

лее эффективным приемом, чем увеличение диаметров теплообменных поверхностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сорока, Б. С. Современное состояние и анализ эффективности утилизации теплоты в топливных печах с использованием высокотемпературных рекуператоров. Часть 1. Современные утилизаторы теплоты в процессах использования и производства газового топлива / Б. С. Сорока, Н. В. Воробьев, В. А. Згурский / Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2013. – № 3. – С. 60–68.
2. Oyelami, A. T. Performance Evaluation of Recuperative Heat Exchanger in Rotary Furnace / A. T. Oyelami, S. B. Adejuyigbe, M. A. Waheed // Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 WCE 2012, July 4–6, 2012, London, U.K. – 7 p.
3. Industrial Application of Submerged Combustion Melters / L. S. Piore [et al.]. Kyiv: Fact Publ, 2006. – 240 p. (USA copyright).
4. Wendt, P. Modernization and efficiency of thermal processing plants / P. Wendt, F. Kühn // Heat Processing (9). – 2011. – Issue 1. – P. 21–28.
5. Способ отжига рулонов в колпаковой печи: пат. РФ 215104 МПК8 C21D9/663 1999 / М. П. Мишин, А. Ф. Сарычев, С. А. Лебедев [и др.]; заявитель и собственник ООО «Магнитогор. металлург. комб.» – № 97116621/02; заявл. 07.10.1997; опубл. 20.01.1999.
6. Technical data bulletins: Bell type annealing furnaces. – EM EM ENGINEERS. – Режим доступа: <http://www.mmfurnaces.com/prod01.htm>.
7. Радиационный рекуператор: заявка на изобрет., Украина, № а 201208213: МПК (2012) F28D 7/00, 7/10 / Б. С. Сорока, П. Шандор, Н. В. Воробьев; заявитель и собственник патента Ин-т газа НАН Украины; заявл. 05.07.2012. – 5 с.
8. Теплотехнические расчеты при автоматизированном проектировании нагревательных и термических печей: справ. изд-е // Науч. труды ОАО «Институт стальпроект» / В. Л. Гусовский [и др.]; под ред. А. Б. Усачева. – М.: Черметинформация, 1999. – 185 с.
9. Сорока, Б. С. Расчет основных характеристик высокотемпературного трубчатого рекуператора при интенсификации теплообмена внутри труб / Б. С. Сорока, Н. В. Воробьев, Р. С. Карабчиевская // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 5. – С. 47–54.
10. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). ВТИ та ЦКТИ – НПО ЦКТИ. – СПб., 1998. – 256 с.
11. Комплексный анализ рабочего процесса в высокотемпературном рекуператоре // Б. С. Сорока [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 4. – С. 71–80.

Поступила 25.10.2012

УДК 620.9:662.638

### **ОПЫТ СЖИГАНИЯ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ\***

**Докт. техн. наук, проф. ЖИХАР Г. И., магистрант ШЕЛЕПОВА Я. И.**

*Белорусский национальный технический университет*

На тепловых электростанциях Белглавэнерго ранее широко использовался фрезерный торф. В Белорусской энергосистеме в 70-х гг. XX ст. 20 % установленной мощности котлов работало на фрезерном торфе [1].

Недостаточное обеспечение Республики Беларусь собственными запасами ископаемого топлива, 82–85 % которого импортируется в страну из одного источника, и стремительный рост цен на нефть и природный газ на мировом рынке вынуждают по-новому взглянуть на решение проблемы обеспечения страны топливно-энергетическими ресурсами. Замещение местными видами топлива и горючими отходами производства импортиру-

---

\* Печатается в порядке обсуждения.

емых природного газа, нефтепродуктов и угля – одно из основных мероприятий по обеспечению доли местных топливно-энергетических ресурсов в балансе котельно-печного топлива.

Один из таких, пожалуй, наиболее эффективных источников – фрезерный торф, который добывается на многих действующих торфопредприятиях страны. Основными требованиями к котельным агрегатам, предназначенным для сжигания фрезерного топлива, являются следующие.

