

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,  
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА  
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ОБОБЩЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ  
И ТЕПЛОХИМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СЕПАРАЦИОННЫХ  
УСТРОЙСТВАХ, ВЫНОСНЫХ СОЛЕВЫХ ОТСЕКАХ  
И ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРАХ КОТЛОВ ТЭС<sup>1</sup>**

© 2021 г. А. И. Фёдоров\*

*Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия*

*\*e-mail: a.fedorov.vti@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.10.2020 г.

После доработки 06.11.2020 г.

Принята к публикации 18.11.2020 г.

Представлены результаты исследований гидравлического и теплохимического режимов во внутрикотловых устройствах барабанных котлов ТЭС. Приведены данные солесодержания котловой воды в солевом отсеке, имеющем две пары выносных циклонов на сторону котла, замкнутых на одну экранную поверхность нагрева. Показано, что в контуре дальнего циклона (по ходу воды) концентрация солей в 3 раза выше, чем в ближнем циклоне. При изучении гидравлического и теплохимического режима в барабанах установлено, что для исключения солевых перекосов в барабане место запитки циркуляционного контура и ввод пароводяной смеси должны быть разнесены не менее чем на два-три продольных шага между рядами опускных труб. Разработана и экспериментально проверена методика расчета схем ступенчатого испарения с двусторонними солевыми отсеками. Показано, что существующая методика не отражает истинное распределение концентрации солей в ступенях испарения. Приведены результаты исследований линий солевой кратности, позволившие уточнить методику их расчета и оптимизировать место включения их в циркуляционные контуры котла. На основании результатов исследований и математического моделирования физико-химических процессов в барабане с использованием программного комплекса ANSYS Fluent разработана эффективная внутрикотловая схема без барботажно-промывочных устройств для барабанов высокого давления котла-утилизатора ПК-85, позволившая получить качественный пар при превышении норм в питательной воде по натрию (Na) в 4 раза, а по содержанию оксида кремния (SiO<sub>2</sub>) в котловой воде в 2 раза при непрерывной промывке до 0.5–1.0%.

*Ключевые слова:* барабанные котлы, гидравлические и теплохимические режимы, сепарационные и барботажно-промывочные устройства, выносные солевые отсеки, циркуляционные контуры, турбулентная диффузия, ступенчатое испарение, методики расчета, перемешивание, модели процессов, пульсирующие циркуляционные характеристики, линии солевой кратности

**DOI:** 10.1134/S0040363621060035

Исследованиями гидравлических и теплохимических режимов в сепарационных устройствах, выносных солевых отсеках и циркуляционных контурах барабанных котлов занимались специалисты ВТИ [1], ОРГРЭС [2, 3], ЦКТИ [4–7], МЭИ [8, 9]. Несмотря на это, на многих барабанных котлах ТЭС не выполняются нормы качества пара, а также наблюдаются повреждения поверхностей нагрева, солевые перекосы и другие неполадки. Это вызвано, в частности, и недостаточной изученностью процессов во внутрикотловых устройствах, особенно при наличии двух пар циклонов с обеих сторон котла, каждый из которых

замкнут на одну экранную поверхность нагрева. Методика расчета схем ступенчатого испарения недостаточно точно отражает распределение концентрации солей в таких системах. Штатный химический контроль не всегда обеспечивает выявление солевых перекосов в барабанах и солевых отсеках (СО). Для повышения надежности и эффективности барабанных котлов ТЭС при их проектировании и эксплуатации весьма актуально комплексное исследование гидравлических и теплохимических режимов в циркуляционных контурах, барабанах, различных выносных СО.

В статье обобщены результаты исследований, длительное время проводившихся в ВТИ, которые были частично опубликованы в [10–17].

<sup>1</sup> В статье использованы обозначения параметров, принятые автором.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА В БАРАБАНАХ

Режим течения воды в барабане определяется критерием Рейнольдса

$$Re_{\delta} = \frac{w_{\delta} d_{\text{экв}}}{\nu'}$$

Здесь  $w_{\delta}$  – продольная скорость воды в барабане, м/с;  $\nu'$  – кинематический коэффициент вязкости воды, м<sup>2</sup>/с;  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр барабана, м, который при заполнении водой половины сечения равен

$$d_{\text{экв}} = \frac{4F_{\delta}}{\Pi} = \frac{\pi d}{\pi + 2},$$

где  $F_{\delta}$  – площадь живого сечения барабана, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – смоченный периметр, м;  $d$  – диаметр барабана, м.

Известно, что установившееся развитое турбулентное течение в трубах возникает, когда критерий Рейнольдса превышает критическое значение  $10^4$  [18]. Это условие выполняется во всех барабанных котлах высокого давления (ВД).

Выравнивание концентраций солей в барабане и солевом отсеке принципиально возможно в результате молекулярной (концентрационной) диффузии, конвективной диффузии (переноса вещества вместе с движущейся жидкостью), турбулентной диффузии и перемешивания воды в барабане высокоскоростными потоками среды циркуляционных контуров.

При развитом турбулентном течении жидкости в барабане ( $Re_{\delta} > 10^4$ ) процессами молекулярной и конвективной диффузии можно пренебречь ввиду их незначительности по сравнению с турбулентной диффузией [19, 20].

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО И ТЕПЛОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ВЫНОСНОМ СОЛЕВОМ ОТСЕКЕ

Результаты исследования циркуляционных характеристик СО котла ТПЕ-208, схема экспериментального контроля которого представлена на рис. 1, показаны на рис. 2 (в зависимости от времени с записью показаний через 1 с в течение 5 мин при паропроизводительности котла и солевого отсека  $D_k = 340$  т/ч,  $D_{CO} = 25$  т/ч). Черными треугольниками (см. рис. 1) обозначены места размещения приборов для измерения скорости среды в трубе (скоростная трубка). В табл. 1 приведен пример обработки этих характеристик.

Из рис. 3 видно, что концентрации солей в контуре дальнего циклона существенно выше, чем в контуре ближнего.

