

УДК 621.311.22

Исследование поведения фосфатов в барабане котла ТЭЦ МЭИ

А.Е. Верховский, Ю.А. Морыганова, Аунг Мьо Кхин
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: moryganova@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При работе барабанного котла на ТЭС возникают вопросы, связанные с изменением концентраций фосфатов в зависимости от нагрузки. В частности, изменение концентраций фосфатов в котловой воде связывают с явлением хайд-аут. При этом часто не учитывается материальный баланс поведения примесей, который связывает концентрации примесей котловой воды и расходные характеристики. Расчет материальных балансов примесей позволяет объяснить поведение примесей котловой воды в барабанном котле и оценить вероятность образования отложений на теплопередающих поверхностях котла. В связи с этим необходимо учитывать расходные характеристики по отсекам и сторонам котла в целях получения достоверных данных по поведению примесей в водяном объеме котла.

Материалы и методы: Исследования проведены на барабанном котле № 2 ТЭЦ МЭИ с давлением 4,1 МПа. Концентрации фосфатов в чистом и солевом отсеках определены ручным методом, электропроводность – кондуктометрическим методом. При расчете поведения примесей, в частности фосфатов, использован метод составления материальных балансов по каждому отсеку барабанного котла.

Результаты: Рассматриваются материальные балансы поведения фосфатов в барабане котла и влияние нагрузки котла на их концентрации как по сторонам барабана, так и по чистому и солевому отсекам. На примере работы барабанного котла ТЭЦ МЭИ показано изменение концентраций фосфатов по чистому и солевому отсекам в зависимости от нагрузки котла. Кратности упаривания примесей, в частности фосфатов, в зависимости от нагрузки котла изменяются по отсекам. Установлено, что при одинаковых кратностях упаривания фосфатов по сторонам барабанного котла кратности упаривания по отсекам могут быть разными, концентрации фосфатов по отсекам барабанного котла зависят от нагрузки котла.

Выводы: Расчет кратностей упаривания фосфатов по отсекам котла позволяет оценить вероятность образования фосфатных отложений на теплопередающих поверхностях.

Ключевые слова: водно-химический режим, барабанный котел, фосфатирование, материальный баланс, кратность упаривания, расход пара, чистый отсек, солевой отсек, продувка, расход питательной воды.

Investigation of phosphate behavior in the drum boiler of the heat power plant of Moscow Power Engineering Institute (MEI HHP)

A.E. Verkhovsky, Y.A. Moryganova, Aung Myo Khin
National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation
E-mail: moryganova@mail.ru

Abstract

Background: Operation of a heat power station drum boiler raises questions of changing phosphate concentrations depending on the load. In particular, changes in the boiler water phosphate concentration are associated with the hide-out phenomenon. The material balance of the impurity behaviour that binds the impurity concentration of the boiler water and discharge characteristics is often left out of account. The calculation of impurities material balances helps explain the behavior of impurities in the water drum boiler and estimate the probability of deposit formation on the boiler heat transfer surfaces. Therefore, it is important to account for the discharge characteristics in different compartments and at different sides of the boiler in order to obtain reliable data about impurities behavior in the water boiler.

Materials and Methods: Investigations were carried out on the boiler drum number 2 TPP MEI with the pressure of 4,1 MPa. The concentration of phosphate in a clean, salty compartments defined by manual method and the electrical conductivity was determined by conductometric method. When calculating the behavior of impurities, such as phosphates, we used the method of compiling material balances for each compartment of the boiler drum.

Results: We consider phosphate material balances behavior in the boiler drum and the boiler load impact on their concentration on both sides of the drum and in the clean and salt compartments. By studying the operation of the drum boiler MEI HHP as an example, we show the variation of phosphate concentration in clean and salt compartments depending on the boiler load. Multiplicities of impurity evaporation, in particular, of phosphates depending on the boiler load, vary in the compartments. At the same phosphate evaporation multiplicity values on the drum boiler sides, the phosphate evaporation multiplicity in the compartments may vary. And phosphate concentrations in the drum boiler compartments depend on the boiler load.

Conclusions: The calculation of the multiplicities of the phosphate evaporation in the boiler compartments allows us to estimate the probability of phosphate deposit formation on heat transfer surfaces.

