

## НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТОПОЧНОГО ФАКЕЛА С ТОПЛИВНЫМ РЕАГЕНТОМ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

*К.В. Осинцев*

## PARAMETERS CALIBRATION FOR LOW TEMPERATURE FURNACE FLAME WITH FUEL AGENT OF A CHANGING CONTENT

*K.V. Osintsev*

Представлен разработанный автором алгоритм управления котлом, оснащенным многофункциональными горелками, который позволяет выполнять переходы с одного вида топлива на другой без затратных перенастроек вспомогательного оборудования.

*Ключевые слова:* управление факелом, котел, горелка.

The article considers algorithm for boiler control, worked out by the author of the article, the boiler is equipped with multifunctional burners. The algorithm makes it possible to perform the change from one type of fuel to another one without cost readjustment of supporting equipment.

*Keywords:* flame control, boiler, burner.

### Введение

Для снижения активности шлакования, образования оксидов азота и повышения надежности элементов горелок и их амбразур в факельных топках современных котлов организуют сжигание топлива при пониженном уровне температуры («низкотемпературное» факельное сжигание) [1–5]. Перевод существующих котлоагрегатов на низкотемпературное горение связан с капитальными затратами. На кафедре промышленной теплоэнергетики ЮУрГУ разработана малозатратная технология, основанная на организации рассредоточенного ввода реагентов в топку. Такой ввод может быть выполнен различными способами [4–7]. На котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 реагентные потоки рассредотачивают через индивидуальные каналы многофункциональных горелок, организуя прогрев, зажигание и начальное развитие экзотермических реакций в потоках топливовоздушной смеси при неполном количестве окислителя, а также последующее поддержание горения плавной приточно-диффузионной кислородной подпиткой из потоков вторичного воздуха [5, 7]. В сравнении с факелом обычной топливовоздушной смеси здесь темп выделения и накопления теплоты, максимальные теплосодержание и температура имеют пониженные значения, которые не достигают, в частности, значений тех же парамет-

ров, необходимых для расплавления частиц сопутствующей породы, вводимых в топку с потоками топливной пыли. Это обуславливает снижение загрязнения элементов топок и горелок, их шлакования.

### Дистанционирование начального участка факела

При растягивании по длине  $l$  факела процесс экзотермического реагирования смещается в зону с максимальными теплонакоплением, теплосодержанием и температурой от среза горелок с  $l = 0$  до отметки  $l_{\text{ф}} = 1,5\text{--}2,5$  м, что достаточно для уменьшения теплового потока в направлении горелочных амбразур, снижения их теплооблучаемости, активности терморазрушений и увеличения срока службы [4–7]. Помимо организации и поддержания пониженного температурного уровня в факеле горелочные устройства этого типа адаптированы к топливу переменного состава [6–7]. Однако при переходах от одного вида топлива к другому параметры факела меняются, требуется их корректировка путем перенастройки режимов работы топливопитающих систем, мельничного и тягодутьевого оборудования котлов.

Подобная перенастройка осуществляется по определенному алгоритму, который в зависимости от используемого оборудования и вида топлива на

---

Осинцев Константин Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет; osintsev2008@yandex.ru

---

Konstantin Vladimirovich Osintsev – Candidate of Science (Engineering), associate professor of Industrial Heat Power Engineering Department of South Ural State University; osintsev2008@yandex.ru

различных ТЭС может иметь свои особенности. Из представленной на рис. 1 схемы видно, что топочный факел, сформированный многофункциональными горелками, условно можно разделить на участки воспламенения, максимального теплосодержания и охлаждения, а в качестве основных контролируемых параметров использовать принятые в топочной технике температуру и степень выгорания топлива в зоне максимального теплосодержания  $T_{\phi}$ , К;  $a_{\phi}$  и в выходном сечении топки  $T_{\tau}$ , К,  $a_{\tau}$ . Ответственным за состояние факела в топке на всех участках являются его начальные параметры, определяющие активность процесса воспламенения; последний протекает в границах участка, начинающегося от среза горелок на отметке  $l = 0$  м, где температура  $T = T_0$ , К; степень выгорания топлива  $a = 0$ , а заканчивается на отметке  $l = l_{\phi}$ , м, где температура  $T = T_{\phi}$ , К; степень выгорания топлива  $a = a_{\phi}$ . Каждому виду топлива соответствуют собственные значения  $l_{\phi i}$ ,  $a_{\phi i}$ ,  $T_{\phi i}$ . При обработке результатов зондирования факела на участке воспламенения получены универсальные зависимости для всех видов топливного реагента:

$$\Delta \bar{T} = \frac{T - T_0}{T_{\phi} - T_0} = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/m}, \quad (1)$$

$$\bar{a} = a/a_{\phi} = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/n}, \quad (2)$$