Из уравнения солевого баланса дальнего циклона (третья ступень) при перебросе в ближний циклон (вторая ступень) можно получить значение относительного переброса:

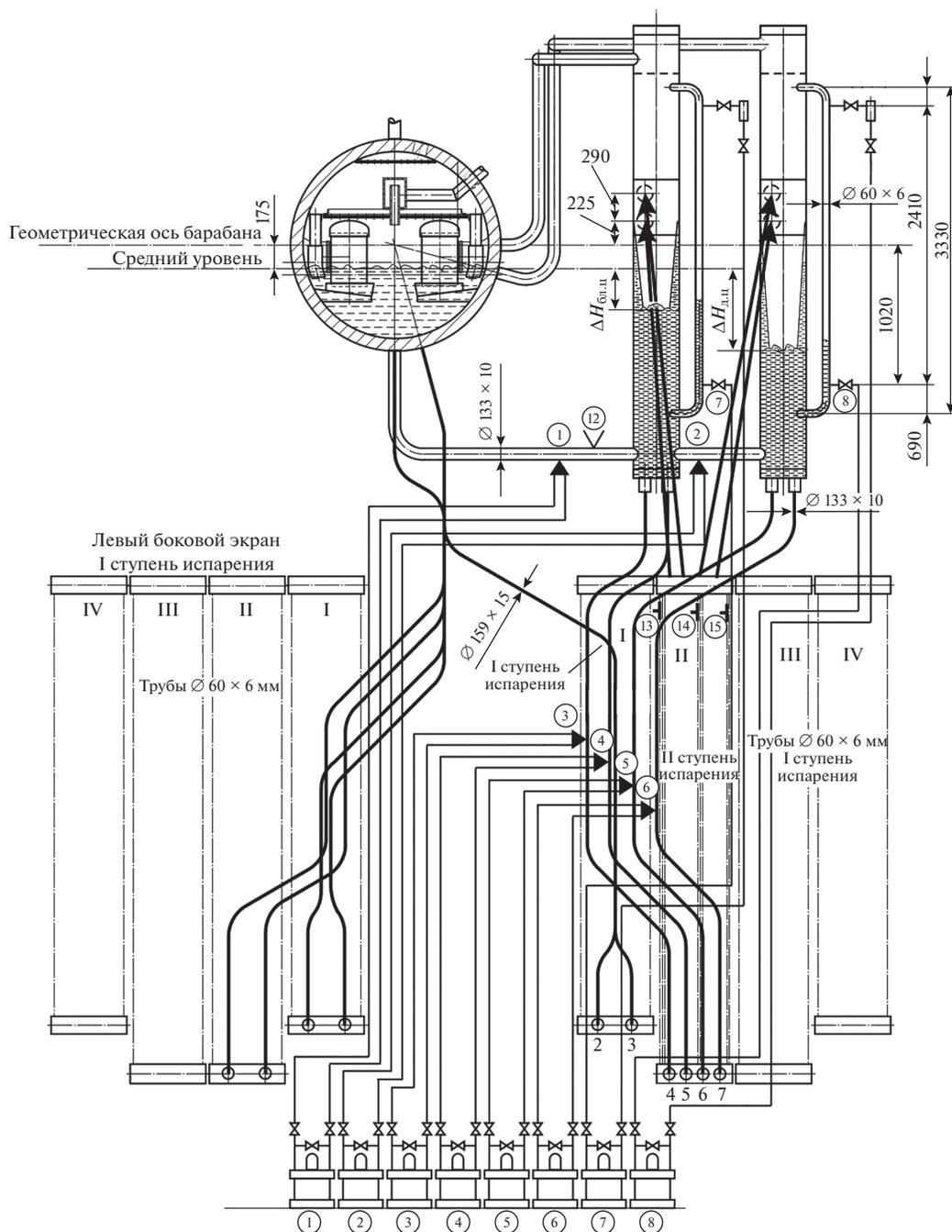
$$r = \frac{n_{III} S_{KB_{II}} - P(S_{н.пр} - S_{KB_{II}})}{S_{н.пр} - S_{KB_{II}}} = \frac{n_{III}}{K_y^{III} - 1} - P, \quad (1)$$

где  $r = (G_{\text{пер}}/D_k) \times 100\%$  – относительный переброс;  $G_{\text{пер}}$  – абсолютный переток (переброс) котловой воды из дальнего циклона в ближний, т/ч;  $D_k$  – паропроизводительность котла, т/ч;  $n_{III}$  – относительная паропроизводительность третьей ступени испарения;  $S_{KB_{II}}$ ,  $S_{н.пр}$  – солесодержание КВ второй ступени испарения и непрерывной продувки;  $P$  – непрерывная продувка, %;  $K_y^{III} = S_{н.пр}/S_{KB_{II}}$  – кратность упаривания между третьей и второй ступенями испарения.

На рис. 4 приведена зависимость абсолютного перетока (переброса)  $G_{\text{пер}}$  котловой воды из даль-

**Таблица 1.** Результаты обработки пульсирующих циркуляционных характеристик солевого отсека в течение 5 мин ( $D_k = 340$  т/ч,  $D_{CO} = 25$  т/ч,  $p_{\delta} = 14.42$  МПа, период от 11:30 до 11:35, запись показаний с периодичностью 1 с, количество измерений – 300)

Параметр	Расход воды, т/ч		
	в опускных трубах солевого отсека $\sum G_{оп}$	через ближний циклон $\sum G_{оп}^{бл.ц}$	через дальний циклон $\sum G_{оп}^{д.ц}$
Среднее арифметическое значение	192.47	101.20	91.27
Максимальное/минимальное истинные значения параметра	217.16/160.29	118.18/74.52	103.83/74.14
Максимальное/минимальное значения пульсационной составляющей	24.69/–32.18	16.98/–26.68	12.56/–17.13
Среднеквадратичное отклонение $\sigma'$ , т/ч	9.27	7.3	5.41
Степень пульсаций $\epsilon$ , %	4.82	7.21	5.93
Средняя частота пульсаций, мин <sup>–1</sup> (Гц)	18.4 (0.307)	16.2 (0.27)	16.2 (0.27)