Key words: water-chemistry conditions, drum boiler, phosphating, material balance, evaporation multiplicity, steam flow, clean compartment, salt compartment, blowdown, feed water flow.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.005-010

Для снижения скорости образования отложений на теплопередающих поверхностях нагрева и поддержания значений pH, установленных нормами ПТЭ, применяется дозирование фосфатов в барабан котла. В качестве реагента на ТЭЦ с барабанными котлами используется фосфат натрия Na_3PO_4 . В [1] отмечается, что при изменении нагрузки котла концентрации фосфатов по отсекам (чистый, солевой) меняются, причем при повышении нагрузки концентрации снижаются, а при снижении нагрузки увеличиваются. Однозначного объяснения этому нет. Некоторые исследователи¹ связывают это с явлением хайд-аут.

В процессе эксплуатации барабанных котлов на ТЭЦ МЭИ существует такая же проблема, т.е. при изменении нагрузки котла концентрации фосфатов по отсекам изменяются. Для выяснения причин, приводящих к такому явлению, были проведены эксперименты по изучению влияния режимных параметров (в частности, расхода питательной воды) на поведение фосфатов по отсекам при постоянном дозировании фосфатов в котел и после отключения дозирования. Исследования проводились на барабанном котле № 2 с давлением 4,1 МПа. Схемы циркуляции воды в котле и дозирования фосфатов представлены на рис. 1.

Питательная вода из водяного экономайзера поступает в чистый отсек барабана (ЧО) [2], распределяясь по всей его длине. Котловая вода чистого отсека направляется по опускным трубам к фронтальному, заднему экранам и к задним панелям боковых экранов. Пароводяная смесь из этих экранов поступает в чистый отсек барабана. Питание солевых отсеков (СО) осуществляется через сопла, скорость воды в которых подобрана таким образом, чтобы обеспечить некоторое снижение уровня в солевых отсеках по отношению к чистому отсеку и избежать перетоков котловой воды из солевых отсеков в чистый отсек. Котловая вода солевых отсеков по опускным трубам направляется к передним панелям боковых экранов. Пароводяная смесь от этих панелей поступает в солевые отсеки.

Дозирование фосфатов осуществляется в чистый отсек, где они распределяются во всем объеме чистого отсека. В дальнейшем они через сопла между чистым и солевым отсеками с котловой водой чистого отсека поступают в солевые отсеки.

В процессе исследований отбирались пробы котловой воды чистого отсека, котловой воды солевых отсеков правой и левой частей барабана котла. Контролировались расходы питательной воды, постоянной продувки левой

и правой частей барабана котла, а также концентрации фосфатов по всем точкам отбора проб. Данные, полученные в процессе испытаний, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений в процессе исследований

Расход питательной воды, т/ч	Расход продувочной воды, т/ч		Концентрация фосфатов, мг/дм ³		
	левая сторона	правая сторона	ЧО	Левая сторона СО _л	Правая сторона СО _п
45	0,25	0,25	2	25	25
45,5	0,225	0,225	2	25	30

Каждый режим работы котла был установлен, так как концентрации фосфатов в отбираемых пробах в каждой точке отбора практически не изменялись (погрешность измеренных концентраций составляла менее 2 %), и время работы на каждом режиме составляло более 100 часов. Необходимо отметить, что наличия фосфатов в паре не обнаружено.

Для установившегося режима работы котла справедливы балансовые уравнения [3–5] для правой и левой частей барабана котла, представленные ниже. Поскольку питательная вода поступала по общему трубопроводу в чистый отсек, чистый отсек условно делился на правую и левую части, то и общий поток питательной воды также делился на две равные части и принимался равным для правой и левой сторон чистого отсека барабана котла.

Для левой части уравнение материального баланса концентраций фосфатов в котловой воде чистого и солевого отсеков запишется в следующем виде:

$$D_{ПВ}^{ЛЕВ} C_{ПВ}^{ЛЕВ} = D_{П1}^{ЛЕВ} C_{П1}^{ЛЕВ} + C_{ЧО}^{ЛЕВ} (D_{П2}^{ЛЕВ} + D_{ПР}^{ЛЕВ}); \quad (1)$$

$$C_{ЧО}^{ЛЕВ} (D_{П2}^{ЛЕВ} + D_{ПР}^{ЛЕВ}) = D_{П2}^{ЛЕВ} C_{П2}^{ЛЕВ} + D_{ПР}^{ЛЕВ}, \quad (2)$$

где $D_{ПВ}^{ЛЕВ}$, $D_{П1}^{ЛЕВ}$, $D_{П2}^{ЛЕВ}$, $D_{ПР}^{ЛЕВ}$ – расходы питательной воды, пара с первой ступени испарения, второй ступени испарения и продувки по левой части барабана соответственно; $C_{П1}^{ЛЕВ}$, $C_{ЧО}^{ЛЕВ}$, $C_{ПР}^{ЛЕВ}$, $C_{П2}^{ЛЕВ}$ – концентрации фосфатов в паре чистого отсека, котловой воде чистого отсека, в продувке солевого отсека и паре солевого отсека по левой стороне барабана соответственно; $C_{ПВ}^{ЛЕВ}$ – концентрация фосфатов, если бы они вводились в питательную воду.

Следует отметить, что концентрация фосфатов в продувочной воде левой стороны равна концентрации фосфатов в котловой воде второго (солевого) отсека:

$$C_{ПР}^{ЛЕВ} = C_{СО}^{ЛЕВ}. \quad (3)$$

¹ Дули Б. Значение защитной оксидной пленки для предотвращения повреждений котельных труб на тепловых электростанциях»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1996.

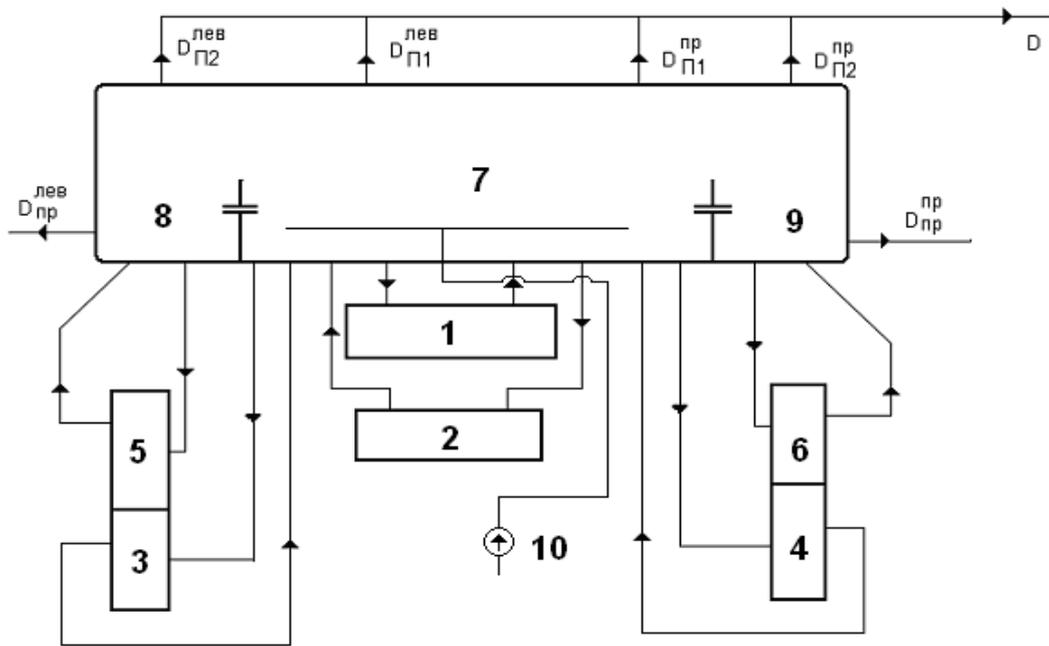


Рис. 1. Схема циркуляции котла № 2 ТЭЦ МЭИ: 1 – фронтной экран; 2 – задний экран; 3, 4 – задние панели боковых экранов; 5, 6 – передние панели боковых экранов; 7 – чистый отсека; 8 – солевого отсека, левая сторона; 9 – солевого отсека, правая сторона; 10 – линия подачи фосфатов в барабан котла; $D_{П1}^{лв}, D_{П1}^{пр}, D_{П2}^{лв}, D_{П2}^{пр}, D_{ПР}^{лв}, D_{ПР}^{пр}, D$ – расходы пара из чистого отсека (левая и правая стороны), расходы пара из солевых отсеков (левая и правая стороны), расход продувки по сторонам барабана (правая и левая стороны), общий расход пара из котла соответственно

