

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО НАСЫЩЕННОГО ПАРА БАРАБАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

© 2023 г. Т. И. Петрова^а, О. В. Егошина^а *

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Поступила в редакцию 04.11.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Рассмотрено влияние режимных параметров на качество насыщенного пара в паровых стационарных котлах с естественной циркуляцией и давлением перегретого пара на выходе из котла 3.9 МПа и выше (до 15.5 МПа). В настоящее время в отечественной теплоэнергетике сохраняется актуальность проведения тепlohимических испытаний котлов различного давления в целях нормирования качества котловой воды и пара в соответствии с требованиями документации по водно-химическим режимам. Востребованность подобных испытаний обусловлена необходимостью выявлять причины заноса солями проточной части паровых турбин и разрабатывать компенсирующие мероприятия по предотвращению образования отложений на лопатках турбин. Результаты подобных испытаний позволили подтвердить взаимосвязь между солесодержанием котловой воды, коэффициентом уноса, уровнем воды в барабане котла и качеством пара. В барабанных котлах высокого давления основными примесями являются оксиды железа и меди, т.е. продукты коррозии энергетического оборудования, при условии высокого качества обессоленной воды при удельной электрической проводимости менее 0.5 мкСм/см и отсутствии присосов охлаждающей воды в конденсаторе. Приведены результаты влияния корректирующего реагента на коэффициенты распределения железа и меди. Использование аммиака в качестве корректирующего реагента снижает значения коэффициентов распределения железа и меди и, следовательно, уменьшает загрязнение пара продуктами коррозии. Показано, что водно-химический режим влияет на концентрацию продуктов коррозии железа и меди в котловой воде, т.е. на эффективность продувки, что связано с изменением форм существования этих соединений в воде. Отмечено, что загрязнение пара продуктами коррозии связано с капельным уносом, так как давление насыщенного пара практически не влияет на коэффициенты распределения железа и меди. Переход в пар одной и той же примеси зависит от водно-химического режима, определяющего форму существования этого соединения.

Ключевые слова: тепловая электростанция, паровой котел с естественной циркуляцией, водно-химический режим, насыщенный пар, коэффициент уноса, коэффициент распределения примесей

DOI: 10.56304/S0040363623070056

Современное состояние отечественной тепловой энергетики характеризуется некоторыми проблемами, требующими неотложного решения. Одна из них – старение основного и вспомогательного энергетического оборудования, являющаяся причиной снижения показателей надежности и экономичности электростанций [1–3]. По данным обзора аварийности на электростанциях России одними из наиболее повреждаемых узлов энергоблоков являются паротурбинные установки. Повреждения наблюдаются, как правило, в зоне фазового перехода от перегретого пара к насыщенному [4, 5]. Согласно результатам анализа водно-химических режимов, основная причина коррозионных повреждений в турбинах – это присутствие в теплоносителе коррозионно-активных примесей (хлоридов, сульфатов,

ацетатов, формиатов), которые концентрируются на поверхности турбинных лопаток в первичном конденсате и жидкой пленке и приводят к резкому снижению в них pH [6, 7].

Выработка котлом пара, качество которого соответствует нормам [8], обеспечивает длительную и надежную работу котла и турбины. В насыщенный пар примеси поступают при растворении их в паре и с каплями котловой воды [9]. Концентрация примесей в паре $C_{п}$ вычисляется по формуле

$$C_{п} = C_{к.в}^{общ} \omega + K_p C_{к.в}^p,$$

где $C_{к.в}^{общ}$ – общая концентрация примесей в котловой воде; $C_{к.в}^p$ – концентрация только растворен-

ных примесей; ω — относительная влажность пара; K_p — видимый коэффициент распределения.

Переход примесей в насыщенный пар происходит при термодинамическом равновесии в соответствии с законом распределения веществ между водой и паром. Распределение характеризуется термодинамически истинным коэффициентом распределения или константой фазового равновесия и зависит от термодинамических параметров. В отличие от истинного, видимый коэффициент распределения представляет собой отношение общих концентраций растворенных веществ в паре и котловой воде $C_{к.в}$ без учета формы существования:

$$K_p = C_{п} / C_{к.в}.$$

В статье используется видимый коэффициент распределения (далее коэффициент распределения).