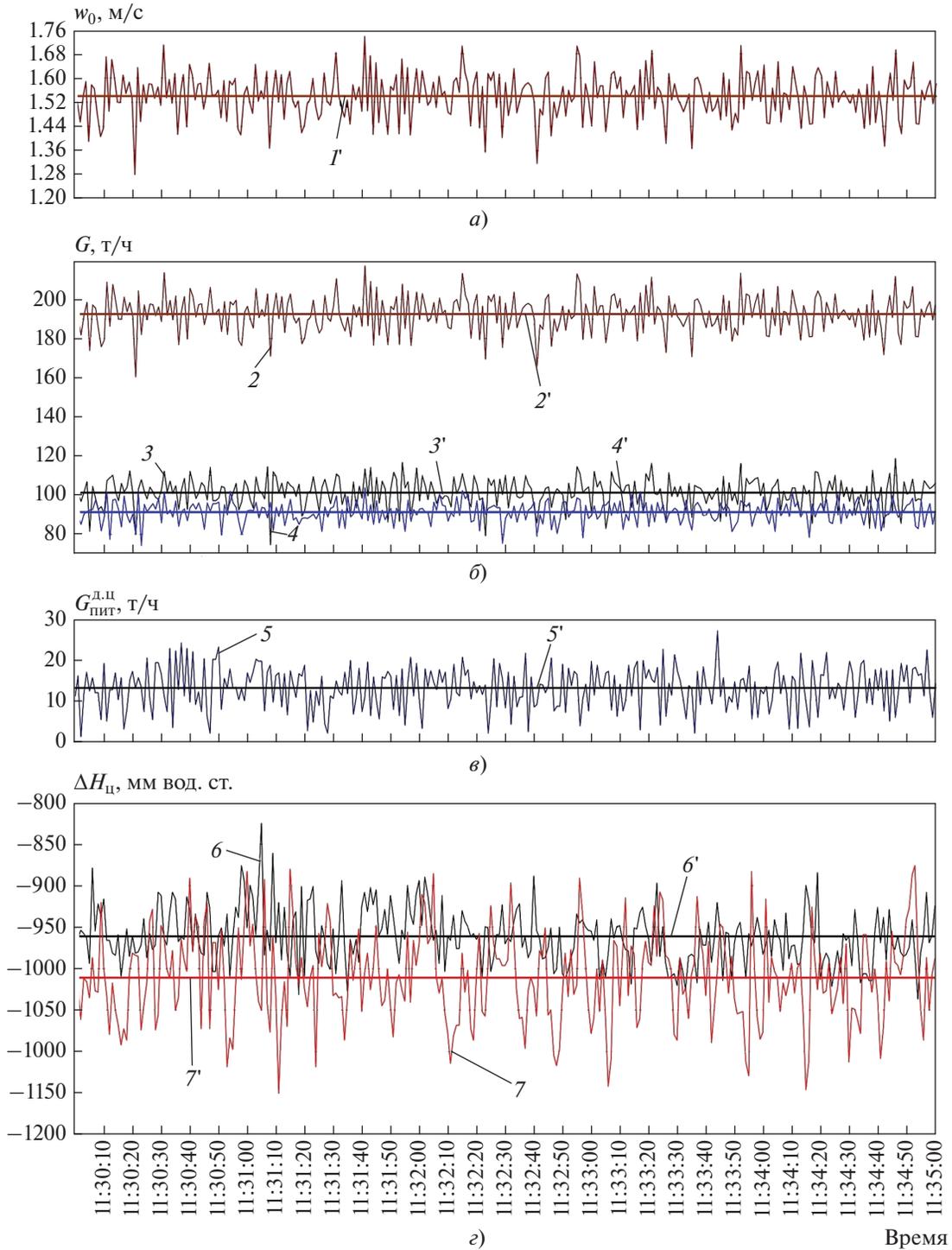
**Рис. 1.** Схема экспериментального контроля солевого отсека котла ТПЕ-208.

▲ – скоростная трубка; V – отбор проб котловой воды (КВ); I–IV– номера панелей; 2–7 – номера труб; цифры в кружочках – номера дифманометров, которые видны на схеме

него циклона в ближний. Светлые маркеры (2) и штриховая линия соответствуют среднеквадратичному отклонению расхода воды через дальний циклон при различных паровых нагрузках котла. Из рисунка видно, что значения перебросов, рассчитанные по солевому балансу (1) (сплошная линия) и полученные на основании статистической обработки пульсирующих циркуляционных харак-

теристик (среднеквадратичное отклонение), близки между собой. Расхождение составляет 8–17%, что допустимо для промышленных испытаний.

При работе котлов ВД на стационарных режимах во всех циркуляционных контурах СО с естественной циркуляцией происходят пульсации скоростей, расходов и других параметров циркуляции. Степень пульсаций  $\epsilon$  (отношение средне-



**Рис. 2.** Циркуляционные характеристики солевого отсека при  $D_k = 340$  т/ч,  $p_6 = 14.7$  МПа,  $D_{CO} = 25$  т/ч, время  $\tau = 5$  мин.  $a$  – скорость циркуляции в экранных трубах  $w_0$ ;  $I' - w_0^{cp} = 1.54$  м/с;  $б$  – суммарный расход в опускных трубах ближнего  $\sum G_{оп}^{бл.ц}$  (3) и дальнего  $\sum G_{оп}^{д.ц}$  (4) циклонов и солевого отсека  $\sum G_{CO}$  (2);  $2' - \sum G_{CO}^{cp} = 192.47$  т/ч;  $3' - (\sum G_{оп}^{бл.ц})^{cp} = 101.2$  т/ч;  $4' - (\sum G_{оп}^{д.ц})^{cp} = 91.27$  т/ч;  $в$  – расход воды в питательной трубе дальнего циклона  $G_{пит}^{д.ц}$  (5);  $5' - (G_{пит}^{д.ц})^{cp} = 13.05$  т/ч;  $г$  – уровни воды в ближнем  $\Delta H_{бл.ц}$  (6) и дальнем  $\Delta H_{д.ц}$  (7) циклонах;  $6' - \Delta H_{бл.ц}^{cp} = -961.03$  мм;  $7' - \Delta H_{д.ц}^{cp} = -1011.01$  мм