Выразив из (1) и (2) концентрации фосфатов в котловой воде чистого и солевого отсеков, с учетом равенства 3 получаем следующие выражения для концентраций фосфатов в котловых водах каждого из отсеков:

$$C_{ЧО}^{лв} = \frac{D_{ПВ}^{лв} \cdot C_{ПВ}^{лв}}{D_{П2}^{лв} + D_{ПР}^{лв}}; \quad (4)$$

$$C_{СО}^{лв} = \frac{D_{ПВ}^{лв} \cdot C_{ПВ}^{лв}}{D_{ПР}^{лв}}. \quad (5)$$

Кратность упаривания фосфатов в солевом левом отсеке по отношению к чистому отсеку составляет

$$K_2^{у.л} = \frac{C_{СО}^{лв}}{C_{ЧО}^{лв}} = \frac{D_{П2}^{лв} + D_{ПР}^{лв}}{D_{ПР}^{лв}}. \quad (6)$$

Кратность упаривания фосфатов в чистом отсеке по отношению к вводимым фосфатам

$$K_1^{у.л} = \frac{C_{ЧО}^{лв}}{C_{ПВ}^{лв}} = \frac{D_{ПВ}^{лв}}{D_{П2}^{лв} + D_{ПР}^{лв}}. \quad (7)$$

Общая кратность упаривания по левой стороне

$$K_{Общ}^{у.л} = K_1^{у.л} \cdot K_2^{у.л}. \quad (8)$$

Подставив значения расходных характеристик и концентрации фосфатов для каждого режима работы котла, получили значения кратности упаривания для каждого из отсеков при разных нагрузках котла, представленные в табл. 2.

Сравнительный анализ значений общей кратности упаривания для левой и правой частей барабана при двух режимах работы котла показывает их совпадение. С другой стороны, увеличение нагрузки ведет к увеличению кратности упаривания фосфатов в котле, что приводит к изменению концентраций фосфатов как в котловой воде чистых отсеков, так и в котловой воде солевых отсеков. На рис. 2 представлены зависимости кратности упаривания фосфатов в чистых и солевых отсеках левой и правой сторон барабана котла от нагрузки.

Таблица 2. Результаты расчетов кратности упаривания фосфатов по отсекам

Показатель	Левая часть барабана котла		Правая часть барабана котла	
	первый режим	второй режим	первый режим	второй режим
Расход питательной воды, $D_{пв}$, т/ч	45	45,5	45	45
Кратность упаривания фосфатов в чистом отсеке, K_1^y	7,2	8	7,2	6,67
Кратность упаривания фосфатов в солевом отсеке, K_2^y	12,5	12,5	12,5	15
Общая кратность упаривания, $K_{Общ}^y$	90	100	90	100,05

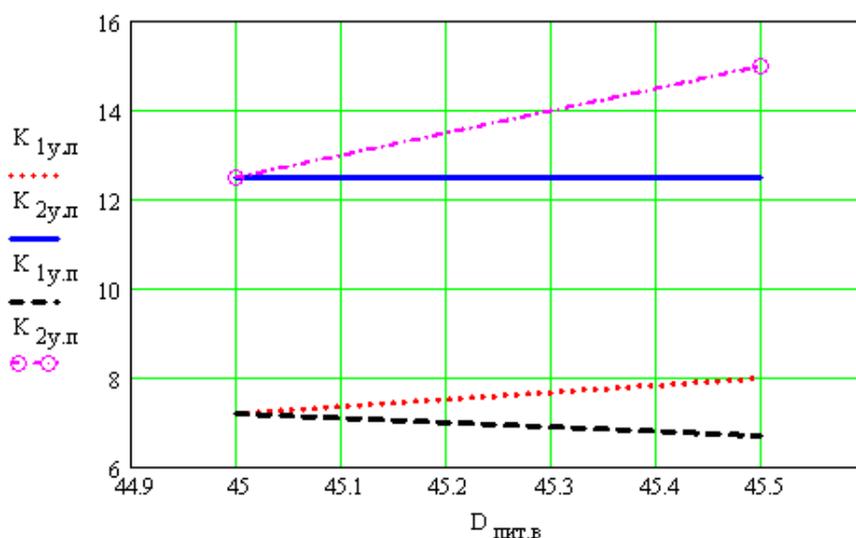


Рис. 2. График зависимости кратности упаривания от расхода питательной воды

Анализ рассчитанных данных показывает, что при обоих режимах работы общие кратности упаривания фосфатов по левой и правой частям равны. Равенство концентраций дозируемых фосфатов свидетельствует о том, что фосфаты дозируются равномерно в объем чистого отсека. Кратности упаривания по отсекам не равны между собой, что указывает на неравномерное распределение теплоты в топке котла. Изменение режима горения, при котором все теплообменные поверхности обогрываются равномерно, дает возможность оптимизации дозирования фосфатов.