БАРАБАНЫЙ КОТЕЛ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Для стационарных паровых котлов с естественной циркуляцией и давлением перегретого пара 3.9–7.0 МПа значения коэффициентов распределения между паром и водой тех соединений (натрия, хлоридов, сульфатов), которые поступают в пар вследствие растворимости, невелики. Следовательно, для этих котлов концентрация примесей, попадающих в пар, обусловлена, главным образом, капельным уносом [9]. Капли влаги, образующиеся при разрыве оболочек паровых пузырей, выбрасываются в паровое пространство. Чем больше начальная энергия капель, тем больше высота, на которую они выбрасываются. Закономерности уноса влаги и методы уменьшения влажности пара зависят прежде всего от скорости движения пара, высоты парового пространства в барабане котла и солесодержания котловой воды [9].

Стоит отметить, что на сегодняшний день благодаря автоматическому поддержанию уровня воды в барабане высота парового пространства в период штатного режима эксплуатации изменяется незначительно и, как следствие, практически не оказывает влияния на солесодержание пара, о чем свидетельствуют результаты теплотехнических испытаний паровых котлов с естественной циркуляцией. Например, испытания котлов давлением пара 3.9 МПа показали, что колебание уровня котловой воды в диапазоне от –50 до +50 мм не приводило к изменению концентрации натрия, кремниевой кислоты и железа, а также солесодержания в насыщенном паре.

В период штатных режимов работы котлов давлением 3.9 МПа на унос капель влаги в большей степени влияет солесодержание котловой

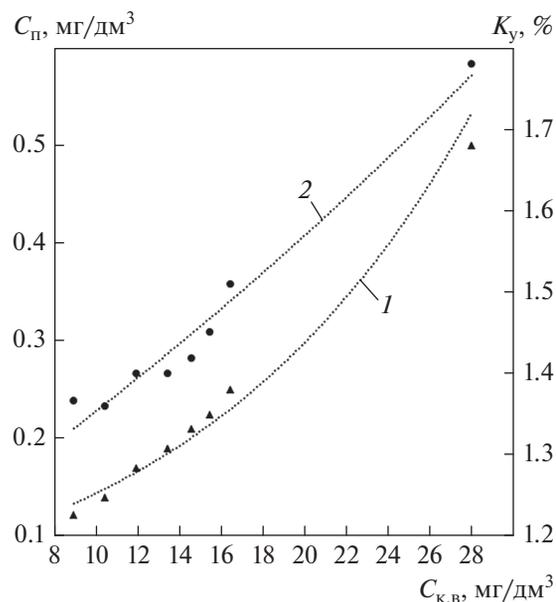


Рис. 1. Зависимость солесодержания пара (1) и коэффициента уноса (2) от солесодержания котловой воды для котлов давлением 3.9 МПа

воды, что подтверждают экспериментальные данные по изменению солесодержания пара и коэффициента уноса в зависимости от солесодержания котловой воды. Экспериментальные данные, представленные на рис. 1–3, получены при теплотехнических испытаниях трех энерготехнологических котлов РКС-135-4.0-440 и парового котла Е-75-3.9-440 с естественной циркуляцией в целях нормирования качества воды и проверки качества пара при номинальной нагрузке [10].

На рис. 1 показана зависимость солесодержания пара $C_{п}$ и коэффициента уноса K_y от солесодержания котловой воды $C_{к.в}$ в чистом отсеке котла давлением 3.9 МПа. В результате испытаний было получено, что при увеличении солесодержания котловой воды до 28 мг/дм³ солесодержание пара возрастает до 0.5 мг/дм³ (нормативное значение 0.25 мг/дм³), коэффициент уноса увеличивается в 1.3 раза в диапазоне изменения солесодержания котловой воды от 9 до 28 мг/дм³.