где  $\xi = l/l_{\phi}$  – безразмерная длина факела, причем  $\xi = 0$  на срезе горелки, а  $\xi = 1,0$  на длине  $l = l_{\phi}$ ;  $m \approx 5$ ;  $n \approx 3,5$  – для пыли бурого угля и природного газа.

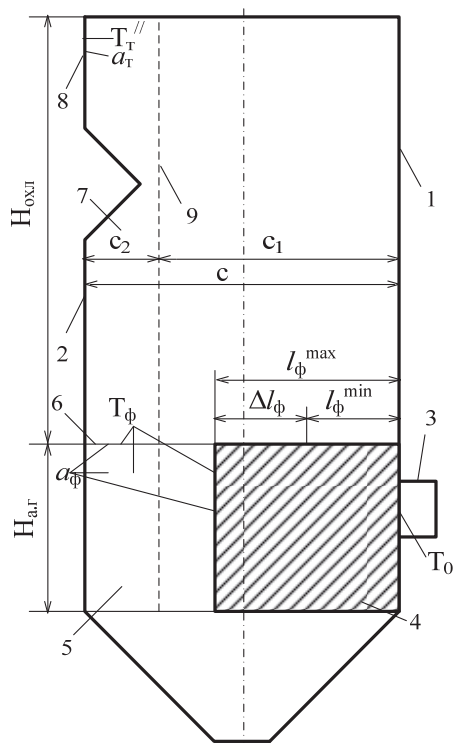
Распределения параметров (1), (2) позволяют осуществлять поиск плавно меняющихся тепловых характеристик факела, в том числе подлежащих контролю  $l_{\phi}$ ,  $T_{\phi}$  и  $a_{\phi}$ . Последние связаны балансовой зависимостью [4, 5]:

$$dq_m = dq_{\text{в}} + dq_{\text{доп}} - dq_{\text{отв}} - dq_W - dq_A - dq_p - dq_{\text{рец}}, \quad (3)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} dq_m &= -\frac{d}{dl} \left( \lambda \frac{dT}{dl} F \right) dl = \\ &= -\frac{d}{d\xi} \left[ \frac{1}{m} \frac{12\xi - 24\xi^2 + 12\xi^3}{(6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1-1/m}} \lambda \frac{T_{\phi} - T_0}{l_{\phi}} F \right] d\xi = \\ &= \frac{d}{d\xi} a_{\phi} (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/n} Q_0 B_0 d\xi + \\ &+ \frac{d}{d\xi} Q_{\text{доп}} B_{\text{доп}} d\xi - \frac{d}{d\xi} \left( \sum_{i=1}^n \Psi_i H_i \right) a_m \sigma_0 l_{\phi} T_{\text{cp}}^4 d\xi - \\ &- \frac{d}{d\xi} (2500 W^p + c_{pW} \Delta t_W W^p + c_{pn} \Delta t_n W^p) B_0 d\xi - \\ &- \frac{d}{d\xi} (c_{pA} \Delta t_A A^c) B_0 d\xi - \\ &- \frac{d}{d\xi} (V^c c_{pV} + (1-V^c) c_{pK} + \alpha V^0 c_{p\epsilon}) B_0 \Delta t' d\xi - \\ &- \frac{d}{d\xi} (I_{\phi} - I_0) r B_p d\xi, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $dq_m$  – поток теплоты в направлении поступления топливоздушной смеси;  $dq_{\epsilon}$  – тепловыделение основного топлива;  $dq_{\text{доп}}$  – тепловыделение подсветочного топлива;  $dq_{\text{отв}}$  – отведенный тепловой поток к экранам топки;  $dq_W$  – количество теплоты, необходимое на испарение влаги, нагрев воды и пара;  $dq_A$  – тепловые потери с балластом золы топлива;  $dq_p$  – потери теплоты на нагрев обеззоленной части топлива и воздуха;  $dq_{\text{рец}}$  – потери теплоты на нагрев газов рециркуляции. В формуле (4):  $\lambda$  – условный коэффициент теплопроводности, кВт/(м·К);  $T = f(x, y, z) \approx \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i)$  – текущая усредненная в поперечных направлениях температура среды, К;  $x$  – текущая продольная координата факела, м;  $F$  – поперечное сечение факела, м<sup>2</sup>;  $Q_0$  – теплота сгорания на сухую массу, кДж/кг,  $Q_0 = Q_{\text{л}} V^c + Q_{\text{к}} (1 - V^c)$ , где  $Q_{\text{л}}$ ,  $Q_{\text{к}}$  – теплоты сгорания летучих и обеззоленного коксового остатка, кДж/кг,  $V^c$  – содержание летучих;



