

УДК 621.311.226:544.313.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-77-85

Водно-химические режимы системы охлаждения электрогенераторов

Т.И. Петрова

На некоторых тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанциях для охлаждения обмоток статоров электрогенераторов используется вода, а основным конструкционным материалом для обмоток статора является медь. В процессе эксплуатации таких систем охлаждения возникают проблемы, связанные с коррозией меди и образованием отложений на внутренних поверхностях каналов охлаждения обмоток статоров. Одна из причин возникновения коррозии — качество охлаждающей воды, циркулирующей в трубках. Рассмотрены основные ступени процесса коррозии и образования отложений: окисление поверхности меди с образованием ионов меди, образование оксидов на поверхности металла, переход части оксидов с поверхности металла в воду, перенос оксидов с одной части поверхности металла на другую. Проанализированы четыре основных водно-химических режима (ВХР) систем охлаждения статоров и роторов, разработанных Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВП). В основе указанных ВХР лежит использование кислорода в низких ($20\ldots50 \text{ мкг}/\text{дм}^3$) и высоких ($2000 \text{ мкг}/\text{дм}^3$) концентрациях. Приведены основные нормируемые и контролируемые показатели качества воды систем водяного охлаждения электрогенераторов для разработанных МАСВП ВХР. Помимо ВХР, описанных в техническом документе МАСВП, представлены данные о преимуществах использования восстановителей для коррекции качества охлаждающей воды, например, водорода в концентрациях $30\ldots60 \text{ мкг}/\text{дм}^3$.

Ключевые слова: статоры электрогенераторов, водяное охлаждение, водно-химический режим, коррозия, отложения, качество воды.

Для цитирования: Петрова Т.И. Водно-химические режимы системы охлаждения электрогенераторов // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 77—85. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-77-85.

Water Chemistries of an Electrical Generator Cooling System

Т.И. Петрова

At some thermal and nuclear power plants, water is used for cooling the electric generator stator windings with copper used as their main structural material. During operation of such cooling systems, certain problems are encountered as a consequence of copper corrosion and deposits formed on the inner surfaces of stator winding cooling channels. Inadequate quality of water circulating in the tubes is one of the factors causing the corrosion to occur. The article outlines the main stages of the corrosion and deposit formation processes: copper surface oxidation with formation of copper ions, formation of oxides on the metal surface, partial transfer of oxides from the metal surface into water, and carryover of oxides from one metal surface area to another. Four basic water chemistries for electric generator cooling water systems developed by the International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) are discussed. These water chemistries are based on using low-oxygen ($20\ldots50 \text{ \mu g}/\text{dm}^3$) and high-oxygen ($2000 \text{ \mu g}/\text{dm}^3$) treatments. The article gives the basic standardized and monitored indicators characterizing the water quality in electric generator cooling systems for the water chemistries developed by the IAPWS. Apart from the water chemistries described in the IAPWS technical document, the article presents data on the advantages of using reducing agents for cooling water treatment, e.g., hydrogen in concentrations ranging from 30 to $60 \text{ \mu g}/\text{dm}^3$.

Key words: electric generator stators, water cooling, water chemistry, corrosion, deposits, water quality.

For citation: Petrova T.I. Water Chemistries of an Electrical Generator Cooling System. Bulletin of MPEI. 2023;1:77—85. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-77-85.

Основные положения

На тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанциях для охлаждения обмоток статоров электрогенераторов паровых турбин в настоящее время используют две различных системы: водородную и водянную. Первая система с водяным охлаждением обмоток электрогенератора мощностью 30 МВт была введена в Англии в 1956 г. По зарубежным данным на сегодняшний день в мире насчитывается более 1600 электростанций (без учёта России и Китая) — это около 2000 электрогенераторов, на которых установлены системы с водяным охлаждением. Из этих 2000 электрогенераторов около

80 имеют водяное охлаждение не только статоров, но и роторов. Некоторые из электрогенераторов с водяным охлаждением успешно эксплуатируются более 250000 ч [1]. Отмечается, что использование водяного охлаждения обмоток статоров и роторов электрогенераторов по сравнению с водородным охлаждением позволяет уменьшить превышения температуры обмоток и обеспечить высокие эксплуатационные показатели, устойчивость, маневренность в работе, расширение диапазона допустимых нагрузок, запас мощности по нагреву, а также безопасность работы.

Обмотки статора представляют собой полые трубы с внутренним диаметром примерно 3 мм. Основным

конструкционным материалом является медь высокой степени чистоты (больше 99%). В некоторых случаях для изготовления обмоток электрогенераторов берут нержавеющую сталь. Охлаждающая вода циркулирует внутри этих трубок. В первые годы эксплуатации электрогенераторов с водяным охлаждением (1960 — 1965 гг.) качеству воды, использовавшейся в системах, практически не уделяли внимания. Однако отмечали, что вся система, в которой шло охлаждение воды после прохождения её через обмотки электрогенератора, во избежание загрязнения воды продуктами коррозии железа, должна быть изготовлена из легированных сталей. В процессе эксплуатации систем с водяным охлаждением установлено, что качество воды — один из основных факторов надёжности работы ТЭС, и в подобных системах следует использовать обессоленную воду [2, 3]. Таким образом, к качеству воды, применяемой для охлаждения обмоток электрогенераторов, предъявляют высокие требования: одно из них — сведение к минимуму скорости коррозии меди (если обмотки статора из неё изготовлены).