Результаты теплотехнических испытаний котлов среднего давления позволили подтвердить следующую закономерность: увеличение $C_{к.в}$ приводит к повышению $C_{п}$ пропорционально $C_{к.в}$. Следовательно, значение коэффициента механического уноса остается постоянным.

В барабанных котлах среднего давления в котловую воду дозируется раствор щелочи для поддержания требуемого значения рН. При этом происходит уменьшение коэффициента уноса соединений кремниевой кислоты $K_y^{SiO_2}$ (см. рис. 2).

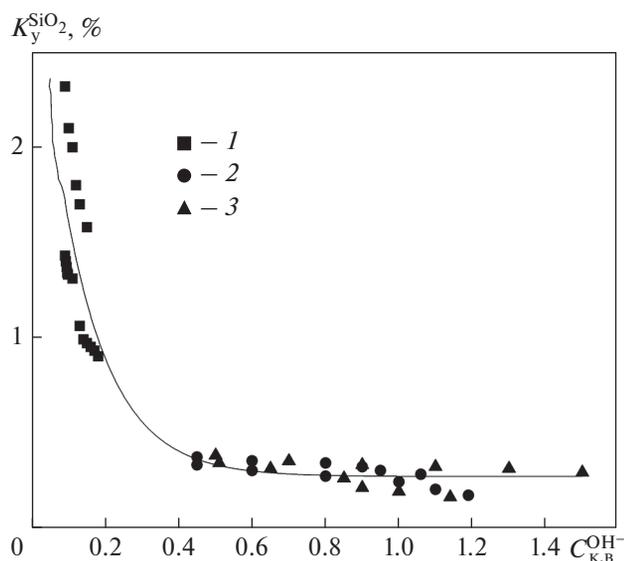


Рис. 2. Зависимость коэффициента уноса кремниевой кислоты от концентрации ионов гидроксида в котловой воде чистого (1), солевого левого (2) и солевого правого (3) отсеков барабана котла среднего давления 3.9 МПа

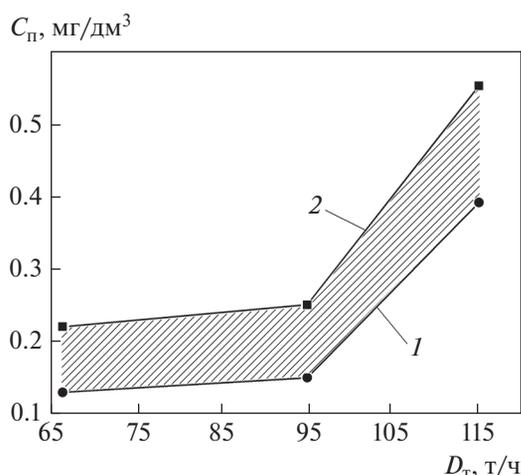


Рис. 3. Зависимость солевого содержания пара от нагрузки D при продувке 1.0 (1) и 0.15% (2) из котла давлением перегретого пара 3.9 МПа

Как видно на рис. 2, при повышении гидратной щелочности котловой воды $C_{к.в}^{OH^-}$ в пределах 0.09–0.15 мг-экв/дм³ коэффициент уноса SiO_2 уменьшается с 2.3 до 1.3% в чистом отсеке и с 0.40 до 0.15% в солевом отсеке барабана. Это связано с тем, что при постоянной нагрузке и капельном уносе с увеличением щелочности воды концентрация в ней молекулярной формы соединений кремниевой кислоты уменьшается. Вследствие того что коэффициент распределения ионной

формы значительно меньше, чем молекулярной формы, видимый коэффициент распределения снижается. Зачастую котлы среднего давления работают на максимальной нагрузке при минимальной продувке котловой воды солевых отсеков. Подобный режим работы ведет к неизбежному резкому повышению солевого содержания насыщенного пара, что подтверждается результатами теплотехнических испытаний при различных нагрузках котла.