**Рис. 1. Схема выделения зон и участков развития факела в топке с фронтальной компоновкой многофункциональных горелок:**

1, 2 – фронтальная и задняя стенки топки, 3 – горелки, 4 – участок воспламенения, 5 – участок максимального теплосодержания, 6 – выходное сечение участка максимального теплосодержания, 7 – участок охлаждения факела, 8 – выходное сечение топки и участка охлаждения, 9 – расчетная плоскость развития неравномерности скорости и температуры факела на участке охлаждения

$B_0$  – расход топлива, кг/с;  $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/с;  $Q_{доп}$ ,  $B_{доп}$  – теплота сгорания, кДж/нм<sup>3</sup>, и расход дополнительного подсветочного топлива, нм<sup>3</sup>/с;  $a_\tau$  – степень черноты;  $T_{ср}$  – средняя температура факела на участке воспламенения, К, с учетом распределения (1) может быть определена из выражения

$$T_{ср} = \frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} T dl = \frac{T_0}{\xi_2 - \xi_1} \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} + \frac{T_\phi - T_0}{\xi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/m} d\xi$$

(применительно к пылевому и газовому факелу  $T_{ср} \approx 0,925T_\phi$ ;  $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-11}$  кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – универсальная постоянная Стефана–Больцмана (коэффициент излучения абсолютно черного тела);

$$\sum_{i=1}^n \Psi_i H_i = \Psi_{стен} H_{стен} + \Psi_{верх} H_{верх} + \Psi_{низ} H_{низ} -$$

условный параметр переизлучения, где  $H_{стен}$ ,  $H_{верх}$ ,  $H_{низ}$  – высота стен, ограничивающих горизонтальный участок активного горения в топке, ширина верхнего сечения участка активного горения и ширина нижнего сечения того же участка, причем  $H_{низ}$  определяется с учетом лучистой поверхности холодной воронки, м,  $\Psi_{стен}$ ,  $\Psi_{верх}$ ,  $\Psi_{низ}$  – степени отвода теплоты из зоны активного горения через боковые стены, верх и низ топки, которые определяются по приближенным формулам:

$$\Psi_{стен} = (T_{ср}^4 - T_{стен}^4) / T_{ср}^4, \Psi_{верх} = (T_{ср}^4 - T_{верх}^4) / T_{ср}^4, \Psi_{низ} = (T_{ср}^4 - T_{низ}^4) / T_{ср}^4,$$

$T_{стен}$ ,  $T_{верх}$ ,  $T_{низ}$  – температуры стен, верхнего и нижнего сечений участка воспламенения, К;  $W^p$  – рабочая влажность;  $c_{рв}$ ,  $c_{рп}$  – средние теплоемкости воды и паров газовой смеси, кДж/(кг·К);  $\Delta T_W = T_{кип} - T_W$ , К;  $\Delta T_\pi = T - T_{кип}$ , К;  $A^c$  – зольность на сухую массу топлива;  $c_{рл}$  – теплоемкость золы в интервале температур  $T_0$  и текущей температуры факела, кДж/(кг·К);  $\Delta T_A = T - T_0$ , К;  $V^0$  – удельный объем воздуха при средней температуре факела на участке воспламенения, м<sup>3</sup>/кг;  $c_{рв}$ ,  $c_{рл}$ ,  $c_{рп}$  – теплоемкости летучих, коксового обеззолённого остатка, воздуха в интервале температур  $T_0$  и  $T_{ср}$ , кДж/(кг·К);  $\Delta T^l = T_{ср} - T_0$ , К.