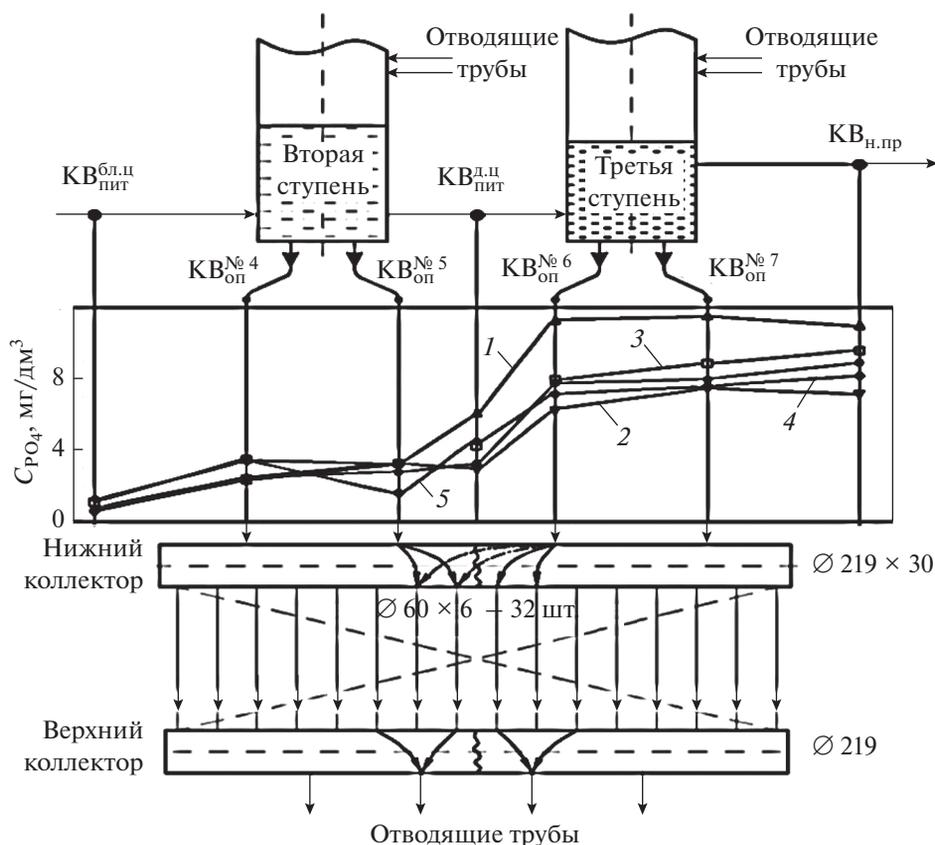


Рис. 3. Распределение концентрации солей  $C_{PO_4}$  в солевом отсеке.

$KV_{пит}^{бл.ц}$ ,  $KV_{оп}^{№4}$ ,  $KV_{оп}^{№5}$ ,  $KV_{оп}^{№6}$ ,  $KV_{оп}^{№7}$ ,  $KV_{пит}^{д.ц}$ ,  $KV_{н.пр}$  – концентрации солей  $PO_4$  в котловых водах питания ближнего циклона, опускных трубах № 4–7, питания дальнего циклона и непрерывной продувки;  
 1 –  $D_k = 323$  т/ч,  $D_{CO} = 27.9$  т/ч,  $P = 0.50\%$ ; 2 –  $D_k = 273$  т/ч,  $D_{CO} = 21.5$  т/ч,  $P = 0.77\%$ ; 3 –  $D_k = 198$  т/ч,  $D_{CO} = 15.0$  т/ч,  $P = 1.10\%$ ; 4 –  $D_k = 272$  т/ч,  $D_{CO} = 20.8$  т/ч,  $P = 1.00\%$ ; 5 –  $D_k = 332$  т/ч,  $D_{CO} = 24.3$  т/ч,  $P = 0.49\%$

квадратичного отклонения к среднему арифметическому значению параметра), как правило, не превышает 10%.

Было установлено, что постоянные циркуляционные пульсации расхода воды в опускных трубах приводят к колебанию кратности циркуляции в СО приблизительно  $\pm 1$ .

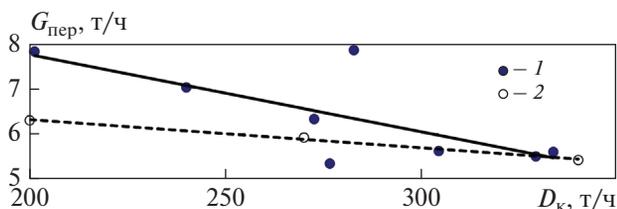


Рис. 4. Зависимость абсолютного перетока (переброса) котловой воды из третьей ступени во вторую от паропроизводительности.  
 1 – по фосфатам; 2 – среднеквадратичное отклонение расхода воды в опускных трубах дальнего циклона

В симметричных СО с двумя выносными циклонами (ВЦ), где каждый СО замкнут на общую экранную поверхность нагрева с верхним и нижним коллекторами без перегородок, концентрация солей распределяется так, что в контуре ближнего циклона (условно вторая ступень испарения) она приблизительно в 2 раза выше, чем была бы во второй ступени при трехступенчатой схеме испарения КВ, а в контуре дальнего циклона концентрация солей приблизительно в 3 раза выше, чем в контуре ближнего циклона (см. рис. 3). Это вызвано перебросом части КВ контура дальнего циклона в контур ближнего циклона по экранным трубами вследствие циркуляционных пульсаций.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО И ТЕПЛОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ В БАРАБАНАХ И ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРАХ

В процессе исследований внутрикотловых схем котлов, работающих со значительным солевым перекосом между солевыми отсеками, было уста-

**Таблица 2.** Зависимость отношения солесодержания котловой воды в экране к солесодержанию в опускной системе от кратности циркуляции в экране

$K_3$	2	3	4	5	6	8
$S_{КВ}^э/S_{КВ}^{оп}$	2.00	1.50	1.30	1.25	1.20	1.14

новлено, что даже при очень небольших продольных скоростях воды в барабане, равных 1.290 см/с при номинальной нагрузке и 0.645 см/с при минимальной, скорость турбулентной диффузии недостаточна для выравнивания концентрации солей по длине барабана.

Эксперименты на котлах также показали, что при неправильной раздаче фосфатов по длине барабана через коллектор турбулентная диффузия не приводит к выравниванию концентрации солей по длине барабана.

Уравнение солевого баланса для циркуляционного контура

$$S_{КВ}^{оп} \sum G_{оп} = S_{КВ}^э (\sum G_{оп} - D_э),$$

где  $S_{КВ}^{оп}$  и  $S_{КВ}^э$  – солесодержание КВ в опускных и экранных трубах;  $\sum G_{оп}$  – расход воды в опускных трубах;  $D_э$  – паропроизводительность экрана.

С учетом того что кратность циркуляции среды в экране  $K_3 = \frac{\sum G_{оп}}{D_э}$ , путем преобразований можно получить

$$\frac{S_{КВ}^э}{S_{КВ}^{оп}} = \frac{K_3}{K_3 - 1}.$$

Значения  $S_{КВ}^э/S_{КВ}^{оп}$  при различных кратностях циркуляции  $K_3$  представлены в табл. 2.

Все циркуляционные контуры, замкнутые на барабан, работают с пульсациями, аналогичными приведенным на рис. 2.

Данные по распределению концентрации солей по длине барабана представлены на рис. 5.

Равномерность распределения концентрации солей в барабане, а значит, и в циркуляционных контурах зависит (по мере увеличения значимости): от сепарационной схемы барабана;

схемы подвода и распределения питательной и промывочной воды на барботажно-промывочном устройстве (БПУ);

равномерности раздачи фосфатов по длине барабана;

разноса по длине барабана мест входа воды в опускные трубы и ввода пароводяной среды (ПВС) в барабан, при этом чем больше расстояние переброса и больше этих перебросов, тем равномер-

нее распределена концентрация солей в барабане, а значит, и в циркуляционных контурах.

