные примеси, которые могли бы разрушить защитную пленку на поверхности металла труб. И если ее создать, то коррозионный процесс затормаживается. При традиционных подходах к организации процессов кипения в парогенераторе АЭС, с минимальной продувкой парогенераторной воды и всевозможными мерами по улучшению качества пара, для парогенераторной воды, в которой примеси концентрируются, такие значения удельной электропроводности безусловно недостижимы, поэтому этот режим вычеркнут из перспектив совершенствования ВХР второго контура АЭС.

Далее приводятся расчетные данные, которые опровергают утвердившееся мнение о бесперспективности НКВР для вторых контуров АЭС. Расчет удельной электропроводности парогенераторной воды выполнен для различных сочетаний ее продувки и влажности пара. При этом сепарация влаги в парогенераторе организуется таким образом, что сепарат не возвращается под уровень воды в парогенераторе, а выводится также, как и продувка (рис. 1).

Главная особенность таких конструкторских решений — отказ от всех принимаемых в настоящее время мер по снижению влажности образующегося в парогенераторе пара, поскольку вместе с влагой пара уносятся и некоторые примеси, особенно соединения Na, вносящие наибольший вклад в электропроводность парогенераторной воды, что значительно снизит их концентрирование в ней.

Возможен также отказ от сепарации пара в парогенераторе с организацией сепарации в выносном сепараторе (рис. 2), как это делается в существующих сепараторах после цилиндра высокого давления [1].

Такие подходы к сепарации пара позволяют более полно использовать объем парогенератора, максимально повысить уровень воды, и развить поверхность теплообмена по высоте, а значит улучшить циркуляцию парогенераторной воды, повысить эффективность теплообмена, снизить габариты парогенератора в целом.

Естественно, что количество воды, выводимой с продувкой и сепаратором на спецводоочистку (СВО5), будет значительно выше, чем в существующих схемах

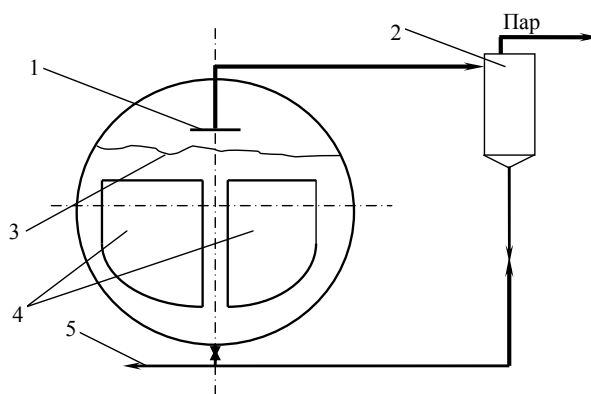


Рис.2. Схема работы парогенератора с выносным сепаратором: 1 — пароотборные устройства; 2 — сепаратор; 3 — уровень воды в парогенераторе; 4 — греющие секции; 5 — отвод воды на спецводоочистку

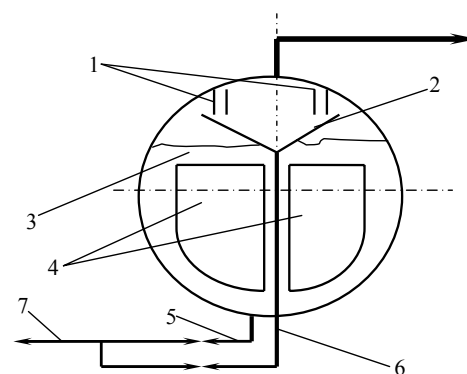


Рис. 1. Схема сепарации пара в парогенераторе: 1 — сепарационные устройства; 2 — сборник сепарата; 3 — уровень воды в парогенераторе; 4 — греющие секции; 5 — продувка; 6 — отвод сепарата; 7 — отвод воды на спецводоочистку

парогенератора, но концентрация примесей в этих потоках будет не выше, чем в конденсате перед БОУ, и, таким образом, появляется возможность использовать и на СВО5 фильтры смешанного действия (ФСД) с высокими скоростями обработки воды [5] и в целом сохранить или даже уменьшить габариты оборудования на СВО5.