На рис. 3 приведены результаты теплотехнических испытаний трех энерготехнологических котлов РКС-135-4.0-440 и парового котла Е-75-3.9-440 с естественной циркуляцией при номинальной (95 т/ч) и повышенной (115 т/ч) нагрузках и продувке 0.1–1.0% [10]. Площадь заштрихованной на рисунке области характеризует количество солей, которые удаляются с продувкой. Испытания котлов среднего давления с естественной циркуляцией показали, что одним из возможных способов недопущения превышения нормируемого солевого содержания пара является работа котла при нагрузке ниже максимальной.

БАРАБАННЫЙ КОТЕЛ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Повышение параметров пара на тепловых электростанциях с паровыми котлами с естественной циркуляцией и давлением перегретого пара на выходе из котла 13.8 МПа приводит к более интенсивному переходу различных примесей из воды в пар вследствие растворимости. Коэффициенты распределения примесей между водой и насыщенным паром различаются для разных примесей, поэтому загрязнение пара за счет растворимости неодинаково для отдельных примесей. При постоянной температуре значение коэффициента распределения примеси постоянно при условии, что форма существования примеси при переходе ее в другую фазу не изменяется. Если примесь существует в различных формах, например в виде ионов и молекул, постоянство коэффициента распределения будет соблюдаться для каждой формы.

Использование для подпитки котлов высокого давления обессоленной воды высокой степени чистоты при удельной электрической проводимости менее 0.5 мкСм/см и улучшение уплотнения конденсаторов турбин позволяют свести к минимуму концентрацию примесей в питательной воде. Поэтому примеси, содержащиеся в воде и паре паровых котлов высокого давления с естественной циркуляцией, состоят преимущественно из продуктов коррозии конструктивных материалов. Практически эти примеси являются оксидами железа и меди, которые могут переходить в пар как вследствие растворимости, так и в результате механического уноса.

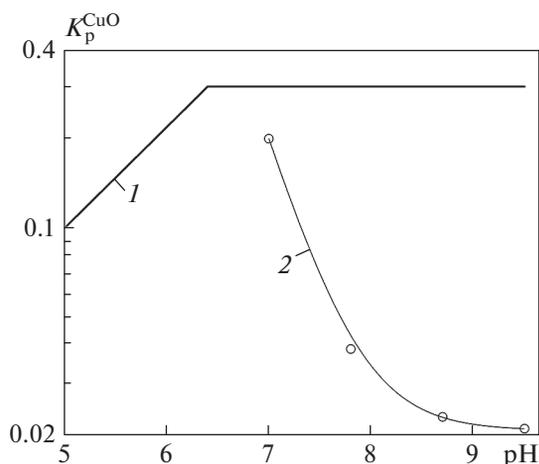


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения оксида меди от рН в присутствии гидроксида натрия (1) и аммиака (2)

На загрязнение насыщенного пара вследствие растворимости примесей влияют не только термодинамические параметры, но и состав примесей, содержащихся в воде, из которой генерируется пар. В частности, большое влияние оказывают соединения, способные образовывать комплексы в теплоносителе (аммиак, трилон Б). На рис. 4 приведены зависимости, показывающие влияние рН на коэффициент распределения оксидов меди K_p^{CuO} между водой и паром при использовании для коррекции рН гидроксида натрия и аммиака [9]. Из приведенных данных следует, что в присутствии аммиака коэффициент распределения меди значительно меньше, чем в присутствии гидроксида натрия, следовательно, загрязнение пара медью при наличии аммиака меньше. Это связано с образованием комплексов меди с аммиаком.

Как видно на рис. 5, при дозировании аммиака в теплоноситель также снижается коэффициент распределения оксидов железа K_p^{FeO} [11]. Таким образом, использование аммиака для коррекции водно-химического режима способствует уменьшению загрязнения пара продуктами коррозии меди и железа.

