

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ / NUCLEAR POWER PLANTS, FUEL CYCLE, RADIATION SAFETY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.110>

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВЫХОДА НА РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВХР ПРИ ДОЗИРОВАНИИ АМИНОСОДЕРЖАЩИХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ В КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СХЕМЕ ПОДАЧИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Научная статья

Верховский А.Е.¹, Гаджиев К.Г.^{2,*}, Кьет С.В.³, Гаджиев Д.К.⁴, Умирова Н.Р.⁵

^{1,2,4,5} Московский энергетический институт, Москва, Российская Федерация

³ НПП " Техноприбор", Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vokrugsveta18[at]gmail.com)

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы оценки времени достижения нормируемых показателей ВХР при дозировании корректирующих реагентов в двухконтурный котел-утилизатор, при последовательной подаче питательной воды в контуры. Приведены расчеты времени необходимого для выхода на режимные параметры ВХР при дозировании аминоксодержащих реагентов. Также в статье приведены расчеты времени выхода на режимные параметры ВХР, в зависимости от расхода питательной воды в каждый из контуров циркуляции котла утилизатора [3].

Надежная и безаварийная работа парогазовых станций с котлами утилизаторами во многом зависит от оптимального ведения водно-химического режима. В настоящее время при коррекционной обработке теплоносителя используют достаточно много реагентов, начиная от традиционных ВХР с использованием гидразина и аммиака, фосфатов до ввода в водяной контур таких реагентов, как хеламин, цитамин и др.

Ключевые слова: котел-утилизатор, водно-химический режим, кратность концентрирования, контур высокого давления, контур низкого давления.

AN ESTIMATION OF THE TIME TO REACH THE OPERATING PARAMETERS OF WATER CHEMISTRY CONDITIONS WHEN DOSING AMINE-BASED CORRECTING REAGENTS INTO THE WASTE-HEAT BOILER AT A CONSECUTIVE SCHEME OF FEEDWATER SUPPLY

Research article

Verkhovskii A.Y.¹, Gadzhiev K.G.^{2,*}, Kiet S.V.³, Gadzhiev D.K.⁴, Umirova N.R.⁵

^{1,2,4,5} Moscow power engineering institute, Moscow, Russian Federation

³ NPP " Technopribor ", Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (vokrugsveta18[at]gmail.com)

Abstract

The article examines the issues of estimating the time to achieve the normalized parameters of water chemistry conditions at dosing correcting reagents in the two-circuit waste-heat boiler, with a sequential supply of feedwater in the circuits are considered. The calculations of time required to reach the operation parameters of water chemistry conditions at dosing amine-based reagents are presented. The article also provides calculations of the time to reach the operation parameters of water chemistry conditions, depending on the feedwater supply to each of the recycling circuits of the waste-heat boiler [3].

Safe and reliable operation of steam-gas plants with waste-heat boilers largely depends on the optimal water chemistry conditions. Nowadays, for corrective treatment of coolant, quite a number of reagents are used, ranging from traditional water chemistry conditions with the use of hydrazine and ammonia, phosphates to the input of such reagents as chelamine, citamine, etc. into the water circuit.

Keywords: waste-heat boiler, water chemistry conditions, concentration ratio, high pressure loop, low pressure loop.

Введение

Важными характеристиками поведения примеси в объеме котла-утилизатора является время ее пребывания в объеме котла и время выхода контролируемых параметров на нормируемые значения ВХР. На рисунке 1 представлена принципиальная схема двухконтурного котла утилизатора с последовательной схемой подачи питательной воды.

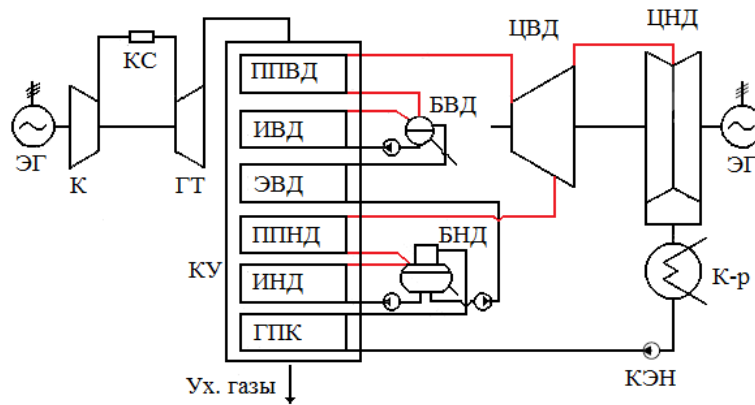


Рисунок 1 - Принципиальная тепловая схема ПГУ КЭС с двухконтурным котлом утилизатором и последовательной схемой подачи питательной воды
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.110.1>