При расчете удельной электропроводности парогенераторной воды вначале вычисляется степень концентрирования тех примесей, которые не претерпевают изменений в котловой воде [1],

$$Z = \frac{C_{\text{пр}}}{C_{\text{жв}}} = \frac{(1+p)}{K_c + \omega + p}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{жв}}$ — соответственно концентрация примесей в продувочной и парогенераторной воде;
 p — доля продувки;
 K_c — истинный коэффициент распределения примесей между паром и водой;
 ω — влажность пара.

Затем вычисляется степень концентрирования соединений кальция

$$Z_{\text{Ca}} = \frac{Z}{1 + \frac{1 + 1,310^{-6} A q^2 Z}{D_{\text{жв}}}}, \quad (2)$$

где Z — степень концентрирования примесей, не претерпевающих изменений в парогенераторной воде, рассчитанная по формуле (1);

A — площадь поверхности нагрева парогенератора, м^2 ;

q — средняя плотность теплового потока в парогенераторе, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$D_{\text{жв}}$ — расход питательной воды.

Степень концентрирования железа [1]

$$Z_{\text{Fe}} = Z \left(1 + \frac{A(j_k \eta_k - j_o)}{D_{\text{жв}} C_{\text{жв}}} \right), \quad (3)$$

где j_k — скорость коррозии нержавеющей стали, $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{ч})$;

η_k — доля продуктов коррозии, переходящая в раствор;

j_o — скорость отложений продуктов коррозии, $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{ч})$;

$C_{\text{жв}}$ — концентрация железа в питательной воде;

Поскольку скорость отложения железа j_o является функцией концентрации железа $C_{\text{жв}}$ в питательной воде, то уравнение (3) решалось методом итераций.

Результаты расчетов по соотношениям (1), (3) для парогенераторов ВВЭР-1000 и состава вод, примерно соответствующих р. Днепр, иллюстрируются графиками (рис. 3, 4).

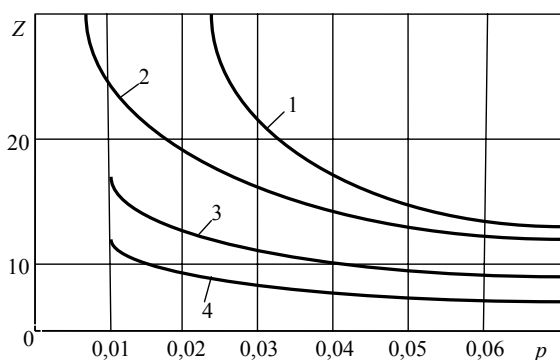


Рис. 3. Зависимость степени концентрирования примесей Z , не претерпевающих изменений в парогенераторной воде от величины продувки P и влажности пара $\omega=0,01$ (1); $0,03$ (2); $0,05$ (3); $0,07$ (4)

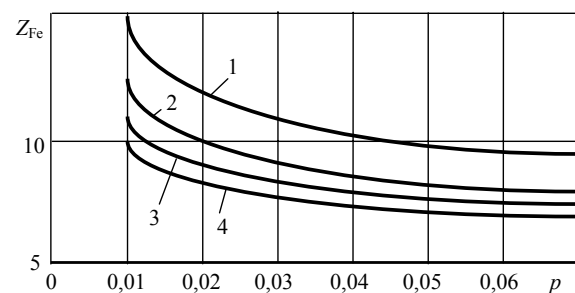


Рис. 4. Зависимость степени концентрирования Fe в парогенераторной воде от величины продувки при $\omega=0,01$ (1); $0,03$ (2); $0,05$ (3); $0,07$ (4)

Расчет по (2) подтвердил известный факт, что примеси Са, если они попадут в парогенератор, практически полностью откладываются, и $Z_{\text{Ca}} \approx 0$.