Турбулентная диффузия не является определяющим фактором выравнивания концентрации солей по барабану.

С учетом всего этого необходимо:

исключить применение циркуляционных схем, в которых место входа воды в опускные трубы и ввод ПВС находятся в одном вертикальном сечении барабана;

осуществлять переброс среды от места запитки из барабана до ввода в него на расстояние двух-трех продольных шагов между рядами опускных труб, особенно в центральной части барабана при двухсторонних СО (внутрибарабанных или выносных).

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СХЕМ СТУПЕНЧАТОГО ИСПАРЕНИЯ С ДВУСТОРОННИМИ СОЛЕВЫМИ ОТСЕКАМИ

В литературе [1, 4, 8] приведены расчеты схем ступенчатого испарения по упрощенной методике – как бы для односторонних СО (т.е. при допущении, что левый и правый солевые отсеки работают одинаково), однако в большинстве барабанных котлов ТЭС они двухсторонние.

Возможны следующие основные режимы работы внутрикотловых схем:

без переброса воды из СО в чистый отсек (ЧО);  
с одинаковым перебросом из обоих СО в ЧО;  
с перебросом из одного СО в ЧО;

с перебросом из обоих (левого и правого) СО, но эти относительные перебросы не равны между собой, т.е.  $r^л \neq r^п$ ;

с различной относительной паропроизводительностью левых и правых СО, когда  $n_{СО}^л \neq n_{СО}^п$ ;

с различной концентрацией солей в КВ в левой и правой частях барабана, когда  $S_{КВ}^л \neq S_{КВ}^п$ .

По имеющимся методикам можно рассчитать внутрикотловую схему только для первых двух режимов, а для других они не применимы.

Для схемы ступенчатого испарения с перебросом воды из правого СО, представленной на рис. 6, уравнения солевого баланса можно записать следующим образом:

для котла в целом

$$(100 + P) S_{ПВ} = 0.5 P S_{КВ_л}^л + 0.5 P S_{КВ_п}^п; \quad (2)$$

для чистого отсека

$$(100 + P) S_{ПВ} + r^п S_{КВ_п}^п = (r^п + 0.5 n_{л1} + 0.5 P) \times \times S_{КВ_л}^п + (0.5 n_{л1} + 0.5 P) S_{КВ_л}^л; \quad (3)$$



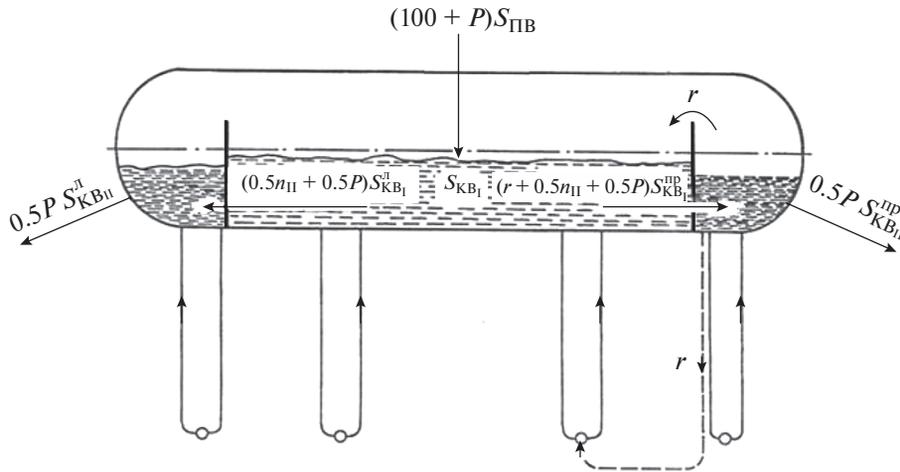


Рис. 6. Схема котла с двухступенчатым испарением и двусторонними солевыми отсеками при перебросе только из одного правого солевого отсека. Формулами показан расчет солесодержания, которое поступает в котел с продувкой

врат расхода переброса и неполный возврат солей, часть которых уходит в другой СО;

солевой перекокс между ступенями испарения возникает, например, из-за того, что в правый СО возвращаются не все соли, которые “ушли” с перебросом, равным  $r^{пп} S_{КВ_{II}}^{пп}$ ;

невозврат солей в правый СО — это как бы дополнительная его продувка, поэтому концентрация солей в нем становится меньше, чем при схеме без переброса, в которой она равна  $\frac{100 + P}{P} S_{ПВ}$ .

Рассчитав солевой баланс для двусторонних выносных СО с двумя выносными циклонами с каждой стороны и приняв по экспериментальным данным с учетом циркуляционных пульсаций и наличия односторонней линии солевой кратности (ЛСК) из ближнего левого циклона следующие значения:  $P = 1.0\%$ ;  $n_{CO} = 10\%$ ;  $n_{II} = n_{I} = 5\%$ ;  $r_{ЛСК} = 1\%$  (переброс по ЛСК);  $S_{ПВ} = 1.0$  мг/дм<sup>3</sup>;  $S_{КВ_{I}}^л = S_{КВ_{I}}^{пп} = S_{КВ_{I}}$ ,  $r_{пер}^л = r_{пер}^{пп} = r_{пер} = 1.5\%$ , — можно получить выражения для солесодержания отсеков:

$$S_{КВ_{III}}^л = 6.89 \times 11.29 S_{ПВ} = 77.8 S_{ПВ};$$

$$S_{КВ_{III}}^{пп} = 11 \times 11.29 S_{ПВ} = 124.2 S_{ПВ};$$

$$S_{КВ_{II}}^л = 3.06 \times 11.29 S_{ПВ} = 34.55 S_{ПВ};$$

$$S_{КВ_{II}}^{пп} = 4.89 \times 11.29 S_{ПВ} = 55.2 S_{ПВ},$$

из которых следует, что  $S_{КВ_{III}}^{пп} / S_{КВ_{III}}^л = 1.59$ ,  $S_{КВ_{II}}^{пп} / S_{КВ_{II}}^л = 1.6$ , т.е. существует солевой перекокс между отсеками, равный 60%.

Уточненная методика расчета схем ступенчатого испарения позволяет учитывать: наличие в них двух симметричных солевого отсеков, в том числе с двумя выносными циклонами, замкнутых каждый на одну экранную поверхность; наличие схем включения ЛСК и линий солевой выравнивания; места вывода непрерывной продувки и перебросов между солевым и чистым отсеками.