По данным эксплуатации на некоторых ТЭС в результате коррозии медных обмоток статора концентрация меди в охлаждающей воде достигает 1000 мкг/дм³. Вследствие неправильной организации водно-химического режима (ВХР) и использования воды несоответствующего качества появляются следующие проблемы: коррозия медных проводников, образование продуктов коррозии меди, отложение их на стенках полых проводников и, как следствие, частичная или полная закупорка проходных сечений (рис. 1) [4]. Это может привести к серьезным последствиям: от незначительного падения давления в системе охлаждения до разрушения системы из-за частичного расплавления стержня статора, поэтому Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВП) в 2019 г. были разработаны нормы качества воды системы охлаждения электрогенераторов [5]. В них рассмотрены вопросы, связанные с причинами возникновения коррозионных процессов при использовании медных про-



Рис. 1. Образование отложений продуктов коррозии меди на внутренней поверхности медных обмоток статоров [4]

водников, образования отложений, способов удаления отложений; требования к качеству воды; приведены основные контролируемые показатели и режим контроля качества воды

Причины развития коррозии медных обмоток статоров

Известно, что в воде, не содержащей кислорода, коррозия меди не происходит, но в присутствии даже незначительных концентраций кислорода ее процессы интенсифицируются (рис. 2) [6].

Коррозия меди зависит не только от концентрации кислорода, но и от pH: из данных рис. 3 следует, что с увеличением pH скорость коррозии меди уменьшается [3, 4].

Коррозию медных проводников можно рассматривать как окислительно-восстановительный процесс, протекание которого зависит от наличия в рабочей среде окислителей или восстановителей. Продукты, образующиеся при коррозии, в большинстве своем — слабые электролиты, поведение которых зависит от pH среды. Таким образом, основными физико-химически-

Скорость коррозии, г/(м²·сут)

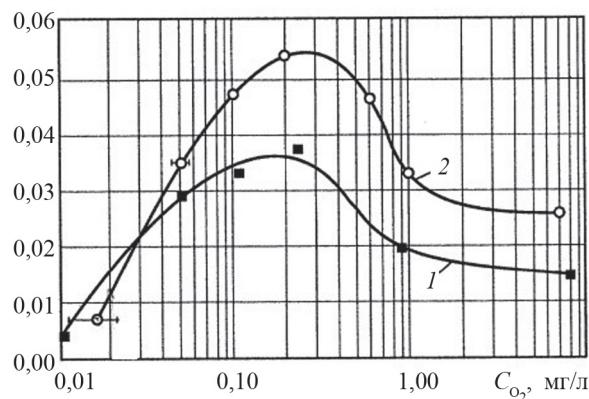


Рис. 2. Влияние концентрации кислорода на скорость коррозии меди:

1 — pH = 7,0 ± 0,02, t = 20 °C ; 2 — pH = 6,5...7,0, t = 40 °C

Скорость коррозии меди (относительная величина)

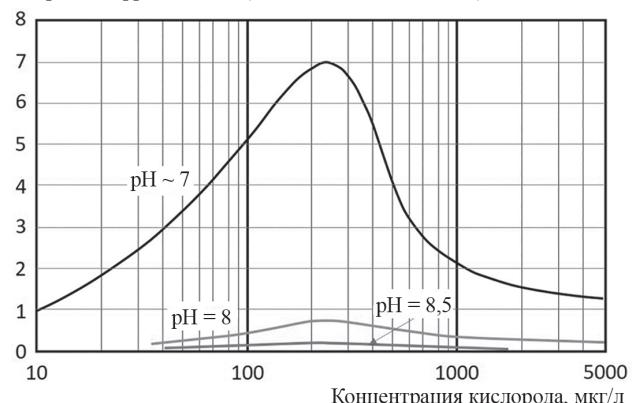


Рис. 3. Влияние концентрации кислорода на скорость коррозии меди при различных значениях pH [4]

ми параметрами, позволяющими определять способность среды к коррозионному воздействию на металл, являются pH и окислительно-восстановительный потенциал системы (ОВП). Для оценки вероятности протекания коррозионных процессов и состава продуктов коррозии, в том числе, образующихся на поверхности металла, использована диаграмма «рН—ОВП», называемая диаграммой Пурбэ [7].

Диаграмма Пурбэ определяет область существования термодинамически устойчивых соединений в зависимости от pH среды и ОВП. На рисунке 4 дана диаграмма Пурбэ для соединений меди при температуре 25 °C [8].

Из диаграммы рис. 4 следует, что существует определённая взаимосвязь между ОВП, pH и формами существования меди. Так, при ОВП больше 0,1 В и pH меньше 9 медь находится в виде ионов Cu^+ или Cu^{2+} , а при больших значениях pH — в виде оксидов Cu_2O и CuO . При значениях ОВП ниже 0,0 В, т. е. в восстановительной среде, и pH больше 7 медь находится в виде Cu (металла). При одновременном повышении ОВП и снижении pH возможно образование ионов одновалентной и двухвалентной меди. Появление аммиака в системе (рис. 5) в концентрации 10^{-4} моль/кг ($1,7 \text{ мг}/\text{дм}^3$) ведет к образованию весьма устойчивых комплексных ионов $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$ в области pH = 8...12 и потенциалов от $-0,1$ до $+0,2$ В. По мере повышения концентрации аммиака и потенциалов область существования комплексных ионов постепенно расширя-