Параметр  $a = f(R_{90})$ , где  $R_{90}$  – условный показатель тонины помола пыли; в отсутствии опытных значений, полученных на котле (например, при настройке оборудования для проведения опытного сжигания топлива), может быть использована методика оценки  $a = f(R_{90})$  на базе экспериментальных данных В.И. Бабия, Ю.Ф. Куваева для одиночных частиц [8].

На участке максимального теплосодержания принимается постоянство значений энтальпии, температуры и степени выгорания факела ( $I_\phi \approx \text{const}$ ,  $T_\phi \approx \text{const}$ ;  $a_\phi \approx \text{const}$ ) по каждому из  $i$ -го вида топлива [9].

На участке охлаждения факел отдает свою теплоту топочным экранам; здесь же происходит

дожигание топлива с изменением параметров  $T_{\phi i}$ , К и  $a_{\phi i}$  до  $T_{\tau i}''$ , К и  $a_{\tau i}$  в выходном окне топки. Эти изменения могут быть учтены балансовыми уравнениями теплоты [10], либо в первом приближении оценены экспериментальными зависимостями [11]. В любом случае  $T_\tau'' = f(T_\phi)$  и  $T_\tau'' < T_\phi$ .

В сечении топки факел неоднороден [11–13]. В топках с фронтальной компоновкой горелок его основная тепловыделяющая восходящая ветвь смещена к задней стене [12, 13]. По ширине этой ветви имеют место скоростная и температурная неравномерности; уровень и распределения текущих параметров по ширине слоя факела, примыкающего к задней стене, зависят от схемы включения горелок [12, 13]. Для безопасной работы топки в бесшлаковочных режимах необходим контроль за соблюдением условий:  $T_\phi \cdot K_\phi < T_\phi''$  и  $T_\tau'' \cdot K_\tau < T_\tau''$ , где  $K_\phi$  и  $K_\tau$  – коэффициенты температурной неравномерности, соответственно в зоне максимального теплосодержания и выходном окне топки;  $T_\phi''$  и  $T_\tau''$  – нормируемые значения [14].

Помимо контроля основных факельных параметров  $I_\phi$ ,  $T_\phi$ ,  $a_\phi$ ,  $T_{\tau i}''$ ,  $a_{\tau i}$  при переходах с одного вида топлива на другой необходима перенастройка оборудования. При оценке характеристик, входящих в уравнение (4), можно выделить основные, способные к перенастройке процесса горения при эксплуатации котла: расход подсветочного топлива  $B_{доп}$ , нм<sup>3</sup>/с, расход газов рециркуляции в мельницы  $G_{г.р}$ , м<sup>3</sup>/с, а также тонина помола по показателю  $R_{90} = f_1(n_{ш})$ , где  $n_{ш}$  – положение шибера врата пыли на домальвание, %.

### Построение алгоритма задачи управления низкотемпературным топочным факелом

Алгоритм работы котла с перенастройкой систем топливоприготовления и подачи подсветочного топлива в зависимости от вида ( $i$ -го) топлива и схемы включения основных горелок для условий Челябинской ТЭЦ-2 представлен на рис. 2. Из последнего видно, что включению в работу стандартного блока регулирования параметрами котла предваряет выбор ( $i$ -го) топлива и соответствующей ему режимной карты. Все параметры этой карты получены опытным путем при наладке, режимных испытаниях, отрабатываются системой управления до смены другого вида топлива [9, 14]. Существующая система управления охватывает челябинский бурый уголь ЧУ1 ( $Q_{н}^p = 10265$  кДж/кг;  $A^c = 47\%$ ;  $W^p = 25\%$ ;  $V^r = 36\%$ ), ЧУ2 ( $Q_{н}^p = 12780$  кДж/кг;  $A^c = 40\%$ ;  $W^p = 13\%$ ;  $V^r = 39\%$ ), переясловский бурый уголь ( $Q_{н}^p = 17179$  кДж/кг;  $W^p = 20\%$ ;  $A^c = 8\%$ ;  $V^r = 50\%$ ), кузнецкий каменный СС 1 ( $Q_{н}^p = 21369$  кДж/кг;  $W^p = 10\%$ ;  $A^c = 25\%$ ;  $V^r = 30\%$ ), кузнецкий каменный ТР ( $Q_{н}^p = 20500$  кДж/кг;  $W^p = 10\%$ ;  $A^c = 30\%$ ;  $V^r = 13\%$ ), углеродосодержащий материал (УМ) электродного производства, природный газ с  $Q_{н}^p = 33550$  кДж/нм<sup>3</sup>.