1. Предварительная подсушка топлива до поступления в топочное пространство. Предварительная подсушка торфа вне топки должна обеспечивать конечную влажность торфяной пыли примерно до 40 %; при этой влажности фрезерный торф горит устойчиво.

2. Создание аэродинамических условий в топочной камере для интенсификации подсушки пыли и перемешивания горючих компонентов. Благоприятные аэродинамические условия достигаются соответствующим конструктивным выполнением горелки, конфигурацией топочной камеры способом подвода воздуха в топку.

3. При относительно низкой теплоте сгорания торфа, понижающейся с увеличением влажности, степень экранирования топки не должна быть слишком высокой (порядка 85 %).

4. Отсутствие в зоне воспламенения экрана на передней стенке топки. Это необходимо для обеспечения интенсивного воспламенения влажной смеси пыли и газов.

5. Должны быть развиты хвостовые поверхности котла.

Наиболее распространенным топочным устройством для сжигания многобалластных топлив (торф, сланцы, бурые и каменные угли с повышенным выходом летучих) является топка с шахтно-мельничной установкой. В этих топках на электростанциях Белглавэнерго, таких как Светлогорская ГРЭС (бывшая Василевичская ГРЭС), Бобруйская ТЭЦ, Жодинская ТЭЦ (Смолевичская ГРЭС), Лидская ТЭЦ, БелГРЭС и других, сжигался фрезерный торф с низкой степенью разложения (10–25 %).

Волокнистая структура фрезерного торфа при высокой влажности вызывает затруднения в зимнее время из-за примерзания торфа к стенкам вагона при его транспортировании. Для борьбы с застреванием торфа применяются электровибраторы, устанавливаемые обычно в горловине бункера. Как показал опыт эксплуатации, при поступлении на электростанцию влажного торфа (53–55 %) электровибраторы для такого торфа оказались малоэффективными. В связи с этим на Светлогорской ГРЭС по опыту Витебской ТЭЦ оборудовали торфяные бункеры «стреляющими соплами» для обрушения торфа сжатым воздухом, а также установили котлы ПК-14-2 паропроизводительностью 220 т/ч, работающие на фрезерном торфе и обо-

рудованные шахтными сепараторами с амбразурами с горизонтальным рассекателем.

Котел ПК-14-2 имеет следующие технические характеристики:

паропроизводительность – 220 т/ч;

температура перегретого пара – 540 °С;

давление перегретого пара – 9,8 МПа;

температура питательной воды – 215 °С;

температура греющего воздуха – 405 °С.

Котлоагрегаты оборудованы четырьмя шахтными мельницами с гравитационными шахтами. Распашное устройство – мазутные форсунки парового распыливания производительностью 820 кг/ч – установлены на боковых стенах. Молотковые мельницы типа 300/2004/730, мощность двигателя – 260 кВт. Питатели пыли типа 800/4800, пластинчатые с верхней подачей топлива.

Для совершенства горелочных устройств, по предложению МЭИ [2], в амбразурах топок котлов были установлены одноструйные горелки с повышенной устойчивостью зажигания за счет аэродинамического торможения периферийных слоев факела. Для обдувки поверхностей нагрева были установлены восемь радиационных обдувочных аппаратов ОПР-5 в топочной камере и шесть обдувочных аппаратов ОПК-8 за пароперегревателем.

Воздух, необходимый для горения, подавался через мельницы (первичный воздух) и шлицы, расположенные над и под амбразурами (вторичный воздух). Для снижения шлакования и смещения ядра факела к центру топки часть воздуха подавалась через шлицы на задней стенке топки (третичный воздух).

