

**КОВАЛЕВ ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (kvg-ic@mail.ru).

**KOVALEV VLADIMIR GENNADYEVICH** – candidate of technical sciences, professor, head of Industrial Enterprises Electric Power Supply Chair, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

**ТАРАСОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (Vladimir\_tarasov@inbox.ru).

**TARASOV VLADIMIR ALEXANDROVICH** – candidate of technical sciences, associate professor of Power Plants Chair, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.

УДК 621.365, 534.22

В.В. АФАНАСЬЕВ, В.Г. КОВАЛЕВ, В.А. ТАРАСОВ, С.Н. АЛЕКСЕЕВ

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ ФАКЕЛА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ**

*Ключевые слова:* пылеугольные котлы, стабилизация горения факела, газификация, синтез-газ.

*Рассмотрены возможности использования полученного электротермической газификацией синтез-газа для безмазутной подсветки факела пылеугольных котлов, которая позволяет улучшить экономические и экологические характеристики котлоагрегатов.*

**V.V. AFANASYEV, V.G. KOVALEV, V.A. TARASOV, S.N. ALEKSEEV  
INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF USING SYNTHESIS GAS  
TO STABILIZE THE FLAME BURNING COAL-FIRED BOILERS**

*Key words:* coal-fired boilers, combustion flame stabilization, gasification, synthesis gas.

*The possibilities of using the resulting electrothermal gasification synthesis gas for lighting the torch Plasma-fuel coal-fired boilers, which can improve the economic and environmental performance of boilers are considered.*

В мировой и отечественной теплоэнергетике при растопке пылеугольных котлов и для стабилизации горения (подсветки) пылеугольного факела используют природный газ или топочный мазут. Подсветка пылеугольного факела необходима при использовании каменных углей с выходом летучих менее 20% [2, 4, 6]. Применение для подсветки природного газа обладает рядом неоспоримых преимуществ экономического и экологического характера. В местах, где отсутствует подвод природного газа, при растопке пылеугольных котлов и для стабилизации горения пылеугольного факела используют топочный мазут.

Совместное сжигание угля и обладающего более высокой реакционной способностью мазута ухудшает эколого-экономические показатели котлов: повышается механический недожог топлива и на 2-5% снижается КПД-брутто, возрастает скорость высокотемпературной коррозии экранных поверхностей, на 30-40% увеличивается выход оксидов азота и серы (за счет более высокого содержания серы в мазуте).

Мазут является дорогим топливом. В настоящее время его стоимость превышает стоимость угля более чем в два раза и приблизилась к соотношению мировых цен мазут/уголь. Кроме того, в связи с переходом на технологии более глубокой переработки нефти с высокой долей выхода светлых нефтепродуктов мазут станет дефицитным топливом, что уже наблюдается.

Известные методы снижения расхода мазута при сжигании низкосортных углей: реконструкция горелочных устройств, раздельное и смешанное сжигание угля и подсветочного топлива – мазута, подогрев воздуха и пылевоздушной смеси, утонение помола, кардинально не решают проблему сокращения расхода жидкого топлива, особенно на стадии растопки котлоагрегата [2, 4, 6].

Повсеместное снижение качества энергетических углей требует увеличения расхода мазута на тепловых станциях, в то время как из-за углубления переработки нефти и других причин объемы производства мазута в России сокращаются. Еще более остро проблемы стоят в теплоэнергетике, где используются котлы небольшой мощности, для которых характерны режимы с переменной тепловой нагрузкой, причем даже в течение суток нагрузка может меняться от 50 до 100% полной мощности котла. В этом случае практически все время требуется мазутная подсветка пылеугольных горелок. Мазут становится вторым основным топливом.

В связи с этим разработка безмазутной подсветки пылеугольного факела является весьма актуальной задачей. Известны способы безмазутной подсветки пылеугольного факела с помощью электродуговых нагревателей газа – плазмотронов [2, 4, 6]. Высокая температура плазмы приводит к прогреву топлива со скоростью  $10^3$ - $10^4$  К/с, при этом достигается конечная температура частиц 800-900°C и выше, что интенсифицирует разложение органической части топлива. После обработки плазмой поток содержит в себе деструктурированные частицы угля и легко воспламеняющиеся газы. Такой состав позволяет надежно воспламенить и стабильно поддерживать горение основного пылеугольного факела в топке парогенератора. Применение плазмотронов позволяет обеспечить более равномерное и устойчивое горение факела, чем при мазутной подсветке. Светимость пламени заметно выше, чем при мазутном сопровождении. Однако продолжительность работы электродов плазмотрона до замены составляет всего лишь 50-100 ч, что несопоставимо со временем работы энергетического котла.