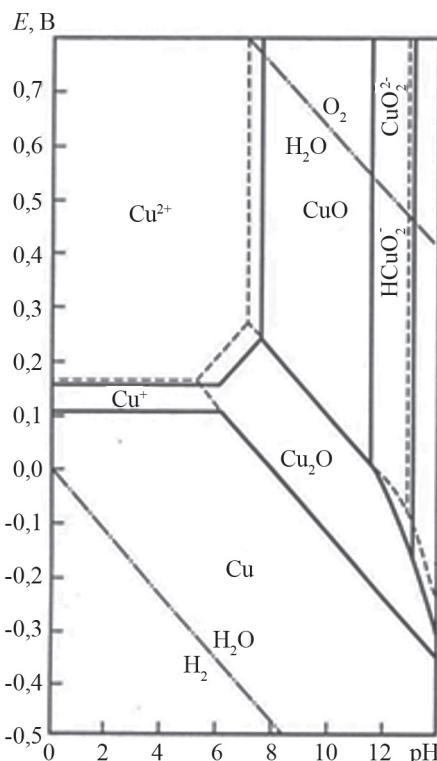


Рис. 4. Диаграммы состояний для соединений меди при температуре 25 °C [8]

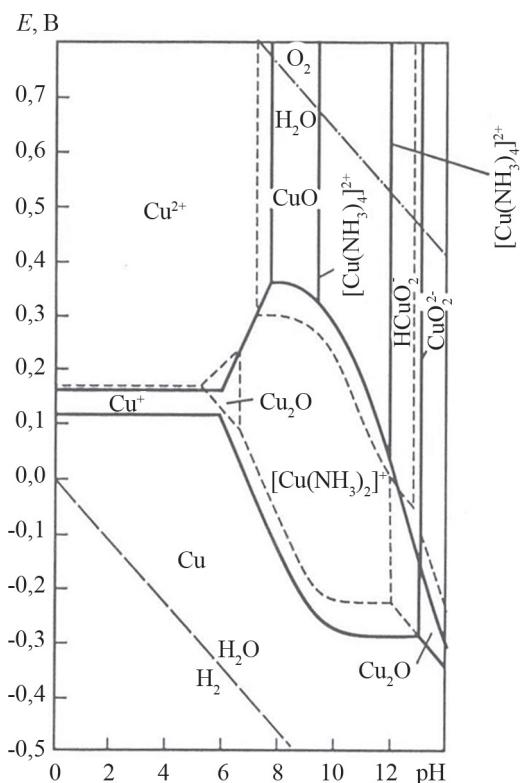


Рис. 5. Диаграмма Пурбэ для системы вода – медь – аммиак 10^{-4} моль/дм³ [9]

ется, захватывая также и двухвалентную медь с образованием комплексных ионов $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$. Однако, возникновение комплексного иона возможно лишь при концентрации аммиака $\geq 10^{-2}$ моль/кг ($170 \text{ мг}/\text{дм}^3$) и в области потенциалов выше $+0,3$ В [9].

Аммиак сам по себе не способен вызывать коррозию меди и ее сплавов, а лишь интенсифицирует этот процесс. Причиной коррозии может быть только наличие в воде каких-либо деполяризаторов (большей частью — кислорода) с положительным значением потенциалов. Это положение демонстрирует график зависимости скорости коррозии меди от концентрации кислорода при различных концентрациях аммиака (рис. 6).

В результате взаимодействия металлической меди с водой, содержащей кислород, образуются ионы Cu^+ или Cu^{2+} , переходящие в раствор. Процесс приводит к тому, что на границе раздела металл – вода образуется насыщенный раствор, содержащий ионы Cu^+ или Cu^{2+} , в результате чего формируется твёрдая фаза, состоящая из оксидов и гидроксидов меди на поверхности металла. Механизм образования отложений на внутренней поверхности проводников представлен стадиями [4]:

- 1) окисления поверхности меди;
- 2) образования оксидов на поверхности меди;
- 3) поступления оксидов с поверхности металла в воду;
- 4) переноса оксидов с потоком воды и образования отложений на других участках.

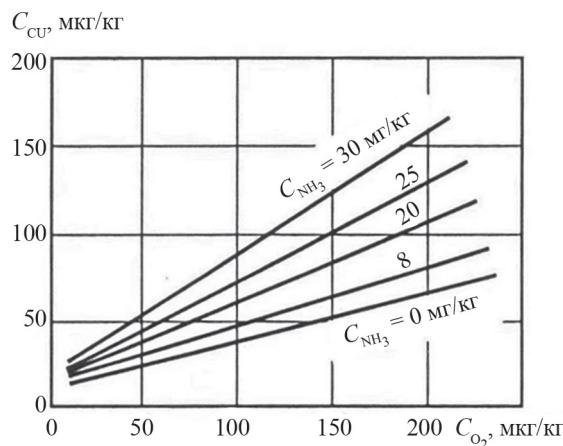


Рис. 6. Влияние концентрации кислорода на скорость коррозии меди при различных концентрациях аммиака

Если процессы, соответствующие первой и второй стадиям изучены хорошо, а для третьей стадии имеется достаточно большое количество экспериментальных данных, то процессы, присущие четвертой стадии, практически не изучены.

Поступление оксидов меди с поверхности оксидного слоя в воду (стадия 3) опишем следующим уравнением:

$$dm/dt = K(C_n - C_p),$$

где dm/dt — количество оксидов, переходящих в воду с поверхности в единицу времени; K — коэффициент массопереноса; C_n , C_p — концентрации меди непосредственно у поверхности металла и в воде.

Вынос меди с поверхности металла в значительной степени зависит от состава оксидной пленки, образующейся на поверхности, т. е. от растворимости соединений, из которых состоит оксидный слой. В зависимости от концентрации кислорода в воде оксидная пленка состоит из Cu_2O или CuO , растворимость которых различна. На рисунке 7 изображены кривые растворимости Cu_2O и CuO в зависимости от pH при температурах 50 и 100 °C [4], из которых следует, что при значениях pH меньше 9 растворимость Cu_2O значительно меньше, чем CuO . Следовательно, вынос меди с поверхности проводников будет меньше, если она покрыта слоем Cu_2O .