Основным условием оптимальной работы котла является одинаковая кратность упаривания по отсекам, следовательно, паропроизводительности солевых отсеков также должны быть равны между собой.

При общей кратности упаривания для первого режима, равной 90, кратность упаривания в каждом отсеке будет составлять

$$K_1^y = K_2^{y.л} = K_2^{y.п} = \sqrt{K_{\text{Общ}}^y}, \quad (9)$$

$$K_1^y = K_2^{y.л} = 9,49.$$

По значению кратности упаривания по левой стороне получаем величину паропроизводительности солевого отсека левой стороны, которая, в свою очередь, будет равна паропроизводительности солевого отсека правой стороны при заданной постоянной продувке. Получаем паропроизводительности солевых отсеков левой и правой сторон барабана:

$$D_{\text{П2}}^{\text{ЛЕВ}} = D_{\text{П2}}^{\text{ПР}} = 2,12 \text{ т/ч},$$

$$D_{\text{П1}} = 40,76 \text{ т/ч}.$$

Для второго режима получаем

$$D_{\text{П2}}^{\text{ЛЕВ}} = D_{\text{П2}}^{\text{ПР}} = 2,025 \text{ т/ч},$$

$$D_{\text{П1}} = 41,45 \text{ т/ч}.$$

Оптимальная паропроизводительность по отсекам может быть рассчитана через вре-

мя пребывания фосфатов (t) в объеме котла [2]. Производная времени пребывания, взятая от паропроизводительности первого отсека и приравненная к нулю, даст оптимальную паропроизводительность первого отсека. Зная выражение для кратности упаривания и решая систему из двух уравнений

$$\begin{cases} \frac{dt}{dD_{\text{П1}}} = 0, \\ K_2^{y.п} = \sqrt{\frac{D_{\text{ПВ}}}{D_{\text{ПР}}}}, \end{cases}$$

получаем оптимальную паропроизводительность по отсекам и оптимальную постоянную продувку. Для данного котла система из двух уравнений запишется в следующем виде:

$$\frac{D_{\text{ПВ}}}{(D_{\text{ПВ}} - D_{\text{П1}})^2} + \frac{1}{D_{\text{ПР}}} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{D_{\text{ПВ}} - D_{\text{П1}}}{D_{\text{ПР}}} = K_2^{y.л}. \quad (11)$$

Подставляя значения расходов питательной воды и кратности упаривания для каждого режима, получаем:

- для первого режима

$$D_{\text{П1}} = 40,26 \text{ т/ч}; \quad D_{\text{П2}}^{\text{Л}} = D_{\text{П2}}^{\text{П}} = 2,12 \text{ т/ч};$$

$$D_{\text{ПР}}^{\text{Л}} = D_{\text{ПР}}^{\text{П}} = 0,225 \text{ т/ч};$$

- для второго режима

$$D_{\text{П1}} = 39,99 \text{ т/ч}; \quad D_{\text{П2}}^{\text{Л}} = D_{\text{П2}}^{\text{П}} = 2,48 \text{ т/ч};$$

$$D_{\text{ПР}}^{\text{Л}} = D_{\text{ПР}}^{\text{П}} = 0,275 \text{ т/ч}.$$

Необходимо отметить, что фосфаты дозируются непосредственно в котловую воду чистого отсека. Концентрация фосфатов в баке дозируемого раствора составляла при проведении испытаний 2,5 г/дм³. Поэтому расчет расхода насоса дозатора выполнен с учетом значений рассчитанных концентраций для первого и второго режимов паропроизводительности котла. Если фосфаты дозировать в

питательную воду, то концентрация их в питательной воде по правой и левой частях барабана котла при первом режиме работы составит для левой части $C_{\text{ПВ}}^{\text{Л}} = 0,278 \text{ мг/дм}^3$, для правой части $C_{\text{ПВ}}^{\text{П}} = 0,278 \text{ мг/дм}^3$. Количество фосфатов, поступающих в котловую воду, должно быть равно количеству фосфатов, поступающих с питательной водой. Следовательно, можно составить следующее равенство для левой части барабана:

$$D_{\text{ПВ}}^{\text{ЛЕВ}} C_{\text{ПВ}}^{\text{ЛЕВ}} = D_{\text{НД}}^{\text{ЛЕВ}} C_{\text{Р}}^{\text{ЛЕВ}}, \quad (12)$$