Как видно из графика (см. рисунок 3) примеси, наиболее влияющие на удельную электропроводность, характеризуются наибольшей степенью концентрирования, что

предопределило, как уже отмечалось, мнение о невозможности обеспечить требования по качеству парогенераторной воды НКВР. В то же время существуют области значения параметров, где такое концентрирование не столь значительно.

Приведены результаты расчета удельной электропроводности парогенераторной воды χ (мкСм/см), для двух значений качества конденсата $\chi_{\text{БОУ}}$ после блочной обессоливающей установки (см. таблицу).

В области реально возможных значений продувки и влажности пара достичь требований НКВР по удельной электропроводности парогенераторной воды $\chi=0,3$ мкСм/см возможно только при очень жестком ограничении удельной электропроводности конденсата после БОУ — $\chi_{\text{БОУ}} \leq 0,1$ мкСм/см, т.к. при $\chi_{\text{БОУ}} > 0,1$ мкСм/см задача становится практически неразрешимой. Вместе с тем, как свидетельствуют расчеты, при качественно выполненном ступенчатом испарении в парогенераторе возможно ослабление влияния этого параметра.

Удельная электропроводность парогенераторной воды

Влажность пара ω	Качество конденсата $\chi_{\text{БОУ}}$, мкСм/см	Продувка p			
		0,01	0,03	0,05	0,07
		Удельная электропроводность парогенераторной воды χ , мкСм/см			
0,01	0,1	1,22	0,65	0,46	0,36
	0,2	2,92	1,63	1,18	0,94
0,03	0,1	0,64	0,45	0,36	0,30
	0,2	1,64	1,17	0,92	0,78
0,05	0,1	0,44	0,35	0,30	0,26
	0,2	1,14	0,91	0,77	0,67
0,07	0,1	0,35	0,29	0,26	0,23
	0,2	0,89	0,74	0,63	0,59

Примеси меди, как свидетельствуют предварительные расчеты, концентрируются в парогенераторной воде также незначительно, кроме того, если корректно организовать ступенчатое испарение и вынести солевой отсек в область минимальных тепловых нагрузок, то вероятность отложений меди на поверхностях нагрева парогенератора резко снизится, а, следовательно, исчезнет и опасность подшламовой коррозии.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о практической возможности реализации весьма эффективного нейтрально-окислительного водного режима во втором контуре АЭС с ВВЭР, выполнив изменения режимов продувки, конструкции парогенератора, технологии и систем сепарации пара.

Важное значение приобретает корректная организация ступенчатого испарения, а также жесткое нормирование качества конденсата, $\chi_{\text{БОУ}} \leq 0,1$ мкСм/см.

Литература

1. Кардасевич, О.О. Водні режими теплових и атомних електростанцій: навч. посіб. / О.О. Кардасевич. — Одесса: Наука і техніка, 2005. — 129 с.
2. Воронов, В.Н. Химико-технологические режимы АЭС с водо-водяним энергетическим реактором / В.Н. Воронов. — М.: Издательство МЭИ, 2006. — 360 с.
3. Шицман, М.Е. Нейтрально-окислительный водный режим на энергоблоках СКД / М.Е. Шицман. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 137 с.
4. Шицман, М.Е. Кислородная пассивация контуров естественной циркуляции барабанных котлов СВД при использовании глубокообессоленной питательной воды и применение впрыска котловой воды в парохладителе / М.Е. Шицман // Журн. энергосбережение и водоподготовка. — 1999. — № 4. — С. 15 — 22.
5. Белоконова, А.Ф. Водно-химические режимы тепловых электростанций: / А.Ф.Белоконова. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.

Рецензент канд. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Кишневський В.А. Поступила в редакцию 24 июня 2009 г.