Таким образом, при выборе водно-химического режима систем охлаждения электрогенераторов следует учитывать присутствие в воде кислорода и его концентрацию, значение pH, а также полное отсутствие в воде аммиака.

Отметим, что ВХР системы охлаждения электрогенераторов — не единственная причина образования отложений в системе водного охлаждения электрогенераторов: на этот процесс влияют и иные факторы, например, конструкционные решения, режим работы и др. Выше отмечалось, что оксиды меди смываются потоком воды с одной части проводника и переносят-

ся на другую. Этот процесс зависит от многих факторов: скорости и турбулентности потока, температуры, геометрических параметров. Так, скорость коррозии меди увеличивается с повышением скорости движения воды при постоянной концентрации кислорода. Рост концентрации кислорода ведет к резкому повышению скорости коррозии при одной и той же скорости потока (рис. 8) [4].

Выбор водно-химического режима

В настоящее время в мировой зарубежной практике для систем охлаждения обмоток электрогенераторов используют следующие типы водно-химических режимов [4, 5]:

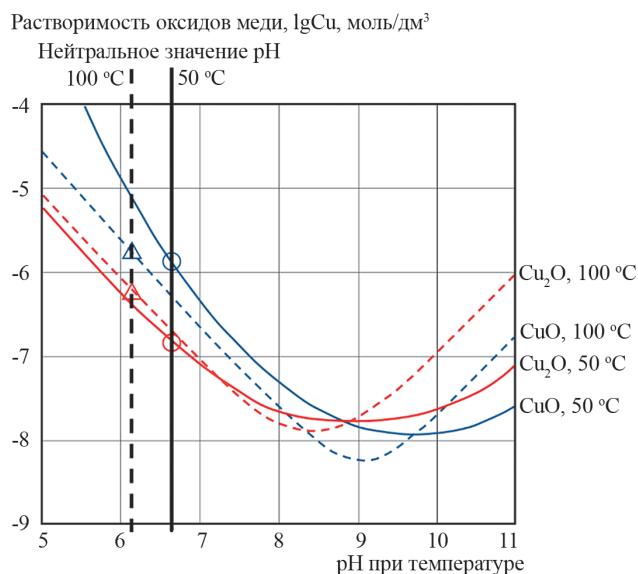


Рис. 7. Влияние pH на растворимость Cu_2O и CuO в воде при температурах 50 и 100 °C [4]

Скорость выноса меди, г/(см²·сут)

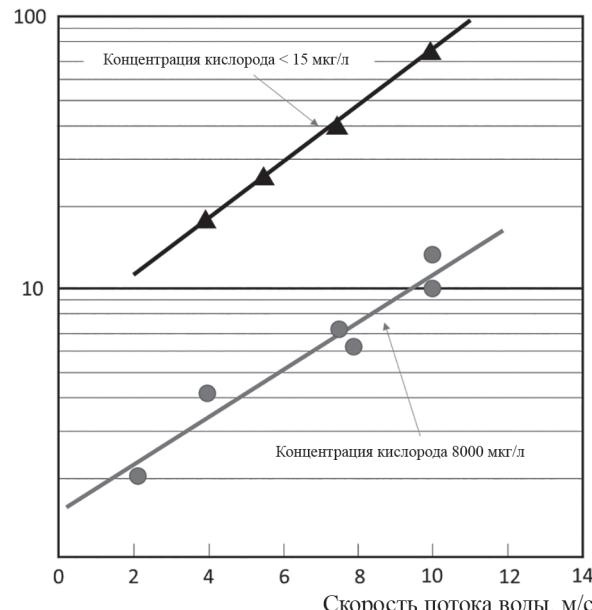


Рис. 8. Влияние скорости потока на коррозию меди в воде [4]

- нейтральный и щелочной с минимальной концентрацией кислорода — режимы предполагают реализацию условий, при которых на поверхности металла образуется защитный слой, состоящий из оксидов Cu_2O ;
- нейтральный и щелочной с высокой концентрацией кислорода — под режимами подразумевается образование защитного слоя CuO на поверхности меди.

В таблице 1 приведены данные по концентрациям меди в воде для нейтрального и щелочного водно-химических режимов с низкой концентрацией кислорода [10], из которых следует, что при щелочном ВХР концентрация меди в воде примерно в 10 раз меньше, чем при нейтральном. Следовательно, при низких концентрациях кислорода скорость коррозии меди меньше в щелочной среде, и предпочтение следует отдать ВХР с дозированием щёлочи.

В таблицах 2, 3 даны нормируемые значения качества воды для ВХР с высокой и низкой концентрациями кислорода [4, 5].

Таблица 1

Концентрации меди в охлаждающей воде при нейтральном и щелочном водно-химических режимах с низкой концентрацией кислорода [10]

Контролируемый параметр	Водно-химический режим	
	нейтральный	щелочной
pH	6,5...6,9	8,5
α , мкСм/см	0,22...0,24	1,5...1,8
C_{O_2} , мкг/дм ³	30...50	30...50
C_{Cu} , мкг/дм ³	21...39	2,5...3,0

Таблица 2

Нормируемые показатели качества воды при высокой концентрации кислорода [4, 5]

Контролируемый параметр	Водно-химический режим	
	нейтральный	щелочной
pH	6,5...6,9	8,5...9,0
α , мкСм/см	0,2	2
C_{O_2} , мкг/дм ³	2000	2000

Таблица 3

Нормируемые показатели качества воды при низкой концентрации кислорода [4, 5]

Контролируемый параметр	Водно-химический режим	
	нейтральный	щелочной
pH	6,5...6,9	8,5...9,0
α , мкСм/см	0,2	2
C_{O_2} , мкг/дм ³	20	20

Для восполнения потерь в этих системах используют только обессоленную воду, характеризующуюся следующими показателями качества: удельная электропроводность — $\leq 0,15$ мкСм/см; pH = 6,9...7,0; концентрация меди — ≤ 5 мкг/дм³; концентрация железа — ≤ 10 мкг/дм³ [5].