При коррекционной обработке питательной воды и поддержания нормируемых значений, корректирующих реагентов, в контуре циркуляции котла-утилизатора необходимо знать за какое время данные показатели достигнут нормируемых значений. Очевидно, что корректирующие реагенты, дозируемые в питательную воду, будут вести себя аналогично примесям, которые содержатся в питательной воде. В общем виде изменение поведения примесей в контуре циркуляции от времени, при их наличии в питательной воде, можно описать стандартным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка. Для контура циркуляции низкого давления, двухконтурного котла-утилизатора, изменение концентрации примеси описывается уравнением 1.

$$\frac{dC_{КЦ1}}{d\tau} = \frac{D_{ПВ} \times C_{ПВ}}{V_1} - \frac{D_{П1}(K_{P1}-1) + D_{ПВ}}{V_1} \times C_{КЦ1} \quad (1)$$

где $C_{КЦ1}$ – концентрация примеси в контуре циркуляции низкого давления;
 $D_{ПВ}$ – расход питательной воды;
 $C_{ПВ}$ – концентрация примеси в питательной воде;
 $D_{П1}$ – расход пара из контура низкого давления;
 K_{P1} – коэффициент распределения примеси в контуре низкого давления;
 V_1 – объем контура низкого давления.

Для контура циркуляции высокого давления, двухконтурного котла-утилизатора, изменение концентрации примеси описывается уравнением 2.

$$\frac{dC_{КЦ2}}{d\tau} = \frac{D_{ПВ2} \times C_{КЦ1}}{V_2} - \frac{(D_{П2} \times K_{P2} + D_{ПР}) \times C_{КЦ2}}{V_2} \quad (2)$$

где $C_{КЦ2}$ – концентрация примеси в контуре циркуляции низкого давления;
 $D_{ПВ2}$ – расход питательной воды поступающей на контур циркуляции высокого давления, который равен $D_{ПВ2} = D_{ПВ} - D_{П1}$, $D_{П2}$ – расход пара из контура высокого давления;
 $D_{ПР}$ – расход продувки из барабана контура низкого давления;
 K_{P2} – коэффициент распределения примеси в контуре высокого давления;
 V_2 – объем контура высокого давления [4].

Время выхода на нормируемые значения ВХР рассчитывается, как отношение количества примеси находящейся в объеме контура циркуляции котла-утилизатора, к количеству примесей поступающей с питательной водой, выражение 3.

$$\tau = \frac{G_{КЦ} \times C_{КЦ}}{D_{ПВ} \times C_{ПВ}} \quad (3)$$

где $G_{КЦ}$ – водяной объем контура циркуляции, м³.

Отношение водяного объема контура циркуляции к расходу питательной воды – время заполнения данного объема при заданном расходе питательной воды, а отношение концентрации примеси в контуре циркуляции к ее содержанию в питательной воде – коэффициент учитывающий кратность концентрирования данной примеси в контуре циркуляции.

Для котла-утилизатора работающего по последовательной схеме подачи питательной воды, при стационарных условиях, время выхода на режимные параметры ВХР контура циркуляции низкого давления, в общем виде, запишется в виде уравнения 4, и для контура высокого давления в виде уравнения 5.

$$\tau_{КЦ1} = \frac{G_{КЦ1} \times C_{КЦ1}}{D_{ПВ} \times C_{ПВ}} \quad (4)$$

$$\tau_{КЦ2} = \frac{G_{КЦ2} \times C_{КЦ2}}{(D_{ПВ} - D_{П1}) \times C_{КЦ1}} \quad (5)$$

Рассматривая стационарный режим работы котла-утилизатора, когда нет внешних возмущений оказывающих влияние на изменение концентрации примесей в питательной воде и, следовательно, изменение концентрации в контурах циркуляции во времени постоянно, можно перейти к балансовым уравнениям. На основе уравнения материального баланса поведения примесей в контурах циркуляции выражаются концентрации примеси в каждом контуре и, подставив их в выражения для времени выхода на режимные значения по нормам ВХР, выражения 4 и 5 примут следующий вид (6 и 7).