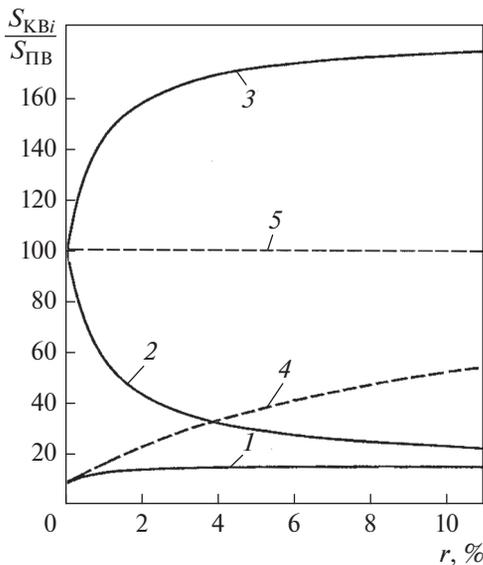


Рис. 7. Зависимость кратности упаривания  $K_y = S_{КВ_i} / S_{ПВ}$  ( $i = 1$  для ЧО,  $i = 2$  для второй ступени испарения) в ступенях испарения от относительного переброса  $r$  воды из солевого отсека в чистый. Сплошные линии — двусторонний солевой отсек с перебросом только из правого СО: 1 — чистый; 2, 3 — правый и левый солевые отсеки; штриховые линии — односторонний солевой отсек: 4 — чистый; 5 — солевой

### АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛИНИЙ СОЛЕВОЙ КРАТНОСТИ

Анализ применения ЛСК в схемах ступенчатого испарения котлов ВД показал, что низкая эффективность ЛСК на некоторых ТЭС объясняется прежде всего тем, что забор КВ выполнялся из ближних по ходу воды циклонов, где концентрация солей почти в 2.5 раза ниже, чем в дальних. Оказалось, что наличие односторонней ЛСК вызывает солевой перекокс между СО. Отмечались случаи, когда для выполнения расчетных условий по солевой кратности  $C_{\text{PO}_4}^{\text{KBII}} / C_{\text{PO}_4}^{\text{KB}}$  требовалось более 20 ч [21].

Исследования на котле ТПЕ-208 показали, что при правильном включении ЛСК (труба типоразмером 60 × 6 мм) эффективно работает и позволяет снижать ступенчатость испарения и кратность концентраций по фосфатам между ЧО и СО.

Забор воды в ЛСК всегда должен выполняться из зон с наивысшей концентрацией солей в СО, т.е. из дальнего по ходу воды выносного циклона. Для исключения солевых перекоков по длине барабана воду из ЛСК следует выводить в нижние коллекторы панелей ЧО следующим образом:

при односторонних СО – в панель экрана, которая заводит пароводяную смесь в торец барабана, противоположный трубе питания СО;

при двусторонних СО – в левую и правую половины барабана на расстоянии приблизительно 1/4 его отсчитываемой от середины длины.

Более подробные сведения о результатах исследования ЛСК приведены в работе [14].

Зона наивысших концентраций солей до смешения котловой воды с питательной оптимальна для места расположения вывода непрерывной продувки котлов [16].

### ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ВНУТРИКОТЛОВОЙ СХЕМЫ БЕЗ БПУ ДЛЯ БАРАБАНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПК-85

Внутрибарабанная схема котла-утилизатора (КУ) ПК-85 была разработана с учетом результатов исследований при следующих конструктивных решениях: непрерывная продувка выводится из зоны наиболее концентрированной КВ, т.е. до смешения с ПВ; подвод ПВ выполняется в торцевые части барабана, вне зоны влияния непрерывной продувки; отвод КВ в опускные трубы осуществляется в торцевых частях барабана после смешения котловой упаренной воды и ПВ.

Гидравлическая, температурная и концентрационная обстановка в водяном объеме барабана

при  $p_6 = 15.2$  МПа и температуре воды в барабане  $t_5 = 343^\circ\text{C}$  будет характеризоваться так:

$$\text{Pr} = \nu' / a = 1.315; \quad \text{Re}_6 = \frac{w_6 d_3}{\nu'} = 1.2 \times 10^6,$$

где  $\text{Pr}$  – число Прандтля;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Следовательно, в барабане будет существовать развитое турбулентное течение, так как критерий Рейнольдса превышает критическое значение  $10^4$ .

Математическое моделирование физических процессов в водяном объеме барабана было выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Объемная модель барабана разбивалась на тетраэдры (элементы) с образованием сетки, общее число сетчатых элементов модели составляло 1130131. Система уравнений, описывающих движение жидкости, теплопередачу и диффузию примесей в турбулентном потоке, решалась методом конечных объемов. На рис. 8 показано распределение концентрации солей в водяном объеме барабана (также были получены распределения скоростей и температур, которые здесь не приводятся).

Из анализа этих расчетов следует:

запроектированный коллектор с системой выпускных отверстий по верхней образующей позволяет равномерно распределять ПВ по объему барабана, в результате чего температура стенки барабана, кромки опускного стояка и самого стояка становится равной  $t_5$ ;

КВ до питательного коллектора, по течению потока, не смешивается с ПВ, поэтому концентрация в ней солей равна таковой в упаренной КВ и непрерывная продувка “работает” на этой КВ;

выравнивание концентрации солей из-за турбулентной диффузии “вверх по течению” не происходит. Даже небольшая продольная скорость потока, равная 0.139 м/с, превышает скорость турбулентной диффузии примесей, которая направлена во все стороны, в том числе и вверх против течения.

Эти данные хорошо коррелируют с результатами опытов на котлах ТП-80, ТПЕ-208 и ТГ-104.