В таблице 4 представлены контролируемые показатели качества охлаждающей воды [4, 5].

Таблица 4

Рекомендуемые контролируемые показатели

Контролируемый параметр	Непрерывно	Периодически
α , мкСм/см	+	—
C_{O_2} , мкг/дм ³	+	—
C_{Cu} , мкг/дм ³	—	+
ПМ, мВ	+	—
C_{NaOH} , мг/дм ³	—	+

П р и м е ч а н и е: x — в случае щелочного ВХР; ПМ — потенциал металла (меди)

В процессе эксплуатации помимо указанных нормируемых показателей непрерывно измеряют температуру воды на входе и выходе из электрогенератора, а также давление воды. Периодически (1 раз в неделю) в воде после обмоток электрогенератора необходимо определять концентрацию меди. В связи с тем, что в отбираемых пробах возможно присутствие мелкодисперсной фазы продуктов коррозии меди, следует уточнять концентрации твердой фазы и растворённой формы меди. Поскольку часть системы охлаждения (теплообменники, трубопроводы, вакуумный бак) выполнена из углеродистой стали, требуется контроль концентрации железа в контуре охлаждения с периодичностью 1 раз в неделю — она не должна превышать 10 мкг/дм³. В случае превышения нормируемых показателей качества воды в системе охлаждения нужно резко увеличить продувку из бака с целью замены воды в системе охлаждения.

На основании данных, приведенных в документе, разработанном МАСВП [5], схема организации ВХР системы водного охлаждения электрогенератора с проводниками из меди указанных ВХР изображена на рис. 9.

Схема может быть использована как при щелочном ВХР, так и при нейтральном (в этом случае систему дозирования щёлочи не применяют).

Для обработки воды используют ионитные фильтры либо с последовательным фильтрованием воды через Н-катионитный и ОН-анионитный фильтры, либо фильтр смешанного действия. После фильтров устанавливают фильтры-ловушки для предотвращения поступления частиц ионитов в обработанную воду.

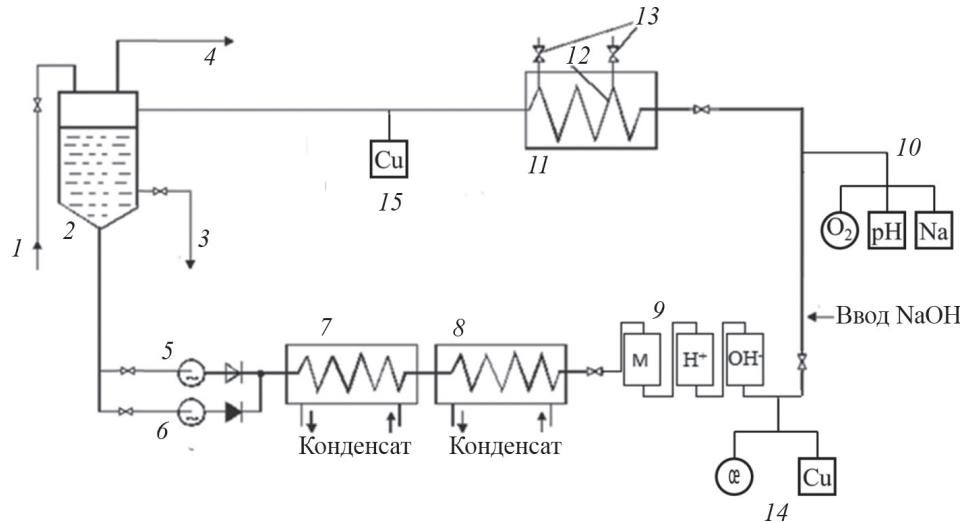


Рис. 9. Схема водяного охлаждения обмоток статора

1 — подвод химически обессоленой воды на подпитку контура; 2 — вакуумный бачок; 3 — сброс в бак нижних точек; 4 — трубопровод отсоса из вакуумного бачка; 5 — насос системы охлаждения (рабочий); 6 — насос системы охлаждения (резервный); 7, 8 — охладители дистиллята; 9 — система фильтров; 10 — система контроля качества охлаждающей воды; 11 — статор электрогенератора; 12 — вода, проходящая через обмотку статора; 13 — дренажные вентили; 14 — система контроля за работой фильтров; 15 — система контроля качества воды на выходе из электрогенератора

Помимо рассмотренных ВХР может быть использован восстановительный режим с дозированием в обессоленную воду микроконцентраций водорода (около 30 мкг/кг). Он позволяет реализовать условия, при которых на поверхности меди оксиды не образуются, т. е. металл не корродирует. Было отмечено, что при ОВП меньше 0,0 В в широком диапазоне значений pH медь находится в виде $Cu_{\text{мет}}$ (см. рис. 4). Поэтому, исходя из диаграммы Пурбэ, оптимальным ВХР будет режим с дозированием восстановителя.