После реконструкции были проведены испытания при нагрузке котла 107–242 т/ч. Опыты проводили при сжигании фрезерного торфа:  $W^r = 38\text{--}42\%$ ,  $A^r = 7,3\text{--}9,0\%$ ,  $Q_i = 9623\text{--}10460$  кДж/кг, избытки воздуха  $\alpha''_T = 1,22\text{--}1,28$  при нагрузке  $D_k = 200\text{--}240$  т/ч и  $\alpha''_T = 1,5\text{--}2,0$  при  $D_k = 150$  т/ч, тепловое напряжение топочного объема составляло  $Q/V_T = (70,94\text{--}155,84)$  кВт/м<sup>3</sup>. Температура горячего воздуха  $t_{г.в} = 290\text{--}395$  °С при распределении: первичного – 40–60 %, вторичного – 60–40 %. Скорость воздуха: первичного  $W_1 = 8,0\text{--}14,3$  м/с, вторичного  $W_2 = 40\text{--}90$  м/с. Скорость пылевоздушной смеси: в шахте – 2,56–4,64 м/с, в амбразуре – 22–41 м/с.

Опыты показали, что на всем диапазоне нагрузок котел работал устойчиво, если горение происходило с небольшим избытком воздуха ( $\alpha''_T = 1,22\text{--}1,28$ ). Длительная работа котла показала, что при новом горелочном устройстве температура газов на выходе из топки при номинальной нагрузке снизилась на 100–120 °С.

Шлакование пароперегревателя и фестона не наблюдалось. Из-за снижения температуры газов в конвективных поверхностях температура уходящих газов снизилась на 10–15 °С при  $D_k = 200\text{--}220$  т/ч и  $t_{п.в} = 210\text{--}215$  °С. Избыток воздуха поддерживался  $\alpha''_T = 1,22\text{--}1,28$ . Потеря теплоты с уходящими газами снизилась примерно на 1 % и составила  $q_2 = 7,2\text{--}7,8\%$ . Потеря теплоты с механическим недожогом  $q_4 = 1,95\text{--}3,88\%$ , потери  $q_3 = 0$ ,  $q_5 = 0,5\%$ .

В диапазоне нагрузок котла  $D_k = 110\text{--}240$  т/ч КПД котла «брутто» изменялся в пределах 87,93–89,67 %. Максимальный КПД имеет место при  $D_k = 160\text{--}200$  т/ч. КПД котла после реконструкции повысился примерно на 1 %. КПД котла «нетто» составил 85,0–87,3 %. Возможно повышение производительности котла до 250 т/ч с тепловым напряжением топочного объема  $Q/V_T = 162$  кВт/м<sup>3</sup>.

Удельные расходы электроэнергии составили:

- на помол  $\mathcal{E}_{\text{пл}} = 2,78\text{--}4,6$  кВт·ч/т топлива или  $\mathcal{E}_{\text{пл}} = 0,812\text{--}1,17$  кВт·ч/т пара;

- на дутье  $\mathcal{E}_d = 1,67\text{--}2,10$  кВт·ч/т пара;

- на тягу  $\mathcal{E}_T = 2,37\text{--}2,86$  кВт·ч/т пара.

Суммарный удельный расход электроэнергии на дутье и тягу

$$\mathcal{E}_d + \mathcal{E}_T = 4,04\text{--}4,96 \text{ кВт·ч/т пара.}$$

Суммарный удельный расход электроэнергии на собственные нужды

$$\mathcal{E}_{\text{сн}} = 4,852\text{--}6,13 \text{ кВт·ч/т пара.}$$

На Жодинской ТЭЦ (Смолевичской ГРЭС) установлен котел ПК-20, оборудованный горелками для сжигания фрезерного торфа в плоских параллельных струях [2].

Характеристики котла:

паропроизводительность – 120 т/ч;

температура перегретого пара – 510 °С;

давление перегретого пара – 10,88 МПа;

температура питательной воды – 215 °С.

Испытания проводили при сжигании фрезерного торфа:  $W^* = 47,1\text{--}49,35$  % при нагрузке котла  $D_k = 116\text{--}120$  т/ч; при изменении коэффициента избытка воздуха  $\alpha''_{\text{в.э.2}}$  в пределах 1,08–1,38, что примерно соответствует коэффициенту избытка воздуха в топке  $\alpha''_T = 1,01\text{--}1,31$  и избытка воздуха в горелках  $\alpha_r = 0,89\text{--}1,19$ .