Эти недостатки можно устранить с помощью использования для подсветки пылеугольного факела синтез-газа, полученного газификацией основного топлива – угля.

При газификации происходят процессы термохимического превращения органического твердого топлива в горючие газы, осуществляемые под воздействием свободного или связанного в виде  $H_2O$  или  $CO_2$  кислорода при высоких температурах. Остатком твердого топлива после завершения газификации является его негорючая часть – зола или шлак. Газификация топлива осуществляется в специальных аппаратах – газогенераторах, конструкция которых определяется видом газифицируемого топлива и применяемого окислителя, теплотехническим принципом организации технологического процесса, давлением процесса (генераторы атмосферные и высокого давления), температурой слоя газифицируемого топлива (генераторы с сухим и жидким шлакоудалением), степенью механизации процессов загрузки топлива и удаления шлака из газогенератора.

Существующие технологии автотермической газификации твердого топлива не обеспечивают полную газификацию тощих каменных углей с малым выходом летучих и стабильный непрерывный выход синтез-газа. Необходимыми качествами производства синтез-газа для подсветки пылеугольного факела обладает аллотермическая электротермическая газификация твердого топлива, предложенная в работах [1, 7]. Газификация в электротермической установке обеспечивает устойчивую работу при любом виде сырья в широком диапазоне изменения параметров электротехнологического режима, легкость пуска и остановки, возможность использования дешевой электрической энергии ночных минимумов и работы в качестве потребителя-регулятора.

Синтез-газ получается на самой станции с помощью электротермической газификации основного энергетического угля. Электротермическая газификация является универсальным методом, который можно применять для любых твердых видов топлива независимо от химического состава, количества золы, выхода летучих, примесей серы и других свойств. Ввиду возможности поддержания в зоне газификации достаточно высокой и стабильной температуры газификация с применением электронагрева позволяет перевести всю горючую массу низкосортного твердого топлива в высококалорийный синтез-газ, свободный от азота, диоксида углерода и водяных паров.

Математическая модель позволила определить равновесный состав генераторного газа и рассчитать материальные и энергетические балансы электротехнологиче-

ской установки. Расчеты равновесного состояния показали, что при температурах выше 1100 К синтез-газ практически состоит из водорода и оксида углерода, теплопроводная способность этого газа составляет 11 МДж/м<sup>3</sup>.

Расчет энергетического баланса котла ТП-20-у паропроизводительностью 20 т/ч показал, что при использовании тощего угля Донецкого бассейна марки Т с выходом летучих менее 20% необходима подсветка пылеугольного факела [1, 3]. В соответствии с РД 34.10.501-90 [3] норма расхода газомазутного топлива при сжигании данного тощего угля составляет 4% от суммарного расхода условного топлива.

Характеристики котла ТП-20-у:

Количество установленных горелок  $n = 2$ .

Низшая теплота сгорания топлива  $Q_H^P = 20600$  кДж/кг.

КПД котла  $\eta_{К.А.} = 91,48\%$ .

Производительность  $D = 20$  т/ч.

Температура перегретого пара  $t_{п.е.} = 440^\circ\text{C}$ .

Температура уходящих газов  $t_{у.к.} = 132^\circ\text{C}$ .

Давление перегретого пара  $P_{п.е.} = 40$  кг/см<sup>2</sup>.

Энтальпия перегретого пара  $i_{п.е.} = 3309,8$  кДж/кг.

Температура питательной воды  $t_{п.в.} = 140^\circ\text{C}$ .

Энтальпия питательной воды  $i_{п.в.} = 613,1$  кДж/кг.

Энтальпия на линии насыщения  $i_s = 1109,3$  кДж/кг.

Температура воздуха  $t_{в.} = 303^\circ\text{C}$ .

Уголь марки Т имеет низшую теплоту сгорания 20,6 МДж/кг, выход летучих  $V^{daf} = 12,0\%$ .

Полный расход угля  $B = 0,8$  кг/с.