На коэффициент распределения некоторых соединений оказывают влияние также органические примеси, например уксусная кислота (рис. 6) [9]. Из данных, приведенных на рис. 6, следует, что в присутствии уксусной кислоты в кипящей воде коэффициент распределения хлоридов $K_p^{Cl^-}$ при давлении 15.5 МПа увеличивается в диапазоне 0.01–0.60, что негативно влияет на состояние конструкционных материалов турбины. Наличие хлоридов в паре перед турбиной при концентрации $C_n^{Cl^-}$ влияет на их концентрацию в

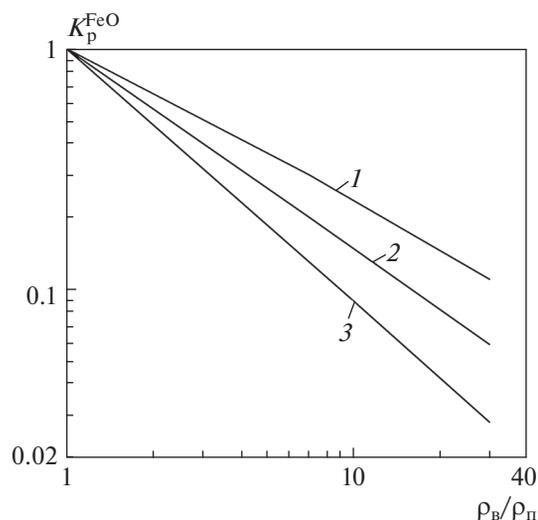


Рис. 5. Зависимость коэффициента распределения оксидов железа от отношения плотности воды ρ_v к плотности пара ρ_p при концентрации аммиака 0 (1), 250 (2) и 0.5–0.8 мг/дм³ (3)

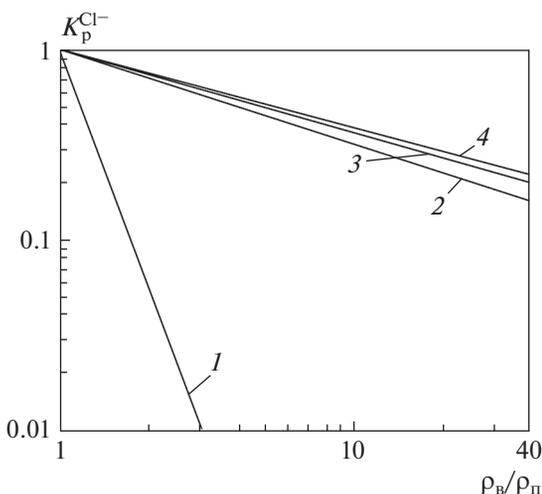


Рис. 6. Зависимость коэффициента распределения хлоридов от ρ_v/ρ_p в присутствии корректирующих реагентов при давлении 15.5 МПа. 1 – NaCl; 2 – NaCl + CH₃COOH + NH₄OH; 3 – NaCl + CH₃COOH + O₂; 4 – NaCl + CH₃COOH

первичном конденсате $C_k^{Cl^-}$ и жидкой пленке, образующейся на поверхности турбинных лопаток (рис. 7) [11].

Содержание уксусной кислоты в паре приводит к ее концентрированию в первичном конденсате и жидкой пленке и в результате к снижению рН в этих средах, что увеличивает вероятность развития коррозионно-эрозионных поврежде-

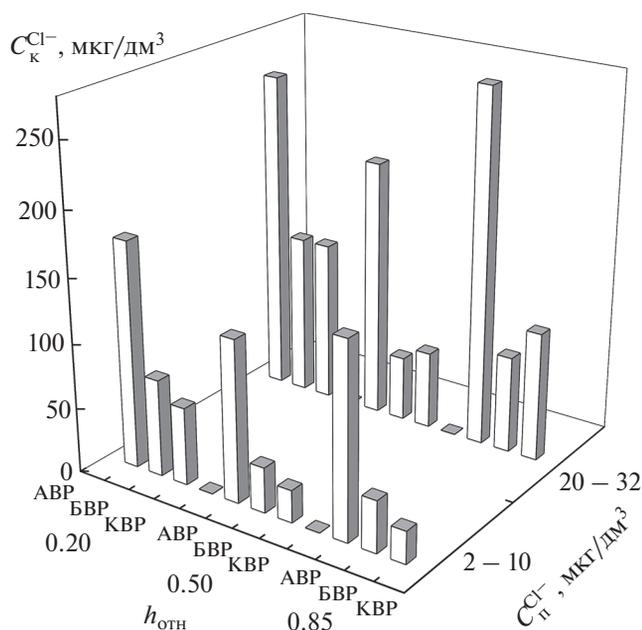
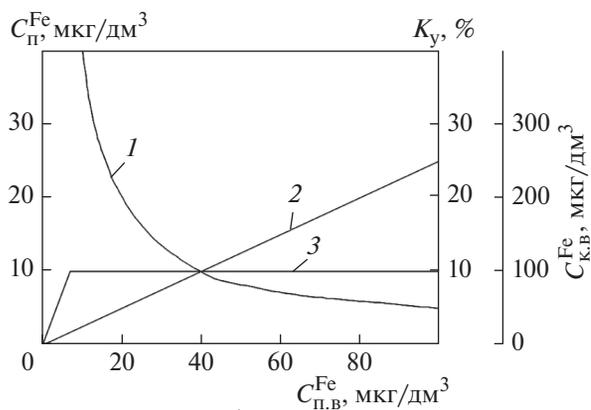