В Московском энергетическом институте проведены опыты по изучению влияния восстановителя (водорода) на скорость коррозии меди [11]. Они проходили с использованием обессоленной воды, в которую дозировался водород в различных концентрациях, при температуре 25 °C в статических условиях. В воду помещали образцы из меди и выдерживали в ней в течение 140 ч. По истечении указанного времени образцы вынимали и определяли вынос продуктов коррозии меди с поверхности образцов. Результаты опытов приведены в табл. 5 [11].

Установлено, что при дозировании в обессоленную воду водорода в концентрации 30...60 мкг/дм³ скорость коррозии меди в воде при температуре 25 °С уменьшилась в 17 раз по сравнению с обессоленной водой, не содержащей водорода. При этом ОВП снизился с 0,6 В в обессоленной воде до 0,08 В — в воде, содержащей водород. Рентгеноструктурный анализ поверхности медных образцов показал, что в обессоленной воде поверхность образцов была покрыта слоем CuO. В том случае, когда образцы контактировали с водой, содержащей водород, на поверхности образцов оксиды практически отсутствовали. Аналогичные данные

Таблица 5

Влияние концентрации водорода на вынос продуктов коррозии меди с поверхности металла при температуре 25 °C

Концентрация H_2 в воде, мкг/кг	pH воды	ОВП, В	Вынос продуктов коррозии меди, г/(м ² ч)
отсутствует	6,8...7,0	0,60	$120 \cdot 10^{-3}$
20		0,10	$10 \cdot 10^{-3}$
30		0,08	$9,39 \cdot 10^{-3}$
60		0,08	$6,90 \cdot 10^{-3}$

получены и при более высоких температурах. Так, при температуре 80 °С при концентрации водорода в воде 30 мкг/дм³ скорость коррозии меди снизилась с $6,27 \cdot 10^{-3}$ до $1,17 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают выводы, сделанные на основании диаграммы Пурбэ. Именно поэтому данный водный режим решено было проверить в системе охлаждения статора электрогенератора на энергоблоке мощностью 250 МВт с генератором ТВВ-320-2 на одной из ТЭЦ Мосэнерго. Схема системы охлаждения, на которой проходили исследования, дана на рис. 10 [12].

В процессе эксплуатации энергоблока выявлен факт, позволивший отказаться от специального устройства для дозирования газообразного водорода в воду системы охлаждения: в электрогенераторе обмотки статора охлаждаются водой, а обмотки ротора — водородом, при этом давление в системе охлаждения ротора выше, чем в системе охлаждения статора. Практически, это

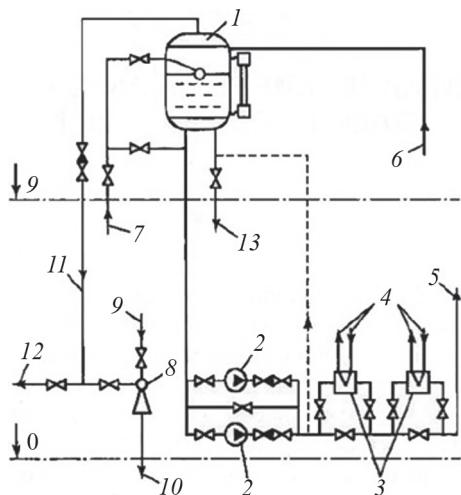


Рис. 10. Система охлаждения статора электрогенератора на энергоблоке мощностью 250 МВт [12]:

1 — вакуумный бачок; 2 — насосы охлаждения насоса статора; 3 — охладители дистиллята; 4 — подводы и отводы охлаждающего конденсата; 5 — подвод дистиллята через фильтры в обмотку статора; 6 — отвод дистиллята из обмотки статора; 7 — подвод конденсата и химически обессоленной воды на подпитку контура; 8 — водоструйный эжектор отсоса водорода из вакуумного бачка; 9 — подвод технической воды к эжектору; 10 — сброс в самотечный канал; 11 — трубопровод отсоса из вакуумного бачка; 12 — трубопровод отсоса из вакуумного бачка в конденсатор; 13 — сброс в бак нижних точек

постоянно приводит к тому, что имеют место присосы водорода в охлаждающую воду, и его концентрация становится равной примерно 20 мкг/дм³. При существовавшем способе вакуумирования воды в вакуумном баке (с помощью эжектора) концентрация кислорода в системе составляла 300...400 мкг/дм³. Для снижения концентрации кислорода до значений, не превышающих 20 мкг/дм³, а также более полного удаления CO₂, трубопровод из вакуумного бака подсоединили к конденсатору. Данная система охлаждения была введена в постоянную эксплуатацию в январе 1988 г. В результате произошло снижение концентрации кислорода до 5...20 мкг/дм³, ОВП уменьшился с +150 до -370 мВ, а концентрация меди — с 80 до 20 мкг/дм³ (рис. 11). Таким образом, опыт эксплуатации энергоблока показал, что нейтрально-восстановительный ВХР можно поддерживать без ввода дополнительных реагентов, а в качестве основного контролируемого показателя следует использовать ОВП.

Режим останова оборудования и удаление отложений

В связи с тем, что коррозионные процессы протекают не только во время работы оборудования, но и во время простоев, необходимо уделить внимание процессу останова работы водной системы охлаждения электрогенератора. Рекомендуется проведение

следующих операций: удаление воды из всей системы охлаждения; изолирование оборудования, изготовленного из меди, от оборудования, выполненного из стали (трубопроводов, вакуумного бака и др.); продувка системы охлаждения для удаления остаточной влаги с поверхностей трубок проводников; создание глубокого вакуума, поддержка его во время простоя системы охлаждения и контроль точки росы [6]. При пуске системы охлаждения следует использовать обессоленную воду, соответствующую установленным нормам. В том случае, если система охлаждения работает при низких концентрациях кислорода, перед подачей воды необходимо заполнить её азотом для предотвращения поступления в воду кислорода.