Расчетный расход топлива с учетом механического недожога  $q_4$ , кг/с

$$B_p = B \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = 0,801 \cdot \left(1 - \frac{1,5}{100}\right) = 0,789.$$

Расчетный расход условного топлива, кг у.т./с

$$B_{т.у.т.} = \frac{B_p \cdot Q_H^P}{Q_{у.т.}} = \frac{0,789 \cdot 4920}{7000} = 0,555.$$

Норма расхода мазута, необходимая для поддержания устойчивого горения при номинальной нагрузке котла, %

$$B_{маз}^{мин} = 4.$$

Расход угля при подсвечивании (в условном исчислении), кг у.т./с

$$B_{уг}^{усл} = \frac{(100 - B_{маз}^{мин})}{100} \cdot B_{уг} = \frac{(100 - 4)}{100} \cdot 0,555 = 0,533.$$

Расчетный расход угля при подсвечивании (в натуральном исчислении), кг/с

$$B_{уг} = \frac{B_{уг}^{усл} \cdot Q_{у.т.}}{Q_H^P} = \frac{0,533 \cdot 29,3}{20,6} = 0,758.$$

Расход мазута для подсвечивания (в натуральном выражении), кг/с

$$B_{маз} = \frac{B_{уг}^{усл} \cdot Q_{уг} \cdot B_{маз}^{мин}}{100 \cdot Q_{нмаз}^P} = \frac{0,533 \cdot 29,3 \cdot 4}{100 \cdot 40150} = 0,0162.$$

Расход синтез-газа для подсвечивания (в натуральном выражении), м<sup>3</sup>/с

$$B_{сгаз} = \frac{B_{уг}^{усл} \cdot Q_{уг} \cdot B_{маз}^{мин}}{100 \cdot Q_{нсгаз}^P} = \frac{0,533 \cdot 29,3 \cdot 4}{100 \cdot 11,36} = 0,05725.$$

Количество выделенного тепла за единицу времени при сжигании данного угля при подсвечивании:

$$Q_{угля} = B_{уг} \cdot Q_H^P = 0,758 \cdot 20600 = 15\,608 \text{ кДж/с.}$$

Количество выделенного тепла за единицу времени при сжигании мазута для подсвечивания пылеугольного факела в топке:

$$Q_{\text{под.маз.}} = B_{\text{маз.}} \cdot Q_{\text{н.маз.}}^p = 0,0162 \cdot 40150 = 650 \text{ кДж/с.}$$

Количество выделенного тепла за единицу времени при сжигании синтез-газа для подсвечивания пылеугольного факела в топке:

$$Q_{\text{под.с.газ.}} = B_{\text{с.газ.}} \cdot Q_{\text{н.с.газ.}}^p = 0,05725 \cdot 11360 = 650 \text{ кДж/с.}$$

Тепловая мощность, которая должна выделяться в горелке при сгорании синтез-газа  $N = 650$  кВт.

Энергетический баланс при стабилизации пылеугольного факела

$$Q_{\text{полн.}} = Q_{\text{угля.}} + Q_{\text{под.маз.}} = Q_{\text{под.с.газ.}} + Q_{\text{угля.}}$$

$$B_p \cdot Q_n^p = B_{\text{уг.}} \cdot Q_n^p + B_{\text{маз.}} \cdot Q_{\text{н.маз.}}^p = B_{\text{уг.}} \cdot Q_n^p + B_{\text{с.газ.}} \cdot Q_{\text{н.с.газ.}}^p$$

Рабочая масса каменного угля: влага  $W^r = 6\%$ ; зола  $A^r = 32\%$ ; сера  $S_{op} + S_k = 2,2\%$ ; углерод  $C^r = 55,2\%$ ; водород  $H^r = 2,5\%$ ; азот  $N^r = 1,3\%$ ; кислород  $O^r = 1,1\%$  Низшая теплота сгорания каменного угля  $Q_n^p = 20,6$  МДж/кг. Выход летучих,  $V^{daf} = 12,0\%$ . Характеристики различных технологий газификации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики технологий газификации каменного угля

Показатель	Газификация кислородом	Газификация паром и кислородом	Газификация паром
Основные горючие компоненты газа,			
Оксид углерода, %	71,1	54	43,5
Водород, %	28,2	45,3	56,2
Низшая теплота сгорания газа, МДж/м <sup>3</sup>	11,85	11,54	11,36
Удельный расход электроэнергии на газификацию, кВт·ч/кг угля	0,1	0,528	1,27

Расчеты энергетических балансов показали, что при заданном энергетическом потенциале продуктов газификации наибольший расход электроэнергии будет при паровой газификации. Исходя из этого определены электротехнологические параметры опытно-промышленной установки, обеспечивающие при различных технологиях электротермической газификации тепловую мощность сгорания синтез-газа не менее 650 кВт. В табл. 2 приведены электротехнологические параметры опытно-промышленной установки при паровой газификации угля марки Т.