Для контура низкого давления:

$$\tau_{КЦ1} = \frac{G_{КЦ1}}{D_{ПВ} + D_{П1} \times (K_{P1} - 1)} \quad (6)$$

Для контура высокого давления:

$$\tau_{КЦ2} = \frac{G_{КЦ2} \times (D_{ПВ} - D_{П1})}{((D_{П1} \times (K_{P1} - 1) + D_{ПВ}) \times (D_{П2} \times K_{P2} + D_{ПР}))} \quad (7)$$

Полное время выхода на режимные значения по ВХР котла утилизатора при последовательной схеме подачи питательной воды будет равно сумме времен выхода на режимные параметры в контурах циркуляции низкого и высокого давлений, уравнение 8.

$$\tau_{СУМ} = \frac{G_{КЦ1}}{D_{ПВ} + D_{П1} \times (K_{P1} - 1)} + \frac{G_{КЦ2} \times (D_{ПВ} - D_{П1})}{(D_{П1} \times (K_{P1} - 1) + D_{ПВ}) \times (D_{П2} \times K_{P2} + D_{ПР})} \quad (8)$$

где $\tau_{СУМ}$ – общее время выхода на нормируемые показатели ВХР двухконтурного котла утилизатора при последовательной схеме подачи питательной воды.

На практике, при проведении расчетов, вместо объема контура циркуляции используют массу воды в контуре циркуляции и массовый расход теплоносителя, пара и продувки $G_{КЦ1}$ и $G_{КЦ2}$ – масса воды в контуре циркуляции, кг. $D_{ПВ}$, $D_{П1}$ и $D_{ПР}$ – массовый расход кг/с.

Паропроизводительность каждого контура циркуляции, связана с объемом (массой) воды в данном контуре, через коэффициент парообразования. Коэффициент парообразования в контуре циркуляции зависит от скорости потока в трубах контура циркуляции и длины труб контура и будет равен отношению длины трубы контура умноженное на количество труб в контуре к линейной скорости потока теплоносителя в контуре циркуляции, выражение 9.

$$K_{ПАР} = \frac{l_{ТРУБ} \times n}{V_{ПТ}} \quad (9)$$

где $l_{ТРУБ}$ – длина одной трубы;

n – количество труб в контуре циркуляции;

$V_{ПТ}$ – средняя линейная скорость теплоносителя в трубе контура циркуляции.

Необходимо отметить, что коэффициенты парообразования для каждого контура должны быть равны между собой.

С учетом коэффициента парообразования в каждом контуре суммарное время выхода на режимные параметры по ВХР (уравнение 8) запишется в следующем виде:

$$\tau_{СУМ} = \frac{K_{ПАР} \times D_{П1}}{D_{ПВ} + D_{П1} \times (K_{P1} - 1)} + \frac{K_{ПАР} \times D_{П2} \times (D_{ПВ} - D_{П1})}{(D_{П1} \times (K_{P1} - 1) + D_{ПВ}) \times (D_{П2} \times K_{P2} + D_{ПР})} \quad (10)$$

Выразим расход пара через вторую ступень как разность общей паропроизводительности котла и первой ступени.

$$D_{П2} = D_{\Sigma} - D_1 \quad (11)$$

Где D_{Σ} – общая паропроизводительность котла. Принимая, что коэффициенты паропроизводительности для контуров циркуляции высокого и низкого давлений равны, выражение 10 запишется в следующем виде:

$$\tau_{СУМ} = \frac{K_{ПАР} \times D_{П1}}{D_{\Sigma} + D_{П1} \times (K_{P1} - 1) + D_{ПР}} + \frac{K_{ПАР} \times (D_{\Sigma} - D_{П1})}{(D_{\Sigma} - D_{П1}) \times K_{P2} + D_{ПР}} \quad (12)$$

Продифференцировав уравнение 12 по $D_{П1}$, и приравняв первую производную к нулю, получаем зависимость расхода пара их контура низкого давления от продувки из контура высокого давления.