где $D_{\text{ПВ}}^{\text{ЛЕВ}}$, $D_{\text{НД}}^{\text{ЛЕВ}}$ – расходы питательной воды и насоса дозатора соответственно; $C_{\text{ПВ}}^{\text{ЛЕВ}}$, $C_{\text{Р}}^{\text{ЛЕВ}}$ – расчетная концентрация фосфатов в питательной воде и концентрация фосфатов в баке, из которого осуществляется дозирование фосфатов. Общий расход насоса дозатора составит $10 \text{ дм}^3/\text{ч}$.

Проведя такой же расчет для второго режима, получаем расход фосфатов в левую часть чистого отсека $D_{\text{НД}}^{\text{Л}} = 4,5 \text{ дм}^3/\text{ч}$, в правую часть $D_{\text{НД}}^{\text{П}} = 5,5$ и общий расход насоса дозатора $10 \text{ дм}^3/\text{ч}$.

Исходя из схемы циркуляции воды в котле экраны обогреваются различными горелками неравномерно, и следовательно, неравенство распределения исходно дозируемых фосфатов в правую и левую части чистых отсеков котла указывает на то, что поверхности экранных труб обогреваются неравномерно. Как следствие, кратности упаривания фосфатов не одинаковы по сторонам котла, что приводит к изменению концентраций фосфатов по правой и левой сторонам котла.

Следующим этапом исследований стало изучение поведения фосфатов по ступеням испарения при отключении их дозирования. Режимные параметры работы котла соответствовали второму режиму. В табл. 3 представлены результаты этих исследований. Время указано после выключения дозирования фосфатов.

Таблица 3. Изменение концентраций фосфатов и pH после прекращения дозирования фосфатов

Время, ч	Чистый отсек		Левый солевой отсек		Правый солевой отсек	
	$[\text{PO}_4^{3-}]$, мг/дм ³	pH	$[\text{PO}_4^{3-}]$, мг/дм ³	pH	$[\text{PO}_4^{3-}]$, мг/дм ³	pH
0	2	9,11	25	10,23	30	10,43
1	2	8,81	25	10,18	30	10,34
3	1	8,82	20	9,98	25	10,17
6	<1	8,77	15	9,61	15	9,89
16	<1	8,45	4	–	10	–

Изменение концентрации фосфатов в чистом отсеке выражаем уравнением

$$C_{\text{ЧО}} = 2e^{-\frac{(D_2 + D_{\text{ПР}})t}{V_{\text{ЧО}}}}, \quad (13)$$

где 2 – концентрация фосфатов в момент отключения насоса дозатора фосфатов; D_2 и $D_{\text{ПР}}$ – суммарная паропроизводительность солевых отсеков и суммарная продувка каждой

стороны барабана; V_1 – водяной объем чистого отсека; t – время.

Подставив реальные расходы пара, продувки для данного режима работы котла и водяной объем чистого отсека, получаем зависимость

$$C_{\text{ЧО}} = 2e^{-0,69t}. \quad (14)$$

Решая уравнение (14) для каждого момента времени, находим концентрации фосфатов в чистом отсеке. Учитывая, что режимные параметры котла постоянны, через кратность упаривания в солевых отсеках правой и левой стороны находим концентрации фосфатов в солевом левом и солевом правом отсеках. В табл. 4 представлены расчетные и измеренные значения концентраций фосфатов по отсекам.

Анализ данных табл. 4 показывает, что расчетные концентрации значительно ниже измеренных. Данное обстоятельство может быть объяснено тем, что при прекращении дозирования фосфатов фосфаты, входящие в состав отложений, частично переходят в раствор.

Известно, что недостаток или избыток фосфатов в котловой воде может приводить к образованию отложений. В частности, при несоблюдении соотношения фосфат-ионов к ионам кальция и пониженном значении pH, при одновременном образовании гидросилапатита $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$ возможно образование фосфата кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Также при исследовании состава отложений на поверхностях теплообмена был обнаружен марицит $(\text{NaFePO}_4)^2$.

При прекращении дозирования фосфатов в котловую воду продолжают поступать реакционно способные ионы кальция и аммиака, используемые для поддержания значения pH питательной воды. И на поверхности труб идет реакция фосфата кальция и марицита с ионами кальция с образованием гидросилапатита.