На основании описанных исследований была разработана оптимальная конструкция внутрикотловых устройств барабана высокого давления (БВД) котла ПК-85, показанная на рис. 9. Котел-утилизатор такой конструкции был установлен на ТЭЦ для работы в составе ПГУ, включающей в себя две ГТУ GT13E2 Alstom и два КУ. Испытания спроектированного таким образом котла на электростанции подтвердили, что:

разработанные внутрикотловые устройства БВД выдают пар, удовлетворяющий нормам при номинальной нагрузке КУ, среднем уровне воды в барабане и непрерывной продувке 0.5–1.0%;

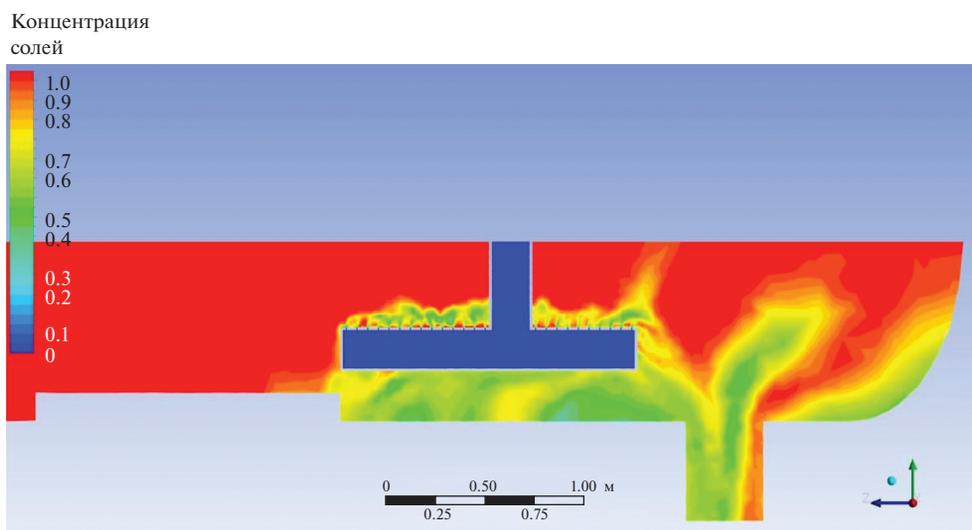


Рис. 8. Распределение концентрации солей в водяном объеме барабана

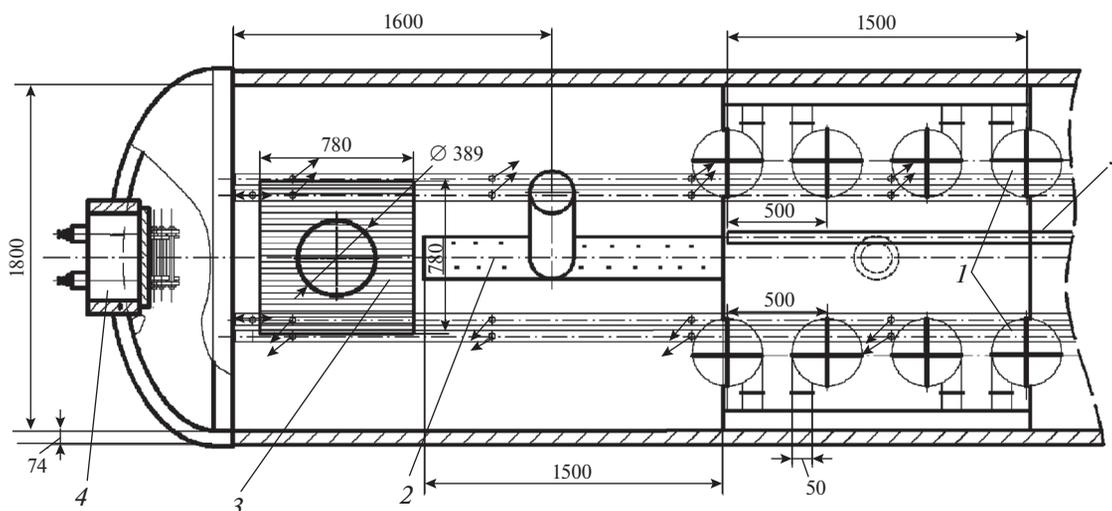


Рис. 9. Внутрибарабанное устройство котла ПК-85 (поперечный разрез).

1 – внутрибарабанные циклоны; 2 – коллектор подвода ПВ; 3 – противокавитационная решетка; 4 – люк-лаз для проведения осмотров и ремонта; 5 – непрерывная продувка

качество пара БВД по Na обеспечивается даже при концентрации его в ПВ, достигающей  $200 \text{ мкг/дм}^3$  при норме до  $50 \text{ мкг/дм}^3$ , установленной правилами технической эксплуатации (ПТЭ);

влажность отпускаемого из котла пара при  $P = 1\%$  составляет  $0.025\%$ ;

качество пара по  $\text{SiO}_2$  обеспечивается, даже если его содержание превышает нормированное для КВ значение ( $200 \text{ мкг/дм}^3$  [22]) в 2 раза, т.е. приближается к  $400 \text{ мкг/дм}^3$ ;

качество пара по Na и  $\text{SiO}_2$  обеспечивается при удельной электрической проводимости КВ до  $380 \text{ мкСм/см}$  при норме  $10\text{--}30 \text{ мкСм/см}$  [22].

## ВЫВОДЫ

1. Основное влияние на распределение концентрации солей в барабанах оказывают потоки в циркуляционных контурах при незначительном влиянии турбулентной диффузии. При турбулентном режиме течения в исследованных барабанах  $[\text{Re}_\theta = (7.3\text{--}13.0) \times 10^4]$  и небольших продольных скоростях воды, равных  $0.84\text{--}1.7 \text{ см/с}$ , скорость турбулентной диффузии солей меньше продольных скоростей, поэтому уменьшения или увеличения концентрации солей при перемещении против продольного течения воды в барабане не происходит.

2. Разработанная и экспериментально проверенная методика расчета схем ступенчатого испарения для двусторонних солевых отсеков при перебросах из них среды в чистый отсек по пароперепускным окнам (трубам), ЛСК и опускным трубам позволила уточнить имевшиеся методики расчета распределения концентрации солей в ступенях испарения.

3. В разработанной модели распределения концентрации солей в выносных СО с двумя циклонами, замкнутых каждый на одну экранную поверхность нагрева, выявлены значительные неравномерности (2.5–3.0) относительной концентрации солей между ближним и дальним циклонами.

4. Выполненные исследования позволили уточнить методики расчета систем с линиями солевого выравнивания [17] и линиями солевой кратности между солевыми и чистыми отсеками, а также оптимизировать их включение в циркуляционные контуры котла.

5. Результаты экспериментальных и расчетных исследований котлов с давлением в барабане до 15.2 МПа показали возможность их надежной эксплуатации без барботажно-промывочного устройства при соблюдении норм ПТЭ по  $\text{SiO}_2$  в питательной воде и непрерывной продувке не менее 0.5%.

6. Разработанная и обоснованная расчетами эффективная внутрикотловая схема для барабана высокого давления позволяет без применения перегородок организовать в его водяном объеме зону наивысших концентраций солей, из которой выполняется продувка.

7. Для исключения солевых перекосов по длине барабанов рекомендовано при проектировании предусматривать перебросы среды от места запитки в опускные трубы и ввода среды в барабан после испарительных поверхностей нагрева на расстоянии двух-трех продольных шагов между рядами опускных труб.