В процессе эксплуатации помимо химических параметров качества воды измеряют температуру воды на входе и выходе из обмоток статора, а также скорость движения воды через обмотки и перепад давления. Необходимость замеров указанных показателей, особенно скорости движения воды и перепада давления, связана с тем, что при наличии определённого количества отложений на поверхностях проводников происходит их изменение: перепад давления увеличивается, а скорость движения воды снижается, что может характеризовать скорость образования отложений.

Для удаления отложений, образовавшихся в системе охлаждения, в зависимости от их количества, могут быть использованы механический и химический

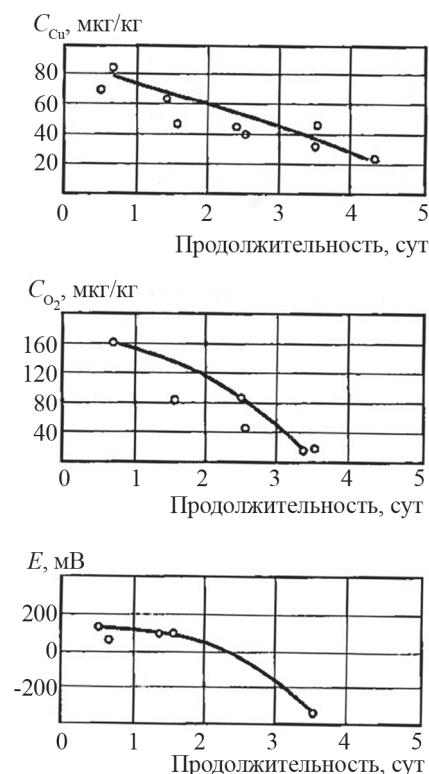


Рис. 11. Изменение ОВП, концентраций кислорода и меди в воде в период пуска

методы [13 — 16]. Механический метод, как правило, применяют при большом количестве отложений для удаления отложений с входных и выходных участков системы охлаждения. Химические методы применяют для удаления отложений из всей системы охлаждения. В основном состав отложений на поверхности медных проводников состоит из оксидов меди Cu_2O и CuO , поэтому в качестве основных реагентов могут использоваться соединения, способные растворять данные оксиды или образовывать комплексы с ними. К числу комплексообразователей относят Трилон Б и соединения, содержащие аммоний, например $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (аммоний-пероксадисульфат или сульфат). Для промывки применяют также минеральные и органические кислоты (лимонную или гликоловую), которые также образовывают комплексы с оксидами меди [13]. В случае применения химических реагентов следует учитывать свойства всех конструкционных материалов, использующихся в системе охлаждения [14].

Л и т е р а т у р а

1. **Svoboda R., Blecken W.D.** Corrosion and Deposits in Water-cooled Generator Stator Windings: overview of Water Cooling of Generators // J. Power Plant Chem. 2018. V. 20(5). Pp. 290—294.
2. **Busch H., Kretzer R.** Betriebserfahrungen mit Wassergekühlten Statorwicklungen bei Drehstromgeneratoren (Operating Experiences with Water-cooled Stator Coils of Three-phase Alternators) // Proc. VGB Conf. Chemie im Kraftwerk (Speisewassertagung). 1968. Pp. 27—35.
3. **Seipp H.G.** Das Korrosionsverhalten von Kupfer in Wassergekühlten Generatorwicklungen (The Corrosion Behaviour of Copper in Water Cooled Generator Winding) // VGB Kraftwerkstechnik. 1979. V. 59. Pp. 245—248.
4. **Svoboda R.** Corrosion and Deposits in Water Cooled Generator Stator Windings. Pt. 1. Behaviour of Copper // J. Power Plant Chem. 2018. V. 20(5). Pp. 297—309.
5. **Technical Guidance Document: Chemistry Management in Generator Water Cooling during Operation and Shutdown IAPWS Technical Guidance Documents** [Электрон. ресурс] <http://www.iapws.org/techguide.html> (дата обращения 15.05.2022).
6. **Svoboda R., Sandmann H., Seipp H.** Water Chemistry in Generator Water Cooling System // Proc. Conf. Interaction of Non-iron-based Materials with Water and Steam. Piacenza, 1996. Pp. 29.1—29.30
7. **Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.** Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968.
8. **Петрова Т.И.** Основы методики построения диаграмм состояний железа и меди. М.: Изд-во МЭИ, 1976.
9. **Homig H.E., Glass G.** Paurbaix-diagramm fur Kupferin Ammoniakkhaltigen Josungen. VGB Speisewassertagung, 1966.
10. **Svoboda R., Palmer D.** Behaviour of Copper in Generator Stator Cooling Water System // J. Power Plant Chem. 2009. V. 11(2). Pp. 70—76.

Заключение

В системах водяного охлаждения обмоток статоров электрогенераторов для предотвращения образования отложений на поверхности проводников, особенно изготовленных из меди, при любом из рассмотренных ВХР необходим непрерывный контроль качества воды, температуры и скорости движения воды. При отклонении одного из показателей от нормируемых значений рекомендуется установить причину отклонения и принять меры к устранению нарушения, т. к. продолжение работы оборудования приводит к увеличению количества отложений на поверхности проводников. Особого внимания требует процесс останова работы оборудования, в частности, контроль за ним. Это связано с тем, что при неполном дренировании системы охлаждения на поверхности меди остаётся влага, которая при контакте с медью в процессе простоя оборудования резко увеличивает скорость коррозии с последующим образованием отложений, переносом их по тракту и загрязнением системы фильтров.