Вычислив первую производную, получаем значение максимального времени выхода на режим по ВХР в зависимости от расхода пара в контуре высокого давления и продувки в контуре низкого давления:

$$\frac{D_{\Sigma} + D_{ПР}}{((K_{P1} - 1) \times D_{П1} + D_{\Sigma} + D_{ПР})^2} - \frac{D_{ПР}}{(K_{P2} \times (D_{\Sigma} - D_{П1}) + D_{ПР})^2} = 0 \quad (13)$$

Отношение концентраций примеси в питательной воде к концентрации примеси в воде контура циркуляции низкого давления и отношение концентрации примеси в контуре циркуляции низкого давления к концентрации этой примеси в контуре циркуляции высокого давления называется кратностью концентраций K_{K1} между питательной водой и контуром циркуляции низкого давления и кратностью концентрирования K_{K2} между контуром циркуляции низкого давления и контуром циркуляции высокого давления, соответственно. Исходя из балансовых уравнений при стационарном режиме кратность концентрирования K_{K1} и K_{K2} запишутся в следующем виде:

Для кратности концентрирования в контуре низкого давления по отношению к питательной воде, уравнение 14.

$$K_{K1} = \frac{C_{КЦ1}}{C_{ПВ}} = \frac{D_{ПВ}}{D_{П1} \times K_{P1} + D_{П2} + D_{ПР}} \quad (14)$$

Для кратности концентрирования в контуре высокого давления по отношению к контуру низкого давления, уравнение 15.

$$K_{K2} = \frac{C_{KЦ2}}{C_{KЦ1}} = \frac{D_{П2}+D_{ПР}}{D_{П2} \times K_{P2} + D_{ПР}} \quad (15)$$

Из уравнений 14 и 15 следует, что общая кратность концентрирования примесей ($K_{Общ}$) в котле утилизаторе при последовательной схеме подачи питательной воды равна произведению кратностей концентрирования в контуре низкого давления и кратности концентрирования в контуре высокого давления, уравнение 16.

$$K_{Общ} = \frac{C_{KЦ2}}{C_{ПВ}} = \frac{(D_{П2}+D_{ПР}) \times D_{ПВ}}{(D_{П1} \times K_{P1} + D_{П2} + D_{ПР}) \times (D_{П2} \times K_{P2} + D_{ПР})} \quad (16)$$

В процессе эксплуатации основным параметром, по которому оценивается работы котла утилизатора, считается кратность упаривания в котле утилизаторе в целом ($K_{УП}$), которая определяется как отношение расхода питательной воды к расходу продувки, выражение 17.

$$K_{УП} = \frac{D_{ПВ}}{D_{ПР}} \quad (17)$$

При коэффициенте распределения примесей близком к 0, выражение 16 примет вид уравнения 17. Поэтому при расчете кратности концентрирования необходимо учитывать не только концентрации примесей в контурах циркуляции, но количество примесей ушедших с паром, т.е. пересчитывать с учетом того, что коэффициент распределения примесей равен 0.

При оптимальной паропроизводительности по каждому контуру циркуляции, кратности упаривания должны быть равными друг другу. Исходя из этого и с учетом, что коэффициент распределения принят равным 0. Для двух контурного котла утилизатора, при последовательной схеме подачи питательной воды квадратный корень из общей кратности упаривания по котлу утилизатору равен кратностям упаривания по каждому контуру циркуляции, выражение 18.

$$\sqrt{K_{УП}} = \sqrt{\frac{D_{ПВ}}{D_{ПР}}} = K_{KЦ1} = K_{KЦ2} = \frac{D_{ПВ}}{D_{П2}+D_{ПР}} = \frac{D_{П2}+D_{ПР}}{D_{ПР}} \quad (18)$$

Таким образом, при расчете оптимального времени выхода на режимные параметры по ВХР, необходимо решить систему уравнений, которая позволяет рассчитать оптимальные паропроизводительности по каждому контуру циркуляции и расходу продувки, система уравнений 19.

$$\begin{cases} \frac{D_{\Sigma}+D_{ПР}}{((K_{P1}-1) \times D_{П1} + D_{\Sigma} + D_{ПР})^2} - \frac{D_{ПР}}{(K_{P2}(D_{\Sigma}-D_{П1}) + D_{ПР})^2} = 0 \\ \sqrt{K_{УП}} = \sqrt{\frac{D_{ПВ}}{D}} = K_{KЦ1} = K_{KЦ2} = \frac{D_{ПВ}}{D_{П2}+D_{ПР}} = \frac{D_{П2}+D_{ПР}}{D_{ПР}} \end{cases} \quad (19)$$