Рис. 7. Зависимость концентрации хлоридов в первичном конденсате от концентрации их в паре перед турбиной при относительной высоте лопатки турбины $h_{отн}$ и аммиачном (АВР), бескоррекционном (БВР) и кислородном (КВР) водно-химических режимах

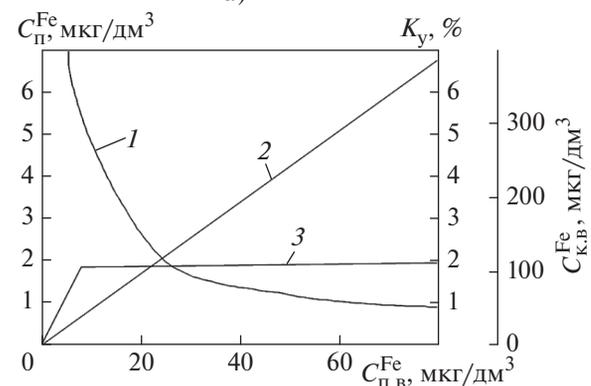
ний лопаток турбин и дисков в зоне фазового перехода пара от перегретого к насыщенному [11].

Присутствие примесей и корректирующих реагентов в питательной воде влияет не только на загрязнение насыщенного пара, но и на их концентрацию в продувочной воде и, следовательно, на продукку. На рис. 8 приведены данные, свидетельствующие о влиянии концентраций железа $C_{п.в}^{Fe}$ и меди $C_{п.в}^{Cu}$ в питательной воде на их концентрации в паре $C_{п}^{Fe}$, $C_{п}^{Cu}$ и котловой воде $C_{к.в}^{Fe}$, $C_{к.в}^{Cu}$ при бескоррекционном водно-химическом режиме и режиме с дозированием аммиака для одноступенчатой схемы испарения при постоянной продуктке и влажности пара 0.0004 [12].

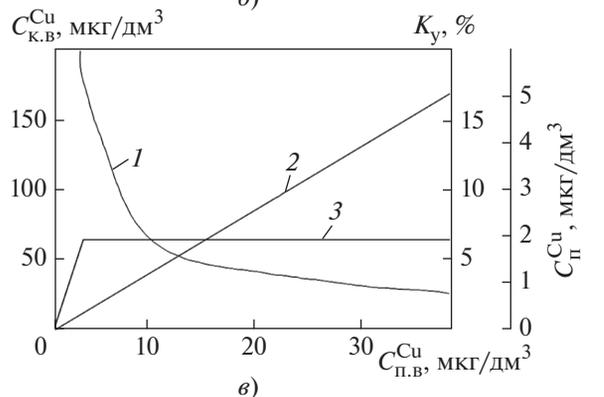
Увеличение продуктки до 1–2% практически не влияет на концентрации железа и меди в котловой воде при бескоррекционном водно-химическом режиме. При переходе к аммиачному водно-химическому режиму роль продуктки резко возрастает, особенно для продуктов коррозии меди. При бескоррекционном водно-химическом режиме большая часть продуктов коррозии железа и меди находится в молекулярной форме и характеризуется высокими значениями видимых коэффициентов распределения и поэтому значительная доля этих соединений переходит в пар. При дозировании в питательную воду аммиака в результате образования комплексных соединений коэффициент распределения снижается, след-