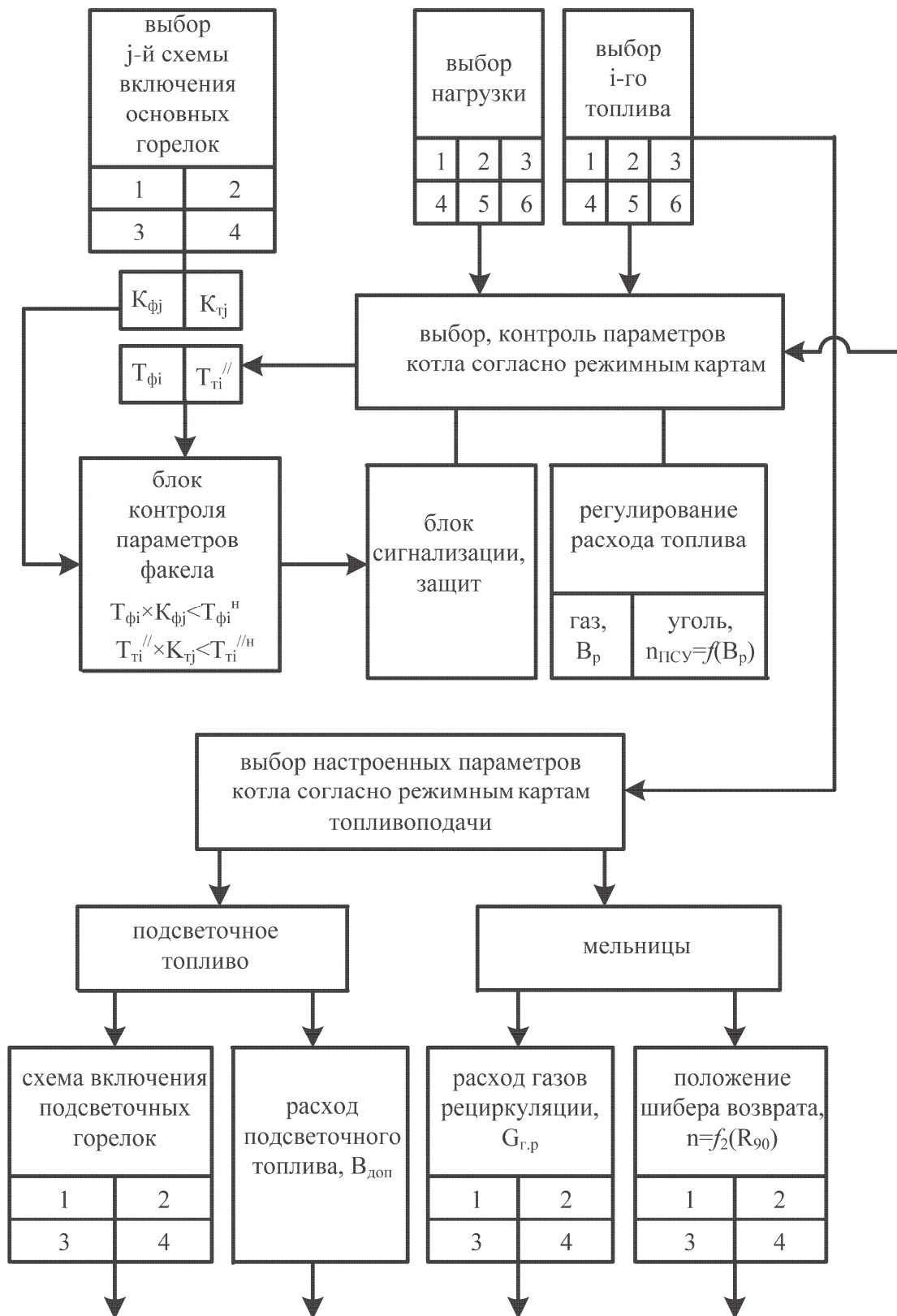


Рис. 2. Пример построения алгоритма управления параметрами котла с многофункциональными горелками при сжигании топлива переменного состава