Заключение

На основании выше сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Время выхода на режимные параметры по ВХР зависит в первую очередь от расходных характеристик, паропроизводительность каждого контура и продувка.
2. Условием оптимальной работы котла утилизатора при последовательной схеме подачи питательной воды является равенство кратностей упаривания в каждом контуре циркуляции.
3. При определении времени выхода на режимные параметры, необходимо учитывать поведение примесей в системе кипящая вода – насыщенный пар.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Мартынова О.И. Расчет водно-химических режимов теплоэнергетических установок / О.И. Мартынова, Т.И. Петрова, Л.Г. Васина и др. – М.: Энерг. Ин-т. 1985. – 152 с.
2. Бухримов В.В. Тепломассообмен / В.В. Бухримов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2014. – 360 с.
3. Верховский А.Е. Расчет водно-химических режимов ТЭС / А.Е. Верховский – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 48 с.
4. Воронов В.Н. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС / В.Н. Воронов, Т.И. Петрова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 240 с.
5. Галин Н.М. Тепломассообмен (в ядерной энергетике) / Н.М. Галин, Л.П. Кириллов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
6. Голубцов В.А. Обработка воды на ТЭС / В.А. Голубцов. - Л.: Энергия, 1974. - 360 с.

7. Руског Ю.С. Титановые конструкционные сплавы в химических производствах / Ю.С. Руског. – М.: Химия, 2009. – 285 с.
8. Бутунер Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Бутунер, М.Е. Позин. - Л.: Химия, 1971. – 824 с.
9. Верховский А.Е. Исследование поведения фосфатов при эксплуатации барбанного котла / А.Е. Верховский, К.Г. Гаджиев, В.Е. Кулов // Новое в Российской электроэнергетике. – 2014. – № 1. – 24 с.
10. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Martynova O.I. Raschet vodno-himicheskikh rezhimov teplojenergeticheskikh ustanovok [Calculation of water-chemical regimes of heat power plants] / O.I. Martynova, T.I. Petrova, L.G. Vasina et al. – М.: Jenerg. In-t. 1985. – 152 p. [in Russian]
2. Buhrimov V.V. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer] / V.V. Buhrimov. – Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, 2014. – 360 p. [in Russian]
3. Verhovskij A.E. Raschet vodno-himicheskikh rezhimov TJeS [Calculation of water-chemical regimes of thermal power plants] / A.E. Verhovskij – М.: MPEI Publishing House, 2011. – 48 p. [in Russian]
4. Voronov V.N. Vodno-himicheskie rezhimy TJeS i AJeS [Water-chemical regimes of TPP and NPP] / V.N. Voronov, T.I. Petrova. – М.: Publishing house MEI, 2009. – 240 p. [in Russian]
5. Galin N.M. Teplomassoobmen (v jadernoj jenergetike) [Heat and mass transfer (in nuclear power)] / N.M. Galin, L.P. Kirillov. – М.: Jenergoatomizdat, 1987. – 376 p. [in Russian]
6. Golubcov V.A. Obrabotka vody na TJeS [Water Treatment at TPPs] / V.A. Golubcov. - L.: Jenergija, 1974. - 360 p. [in Russian]
7. Ruskog Ju.S. Titanovye konstrukcionnye splavy v himicheskikh proizvodstvax [Titanium structural alloys in chemical industries] / Ju.S. Ruskog. – М.: Himija, 2009. – 285 p. [in Russian]
8. Butuner L.M. Matematicheskie metody v himicheskij tehnike [Mathematical Methods in Chemical Engineering] / L.M. Butuner, M.E. Pozin. - L.: Himija, 1971. – 824 p. [in Russian]
9. Verhovskij A.E. Issledovanie povedenija fosfatov pri jekspluatácii barbannogo kotla [Investigation of the behavior of phosphates during the operation of a barban boiler] / A.E. Verhovskij, K.G. Gadzhiev, V.E. Kulov // Novoe v Rossijskoj jelektrojenergetike [New in the Russian electric power industry]. – 2014. – № 1. – 24 p. [in Russian]
10. Isachenko V.P. Teploperedacha [Heat transfer: textbook for universities] / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. – М.: Jenergoizdat, 1981. – 416 p. [in Russian]