Заключение

Проведенные исследования и расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Концентрации фосфатов по отсекам зависят от нагрузки (паропроизводительности) котла и, как следствие, от топочного режима.

2. Кратность упаривания по отсекам и общая кратность упаривания зависят от нагрузки. При равных общих кратностях упаривания по сторонам барабана котла кратности упаривания по отсекам не одинаковы. При изменении режима работы котла кратности упаривания фосфатов по отсекам меняются, что приводит к изменению концентраций фосфатов по отсекам.

² Дули Б. Значение защитной оксидной пленки для предотвращения повреждений котельных труб на тепловых электростанциях»: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1996.

Таблица 4. Расчетные и измеренные значения концентрации фосфатов

Время, ч	Чистый отсек		Солевой левый		Солевой правый	
	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{изм}}, \text{мг/дм}^3$	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{расч}}, \text{мг/дм}^3$	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{изм}}, \text{мг/дм}^3$	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{расч}}, \text{мг/дм}^3$	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{изм}}, \text{мг/дм}^3$	$[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{расч}}, \text{мг/дм}^3$
0	2	2	25	25	30	30
1	2	1	25	12,5	30	15
3	1	0,252	20	3,15	25	3,78
6	<1	0,03	15	0,375	15	0,45
16	0,150	0	4	0	10	0

3. Изменение концентраций фосфатов по отсекам котла связано в первую очередь с режимными параметрами котла, которые влияют на кратности упаривания фосфатов по отсекам.

4. После отключения дозирования фосфатов фосфаты, находящиеся в отложениях, переходят в водяной объем отсеков.

Список литературы

1. **Исследование** влияния концентрации фосфатов в котловой воде на электропроводность и pH / Т.И. Петрова, В.И. Кашинский, А.Е. Верховский и др. // Теплоэнергетика. – 2007. – № 7. – С. 6–9.

2. **Маргулова Т.Х.** Методы получения чистого пара. – М.; Л.: ГЭИ, 1953.

3. **Воронов В.Н., Краснорядцев И.М.** Проблемы математического моделирования теплогидравлических и водно-химических процессов в парогенераторах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. – 1990. – №10. – С. 24–28.

4. **Федоров А.И.** Исследование гидравлики и распределение примесей в циркуляционных контурах и барабане (чистый отсек) котла высокого давления // Теплоэнергетика. – 2004. – № 2. – С. 52–57.

5. **Ларин Б.М., Бушуев Е.Н.** Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 310 с.

Верховский Андрей Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефон (495) 362-71-71.

Морыганова Юлия Августовна,

ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
кандидат химических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефон (495) 362-71-71,
e-mail: moryganova@mail.ru

Аунг Мью Кхин,

ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
кандидат технических наук, аспирант кафедры тепловых электрических станций,
телефон (495) 362-71-71.

References

1. Petrova, T.I., Kashinskiy, V.I., Verkhovskiy, A.E. Issledovanie vliyaniya kontsentratsii fosfatov v kotlovoy vode na elektroprovodnost' i rN [Research into the influence of phosphate concentration in boiler water on electrical conductivity and pH]. *Teploenergetika*, 2007, no. 7, pp. 6–9.

2. Margulova, T.Kh. *Metody polucheniya chistogo para* [Techniques of obtaining pure steam]. Moscow; Leningrad, GEI, 1953.

3. Voronov, V.N., Krasnoryadsev, I.M. Problemy matematicheskogo modelirovaniya teplogidravlicheskih i vodno-khimicheskikh protsessov v parogeneratorakh AES s VVER [Problems of mathematical modeling of thermohydraulic and water-chemistry processes in steam generators of nuclear power plants equipped with pressurized water reactors]. *Teploenergetika*, 1990, no. 10, pp. 24–28.

4. Fedorov, A.I. Issledovanie gidravliki i raspredelenie primesey v tsirkulyatsionnykh konturakh i barabane (chistyy otsek) kotla vysokogo davleniya [Research into hydraulics and distribution of impurities in the water circuits and the drum (clean compartment) of high-pressure boilers]. *Teploenergetika*, 2004, no. 2, pp. 52–57.

5. Larin, B.M., Bushuev, E.N. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tehnologicheskikh protsessov obrabotki teplonositelya na TES i AES* [Fundamentals of mathematic modeling of chemical technology processes of coolant treatment at heat and nuclear power plants]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2009. 310 p.