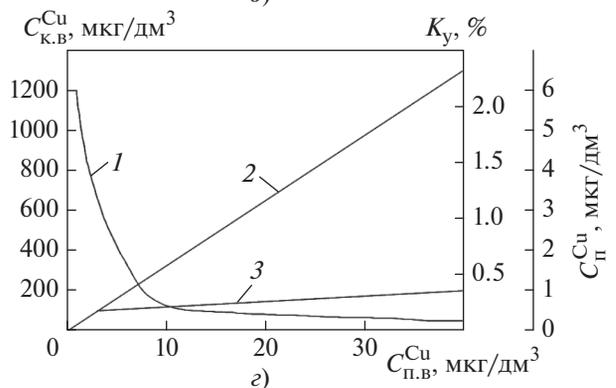
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Зависимость концентрации железа в насыщенном паре (а, б) и меди в котловой воде (в, г) от их концентрации в питательной воде при бескоррекционном (а, в) и гидразинно-аммиачном (б, г) водно-химическом режиме. 1 – K_{γ} ; 2 – $C_{к.в.}$; 3 – $C_{п}$

Таблица 1. Концентрация железа, мкг/дм³, в котловой воде, насыщенном и перегретом паре в зависимости от уровней воды в барабанах котла-утилизатора

Теплоноситель	Уровень воды в барабане, мм		
		низкого давления	
	13.2	–930.8	–780.9
	4.1	–235.6	–230.6
	7.6	–244.6	–246.0
Котловая вода давления:			
низкого	9.3	6.2	7.7
среднего	12.4	9.3	9.3
высокого	18.5	12.4	18.5
Насыщенный пар давления:			
низкого	9.3	4.6	6.2
среднего	34	6.2	7.7
высокого	9.3	6.2	6.2
Пар промежуточного перегрева	12.4	6.2	6.2
Перегретый пар высокого давления	9.3	6.2	6.2

ствие чего количество переходящих в пар соединений железа и меди уменьшается, поэтому с продувочной водой выводится большая часть этих примесей. Так, при концентрации меди в питательной воде 10 мкг/дм³ увеличение продувки с 1 до 2% при аммиачном водно-химическом режиме приводит к снижению содержания меди в котловой воде примерно на 25%.

Приведенные данные могут быть получены, только если концентрации продуктов коррозии железа и меди в котловой воде не превышают их растворимость. В противном случае происходит образование твердой фазы, которая не переходит в пар вследствие растворимости, но может уноситься с каплями влаги. В связи с тем что в котлах высокого давления капельный унос на несколько порядков меньше коэффициента распределения продуктов коррозии меди и железа, концентрации этих соединений в паре практически определяются коэффициентом распределения. Следовательно, при повышении концентраций оксидов железа и меди в питательной воде концентрации их в насыщенном паре будут увеличиваться, пока не будет достигнута их растворимость в котловой воде. При дальнейшем повышении концентраций в питательной воде их концентрации в паре будут оставаться практически постоянными при низком капельном уносе.

Следует отметить, что коэффициент распределения продуктов коррозии железа и меди незначительно изменяется с изменением давления, поэтому концентрации этих соединений в насы-

щенном паре зависят главным образом от капельного уноса. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с данными, полученными на одной из ТЭС с парогазовыми установками (см. таблицу). В барабанных котлах на ТЭС с ПГУ концентрация железа в насыщенном паре снижалась с увеличением высоты парового пространства в барабанах всех контуров, что связано с уменьшением капельного уноса.

Таким образом, регулировать концентрации продуктов коррозии железа и меди в котловой воде можно с помощью продувки и организации соответствующего водно-химического режима, который влияет на коэффициент распределения примесей.

ВЫВОДЫ

1. Уменьшение влажности пара до минимальных значений при эксплуатации котлов с естественной циркуляцией не позволяет предотвратить загрязнение пара примесями, особенно при высоких значениях параметров, что связано с растворимостью этих примесей в паре.