Широкий спектр топливного реагента неизбежно влечет изменение условий хранения и топливоподачи по условиям пожаробезопасности и запыленности, а также золоудаления по условиям гипсования. Эти условия должны соответствовать Нормам и Инструкциям по эксплуатации соответствующих аппаратов и оборудования.

#### Выводы

1. Разработанный алгоритм управления котлом, оснащенного многофункциональными горелками, позволяет выполнять переходы с одного вида топлива на другой без затратных перенастроек вспомогательного оборудования.

2. В процессе эксплуатации котла поддерживаются рабочие параметры топливного, газовоздушного и пароводяного трактов по режимным картам соответствующих видов топлива.

3. Выбор рабочих характеристик топливоподачи и пылеприготовления при подаче на котел нового вида топлива осуществляется по предварительной расчетной оценке степени выгорания и нормативным параметрам факела с последующим опытным сжиганием, наладкой и режимными испытаниями котла.

4. Переход к горелкам и топливосистемам иного типа потребует корректировки рассмотренного в статье алгоритма.

#### Литература

1. Результаты освоения опытно-промышленного котла 820 т/ч с кольцевой топкой при сжигании азейских и ириша-бородинских углей / Ф.А. Серант, О.И. Будилов, В.Е. Остапенко, В.П. Сенов // *Теплоэнергетика*. – 2003. – № 8. – С. 2–10.
2. Освоение и исследование опытно-промышленного котла БКЗ-500-140-1 с тангенциальной топкой для низкотемпературного сжигания канско-ачинских углей / М.Я. Процайло, Ю.Л. Маршак, М.С. Пронин и др. // *Теплоэнергетика*. – 1988. – № 1. – С. 5–12.
3. Освоение и исследование котла БКЗ-420-140-9 с вихревой топкой ЛПИ / Ю.А. Рундыгин, С.М. Шестаков, Д.Б. Ахметов и др. // *Теплоэнергетика*. – 1988. – № 1. – С. 12–16.
4. Осинцев, К.В. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / К.В. Осинцев // *Электрические станции*. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
5. Осинцев, К.В. Организация низкотемпера-

турного факельного сжигания угольной пыли на котлах / К.В. Осинцев // *Тяжелое машиностроение*. – 2010. – № 12. – С. 15–19.

6. Перевод котла БКЗ-160-140Ф на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // *Электрические станции*. – 1993. – № 3. – С. 25–29.

7. Перевод оборудования ТЭС на факельное сжигание разнородных топлив с использованием технологии рассредоточенного ввода реагентов в топку / К.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, В.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2008. – № 4. – С. 75–79.

8. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 210 с.

9. Управление тепловой структурой факела в топках котлов БКЗ-210-140Ф с одноярусной фронтальной компоновкой многофункциональных горелок при сжигании разнородного топлива / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2005. – № 9. – С. 14–23.

10. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.

11. Осинцев, К.В. Повышение надежности топки и дымоотводящих элементов котла Бабкок–Вилькокс при сжигании природного газа в подовых целевых горелках / К.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2010. – № 4. – С. 2–8.

12. Осинцев, К.В. Учет неоднородности и неустойчивости тепловой структуры топочного факела при использовании многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 6. – С. 66–70.

13. Совершенствование методов снижения температурных неравномерностей в топках с фронтальной компоновкой горелок / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов и др. // *Теплоэнергетика*. – 1990. – № 4. – С. 23–26.

14. Митор, В.В. Проектирование топек с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания / В.В. Митор, Ю.Л. Маршак // ВТИ – НПО ЦКТИ. – 1981. – Вып. 42. – 118 с.

15. Анализ результатов опытного сжигания высокорекреационного бурого угля на котле БКЗ-210-140Ф / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // *Теплоэнергетика*. – 2003. – № 8. – С. 27–32.

Поступила в редакцию 20 марта 2012 г.