барабанных котлов высокого давления. Введ. в действие 01.08.1976. М.: М-во энергетического машиностроения, 1975.

5. **РД 24.031.121-2012.** Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды: методические указания / О.Л. Анисимова, В.Ф. Петухова, В.Н. Тамбовцева. Утв. приказом № 330 от 17.09.2012. Взамен РД 24.031.121-2007. Введ. в действие 01.01.2013. СПб.: НПО ЦКТИ, 2012.
6. **ОСТ 108.030.03-83.** Циклоны выносные паровых стационарных котлов. Типы. Основные параметры. Конструкция и размеры. Технические требования. Введ. в действие 01.01.1985. М.: Энергомаш, 1983.
7. **РД 24.130.03-88.** Проектирование внутрибарабанных циклонов паровых стационарных котлов: методические указания. Взамен ОСТ 24.838.17-74. Утв. указанием М-ва тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР № ВА-002-1/4209 от 27.12.1988. Введ. в действие 01.01.1990. М.: Минтяжмаш СССР, 1989.
8. **Маргулова Т.Х.** Методы получения чистого пара. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955.
9. **Водный режим тепловых электростанций (обычных и атомных) /** под общ. ред. Т.Х. Маргуловой. М.; Л.: Энергия, 1965.
10. **Фёдоров А.И.** Исследование гидравлики и распределения примесей в циркуляционных контурах и барабане (чистый отсек) котла высокого давления // Теплоэнергетика. 2004. № 2. С. 52–57.
11. **Фёдоров А.И.** Исследование гидравлики и распределения примесей в выносном солевом отсеке котла высокого давления // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 44–53.
12. **Фёдоров А.И.** Выявление и устранение солевых перекосов в барабанных котлах высокого давления // Энергетик. 2005. № 7. С. 18–21.
13. **Фёдоров А.И.** Уточненная методика расчета схем ступенчатого испарения барабанных котлов с выносными солевыми отсеками и ее применение // Электрические станции. 2016. № 2. С. 10–18.
14. **Фёдоров А.И.** Опыт применения и результаты исследований линий регулирования солевой кратности между солевыми и чистыми отсеками в барабанных котлах высокого давления // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 62–68.
15. **Фёдоров А.И.** О целесообразности применения барботажно-промывочных устройств в барабанных котлах высокого давления // Энергетик. 2004. № 1. С. 19–21.
16. **Фёдоров А.И., Баев Д.А.** Исследование и разработка внутрикотловой схемы для барабана высокого давления котла-утилизатора ПК-85 Новогорьковской ТЭЦ // Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы эксплуатации котлов-утилизаторов парогазовых установок”: сб. докл. / под общ. ред. А.Н. Тугова и Ю.А. Радина. Москва, ОАО ВТИ, 26–27 апреля 2018 г. М.: ОАО ВТИ, 2018. С. 132–146.
17. **Фёдоров А.И.** К методике расчета линий солевого выравнивания между солевыми отсеками барабанных котлов ТЭС // Электрические станции. 2021. № 3. С. 57–62.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Котельные установки.** Т. 2: Котельные агрегаты. Вспомогательные устройства и эксплуатация котельных установок: учеб. пособие для вузов / К.Ф. Роддатис, Э.И. Ромм, Н.А. Семенов, Т.Т. Усенко, В.Н. Цыганков; под общ. ред. Э.И. Ромма. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1946.
2. **Ноев В.Н.** Внутрикотловые устройства энергетических паровых котлов с естественной циркуляцией: обзор. М.: Информэнерго, 1973.
3. **Яльшев З.С.** Гидродинамика выносных солевых отсеков паровых котлов / под общ. ред. П.С. Гольденберга, А.И. Мальца, Б.М. Соколова // Наладочные и экспериментальные работы ОРГЭС. Вып. XVII. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. С. 42–51.
4. **РТМ 108.030.05-75.** Расчет и проектирование внутрикотловых схем и сепарационных устройств

18. **Исаченко В.П., Осипова В.Л., Сукомел А.С.** Теплопередача: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1975.
19. **Левич В.Г.** Физико-химическая гидродинамика. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1952.
20. **Кафаров В.В.** Основы массопередачи. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1979.
21. **Беляков И.И.** Анализ внутрикотловых схем барабанных котлов высокого давления // Электрические станции. 2004. № 12. С. 23–34.
22. **СТО 70238424.27.100.013-2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования. Утв. приказом НП ИНВЭЛ № 04 от 16.02.2009. Введ. в действие с 23.02.2009. М.: НП ИНВЭЛ, 2008. <http://docs.cntd.ru/document/1200083776>

## Generalization of the Studies of Hydraulic and Thermochemical Operating Conditions in the Separation Devices, External Salt Compartments, and Circulation Loops of Thermal Power Plant Boilers

**A. I. Fedorov\***

*All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia*

*\*e-mail: a.fedorov.vti@mail.ru*

**Abstract**—The results of studying hydraulic and thermochemical operating conditions of thermal power plant drum boiler's internals are presented. Data on the boiler water's salt content are given for the salt compartment comprising two pairs of external cyclones per boiler side, which are connected to one waterwall. It is shown that the salt content in the distant (along the water flow) cyclone is a factor of three higher than it is in the nearby cyclone. It is found from studying the hydraulic and thermochemical operating conditions in the drums that, in order to exclude salt imbalances in the drum, the circulation loop feeding place and the steam–water mixture inlet should be spaced apart by no less than two to three longitudinal pitches between the downcomer tube rows. A procedure for calculating staged evaporation schemes with double-sided salt compartments is developed and experimentally verified. It is shown that the existing procedure does not reflect the real distribution of salt concentration in the evaporation stages. Results from studies of salt ratio lines are given, which made it possible to refine their calculation procedure and optimize the place of their connection to the boiler circulation loops. Based on the results from studies and mathematical modeling of physicochemical processes in the drum using the ANSYS Fluent software system, an efficient scheme of boiler internals without the use of bubble-cap steam washers is developed for the high-pressure drums of the PK-85 heat recovery steam generator, which made it possible to obtain high-quality steam in using feed water with a sodium content (Na) four times higher than its standardized value and with two times higher than normal content of silicon oxide (SiO<sub>2</sub>) in boiler water during operation with a continuous blowdown rate up to 0.5–1.0%.

**Keywords:** drum boilers, hydraulic and thermochemical operating conditions, separation and bubble-cap steam washers, external salt compartments, circulation loops, turbulent diffusion, staged evaporation, calculation procedures, mixing, process models, pulsating circulation characteristics, salt ratio lines