2. Одним из возможных способов предотвращения превышения нормируемого содержания пара в барабанных котлах среднего давления является их эксплуатация при нагрузке ниже максимальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сурба А.С.** Краткий обзор аварийности на электростанциях ЕЭС России за 2001–2007 гг. // Энергетик. 2009. № 6. С. 8–12.
2. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Проблемы организации водно-химических режимов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2002. № 7. С. 2–6.
3. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Совершенствование водно-химических режимов и химконтроля на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2010. № 7. С. 2–6.
4. **Комаров Н.Ф., Юрков Э.А.** Коррозионные повреждения лопаточного аппарата и дисков паровых турбин // Теплоэнергетика. 1991. № 2. С. 10–14.
5. **Василенко Г.В.** О механизме перехода примесей пара в первичный конденсат турбин // Электрические станции. 1995. № 9. С. 20–24.
6. **Богачев А.Ф.** Изучение и предотвращение коррозии металла в зонах фазовых превращений и перегретом паре. М.: ВТИ, 1997.
7. **Мартынова О.И., Поваров О.А., Богомолов Б.В.** Влияние водно-химических факторов на коррозионное состояние проточной части турбины // Электрические станции. 1987. № 3. С. 8–12.
8. **СО 153-34.20.501-2003.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
9. **Петрова Т.И., Воронов В.Н., Дяченко Ф.В.** Физико-химические процессы в водном теплоносителе электростанций. М.: Изд-во МЭИ, 2021.
10. **РД 153.34.1-37.313-00.** Методика теплохимических испытаний паровых стационарных котлов с естественной циркуляцией. М.: СПО ОРГРЭС, 2001.
11. **Петров А.Ю.** Экспериментальное исследование влияния водно-химических режимов на поведение коррозионно-активных примесей в зоне фазового перехода паровых турбин // Вестник МЭИ. 1996. № 5. С. 47–51.
12. **Расчет водно-химических режимов теплоэнергетических установок / О.И. Мартынова, Т.И. Петрова, В.Л. Меньшикова, Л.Г. Васина, А.В. Богловский.** М.: Изд-во МЭИ, 1998.

The Effect of Operating Conditions on the Quality of Saturated Steam in Drum-Type Power Boilers

T. I. Petrova^a and O. V. Egoshina^{a, *}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^{*}e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Abstract—The effect of the operating conditions on the quality of saturated steam in stationary natural circulation boilers with a superheated steam pressure at the boiler outlet of 3.9 MPa or higher (up to 15.5 MPa) is examined. At present, the need is still urgent in the domestic power industry for thermochemical testing of boilers of various pressures to standardize the quality of boiler water and steam in accordance with the requirements of the applicable regulations for water chemistries. The demand for such testing results from the need to find the cause of salt deposition in the flow path of steam turbines and develop measures to prevent the formation of deposits on turbine blading. The results of these tests have confirmed the correlation among the boiler water salt content, entrainment factor, water level in the boiler drum, and steam quality. In high-pressure drum boilers, the main impurities are iron and copper oxides, i.e., the products of corrosion of power equipment provided that the demineralized water has a high quality with a maximum specific conductivity of 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and no cooling water inleakage occurs in the condenser. Results of the effect of a correcting chemical on the distribution coefficient of iron and copper are presented. The use of ammonia as a correcting chemical decreases the distribution coefficient for iron and copper and, hence, reduces the contamination of steam with corrosion products. The water chemistry has been demonstrated to affect the concentration of corrosion products of iron and copper in the boiler water, i.e., the blowdown efficiency, which is related with changes in the form of these compounds in water. It is pointed out that the contamination of steam with corrosion products is related with droplet entrainment since the saturated steam pressure hardly has any effect on the distribution coefficients for iron and copper. How one and the same impurity enters the steam depends on the water chemistry controlling the form of existence of this compound.

Keywords: thermal power plant, natural circulation steam boiler, water chemistry, saturated steam, entrainment factor, impurity distribution coefficient