R e f e r e n c e s

1. **Svoboda R., Blecken W.D.** Corrosion and Deposits in Water-cooled Generator Stator Windings: overview of Water Cooling of Generators. J. Power Plant Chem. 2018; 20(5):290—294.
2. **Busch H., Kretzer R.** Betriebserfahrungen mit Wassergekühlten Statorwicklungen bei Drehstromgeneratoren (Operating Experiences with Water-cooled Stator Coils of Three-phase Alternators). Proc. VGB Conf. Chemie im Kraftwerk (Speisewassertagung). 1968:27—35.
3. **Seipp H.G.** Das Korrosionsverhalten von Kupfer in Wassergekühlten Generatorwicklungen (The Corrosion Behaviour of Copper in Water Cooled Generator Winding). VGB Kraftwerkstechnik. 1979;59:245—248.
4. **Svoboda R.** Corrosion and Deposits in Water Cooled Generator Stator Windings. Pt. 1. Behaviour of Copper. J. Power Plant Chem. 2018;20(5):297—309.
5. **Technical Guidance Document: Chemistry Management in Generator Water Cooling during Operation and Shutdown IAPWS Technical Guidance Documents** [Электрон. Ресурс] <http://www.iapws.org/techguide.html> (Data Obrashcheniya 15.05.2022).
6. **Svoboda R., Sandmann H., Seipp H.** Water Chemistry in Generator Water Cooling System. Proc. Conf. Interaction of Non-iron-based Materials with Water and Steam. Piacenza, 1996:29.1—29.30
7. **Garrels R.M., Kravst Ch.L.** Rastvory, Mineraly, Ravnovesiya. M.: Mir, 1968. (in Russian).
8. **Petrova T.I.** Osnovy Metodiki Postroeniya Diagramm Sostoyaniy Zheleza i Medi. M.: Izd-vo MEI, 1976. (in Russian).
9. **Homig H.E., Glass G.** Paurbaix-diagramm fur Kupferin Ammoniakkhaltigen Josungen. VGB Speisewassertagung, 1966.
10. **Svoboda R., Palmer D.** Behaviour of Copper in Generator Stator Cooling Water System. J. Power Plant Chem. 2009;11(2):70—76.

11. **Мартынова О.И., Петрова Т.И., Самойлов Ю.Ф.**

Организация водно-химического режима системы охлаждения контуров энергетических установок из материалов на основе меди // Теплоэнергетика. 1989. № 11. С. 21—24.

12. **Петрова Т.И., Носова Н.П., Воронина М.П., Вороханов А.Б., Тупикина Н.В.** Водно-химический режим системы охлаждения электрогенераторов на теплофикационных энергоблоках 250 МВт // Энергетик. 1990. № 3. С. 14—16.

13. **Bauer T., Svoboda M., Svoboda R.** Corrosion and Deposits in Water Cooled Generator Stator Windings. Pt. 3. Removal of Flow Restrictions // J. Power Plant Chem. 2019. V. 21(1). Pp. 10—22.

14. **Bauer T., Svoboda M., Dockheer S., Svoboda R.** Chemical Cleaning of Water-cooled Generators: Effect on System Materials // J. Power Plant Chem. 2014. V. 16(2). Pp. 94—104.

15. **Nasri L., Leinonen P., Puzzioli F., Swami D.** Ontario Power Generation Experience with Stator Conductor Bars Fouling // Power and Plant Chem. 2003. V. 5(3). Pp. 155—162.

16. **Drommi J.-L., Mesnage F.** How to Prevent Hollow Conductor Plugging: EdF Solution for Aerated Systems // Ibid. Pp. 203—205.

11. **Martynova O.I., Petrova T.I., Samoylov Yu.F.**

Organizatsiya Vodno-khimicheskogo Rezhima Sistemy Okhlazhdeniya Konturov Energeticheskikh Ustanovok iz Materialov na Osnove Medi. Teploenergetika. 1989;11: 21—24. (in Russian).

12. **Petrova T.I., Nosova N.P., Voronina M.P., Vorokhanov A.B., Tupikina N.V.** Vodno-khimicheskiy Rezhim Sistemy Okhlazhdeniya Elektrogeneratorov na Teplofikatsionnykh Energoblokakh 250 MVt. Energetik. 1990;3:14—16. (in Russian).

13. **Bauer T., Svoboda M., Svoboda R.** Corrosion and Deposits in Water Cooled Generator Stator Windings. Pt. 3. Removal of Flow Restrictions. J. Power Plant Chem. 2019;21(1):10—22.

14. **Bauer T., Svoboda M., Dockheer S., Svoboda R.** Chemical Cleaning of Water-cooled Generators: Effect on System Materials. J. Power Plant Chem. 2014;16(2): 94—104.

15. **Nasri L., Leinonen P., Puzzioli F., Swami D.** Ontario Power Generation Experience with Stator Conductor Bars Fouling. Power and Plant Chem. 2003;5(3): 155—162.

16. **Drommi J.-L., Mesnage F.** How to Prevent Hollow Conductor Plugging: EdF Solution for Aerated Systems. Ibid:203—205.

Сведения об авторе:

Петрова Тамара Ивановна — доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича НИУ «МЭИ», e-mail: PetrovaTI@mpei.ru

Information about author:

Petrova Tamara I. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Theoretical Bases of Heat Engineering named M.P. Vukalovich Dept., NRU MPEI, e-mail: PetrovaTI@mpei.ru

Статья поступила в редакцию: 20.06.2022

The article received to the editor: 20.06.2022

Статья принята к публикации: 24.10.2022

The article has been accepted for publication: 24.10.2022