Таблица 2

Электротехнологические параметры опытно-промышленной установки

Низшая теплота сгорания сырья, МДж/кг	Энергетический потенциал синтез-газа, МДж/кг	Удельный расход электроэнергии на газификацию, МДж/кг сырья	Расход угля для получения синтез-газа, кг/ч	Потребляемая электрическая мощность, кВт	Расход пара, кг/ч
20,6	11,0	4,54	88,4	111	72,1

Согласно проведенным расчетам при номинальной нагрузке котла расход угля составляет 0,758 кг/с, расход подсвечивающего синтез-газа 0,05725 м<sup>3</sup>/с. Определены параметры системы подсветки пылеугольного факела при использовании синтез-газа, полученного электротермической газификацией угля. Для обеспечения заданной производительности по синтез-газу при паровой технологии газификации достаточно электрической мощности 150 кВт, при парокислородной газификации достаточно электрической мощности 86 кВт.

Максимальная электрическая мощность потребуется при паровой газификации. При парокислородной газификации при той же производительности по синтез-газу

электрическая мощность установки и, соответственно, расход электроэнергии могут быть уменьшены в 1,74 раза. Электрическая мощность установки электрошлаковой газификации составляет всего 0,53-0,92% от тепловой мощности пылеугольного котла. По данным [5], при плазменной подсветке электрическая мощность плазмотронов составляет в зависимости от типа угля и горелки 0,5-2% от тепловой мощности котла.

Определены основные параметры комбинированной пылегазовой горелки, предназначенной для сжигания тощих каменных углей с низким выходом летучих. В горелке происходит термopодготовка аэросмеси за счет выделенного тепла при сгорании синтез-газа и последующее смешение продуктов этого процесса в топочной камере, позволяющее улучшить воспламенение и выгорание топлива, снизить механический недожог. Основные характеристики горелки приведены в табл. 3.

Таблица 3

#### Основные характеристики горелки

Наименования	Результат
Тепловая мощность, МВт	8,1
Расход синтез-газа, м <sup>3</sup> /с	0,02865
Расход угля, кг/с	0,379
Расход вторичного воздуха на выходе из горелки, м <sup>3</sup> /с	7,93

**Выводы.** Использование для подсветки пылеугольного факела синтез-газа, полученного электротермической газификацией основного топлива-угля, позволит по сравнению с мазутной подсветкой улучшить экономические и экологические характеристики котельных агрегатов. Электротермические газификаторы могут работать непрерывно несколько месяцев, что является преимуществом по сравнению с плазменной подсветкой.

#### Литература

1. *Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А.* Анализ технологий газификации твердого топлива // Вестник Чувашского университета. 2010. № 3. С. 194-205.
2. Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС (безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела). Новосибирск: Наука, 1998. 137 с.
3. Нормы расхода газомазутного топлива при сжигании каменных углей с выходом летучих веществ менее 20% на тепловых электростанциях Минэнерго СССР. РД 34.10.501-90. М.: СПО Союзтехэнерго, 1985.
4. *Перегудов В.С.* Расчет плазменной стабилизации горения пылеугольного факела // Теплофизика и аэромеханика. 2003. № 1. С. 123-133.
5. *Петров С.В., Литовкин В.В.* К вопросу о применении плазмы для эффективного сжигания низкорекреационных углей [Электронный ресурс]. URL: [plazer.com.ua/docs/pdf/burn\\_cox.pdf](http://plazer.com.ua/docs/pdf/burn_cox.pdf).
6. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной / *А.Н. Тимошевский, И.М. Засыпкин, С.П. Ващенко и др.* // Новости теплоснабжения. 2002. № 1(17), янв. С. 14-21.
7. *Тарасов В.А., Ковалев В.Г., Лоскутов В.И.* Газификация твердых видов топлива с применением электронагрева // Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 170-178.
8. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. 2-е изд., перераб. / под ред. Н.В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. 295 с.

**АФАНАСЬЕВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ.** См. с. 99.

**КОВАЛЕВ ВЛАДИМИР ГЕННАДЬЕВИЧ.** См. с. 100.

**ТАРАСОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ.** См. с. 100.

**АЛЕКСЕЕВ СТАНИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ** – магистрант кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары.

**ALEKSEEV STANISLAV NIKOLAEVICH** – master's program student of Heat Power Plants Chair, Chuvash State University, Russia, Cheboksary.