Присосы воздуха в газоходах второй ступени водяного экономайзера и пароперегревателя приняты равными 0,02 и 0,05, а присосы воздуха в топку для данной нагрузки приняты 0,12. При номинальной нагрузке котла сумма потерь теплоты с ростом избытка воздуха в указанном диапазоне его изменения возрастает от 10,9 до 12,1 %, а КПД «брутто» изменяется от 89,1 до 87,9 %. Потеря теплоты с уходящими газами в этом случае изменяется от 7,5 до 9,1 %, с механическим недожогом  $q_4$  – от 0,50 до 0,35 %. При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha''_{\text{в.э.2}} = 1,20$  потери теплоты с химическим недожогом ( $\alpha''_T = 1,0$ ) составляют всего до 0,16 %.

Таким образом, при нагрузке, близкой к номинальной, экономически целесообразна работа котла с малыми избытками воздуха  $\alpha''_{\text{в.э.2}} \sim 1,27$  ( $\alpha''_T = 1,08$ ).

Примером эффективного сжигания фрезерного топлива и природного газа является работа котлов Минской ТЭЦ-2 типа С-60/34 производительностью 90 т/ч. На котле были установлены пылегазовые горелки МЭИ с тонкими струями. Производительность горелки по газу составляет 4000 нм<sup>3</sup>/ч, давление газа перед горелками при  $D_k = 90$  т/ч равно 5,49 КПа.

Воздух подавался через эжекционные сопла и через воздуховод и головку сепарационной шахты.

При сжигании газа мельницы отключали заслонкой, расположенной в сепарационных шахтах. Максимальный КПД, равный 94–95 %, достигался при коэффициенте избытка воздуха на выходе из топки  $\alpha''_T = 1,05$  при паропроизводительности котла  $D_k = 60–90$  т/ч и тепловом напряжении топочного объема  $Q/V_T = 98,85–205,85$  кВт/м<sup>3</sup>.

При сжигании фрезерного торфа во избежание засорения газовых сопел в газовые коллекторы подавали воздух в количестве примерно 5 % от его общего расхода.

Широко использовался фрезерный торф и на тепловых электростанциях России [3]. Например, фрезерный торф эффективно сжигался на ГРЭС № 5 Мосэнерго, Ярославской ГРЭС, ГРЭС № 8 Ленэнерго, Владимирской ТЭЦ, Ивановской ГРЭС и др.

Установлено, что для углубления подсушки и повышения удельной производительности мельницы при размоле фрезерного торфа целесообразными предельными температурами горячего воздуха следует считать  $t_{г.в} = 300–350$  °С, а при использовании другого сушильного агента (например, горячих газов или смеси их с воздухом) практически допускается температура по условиям надежности работы мельницы  $t_{г.в} = 450$  °С. При высоковлажностном торфе  $W_1 \geq 5$  % принимается  $t_{г.в} = 400$  °С.

Если принять, что вполне устойчивое горение в топке имеет место при влажности пыли  $W_p = 40$  %, а подача в мельницу первичного воздуха равна 60 % от его общего количества, то максимальная влажность исходного фрезерного торфа, которая может быть допущена, составит: при  $t_{г.в} = 150$  °С  $W'' = 47$  %; при  $t_{г.в} = 350$  °С  $W'' = 55$  % и при  $t_{г.в} = 450$  °С  $W'' = 57$  %.

Топки с амбразурами, молотковыми мельницами и шахтными сепараторами, так называемые шахтно-мельничные топки, не смогли обеспечить требуемое большое повышение единичной мощности (от 230 до 640 т/ч пара и выше). Шахтные сепараторы большой мощности становились громоздкими и взрывоопасными, а обычное непосредственное присоединение их к топочной камере стало невозможным. Радикальное улучшение работы топок с молотковыми мельницами произошло в результате оборудования схем пылеприготовления (прямого вдувания) более совершенными сепараторами пыли (центробежными – для каменных углей, инерционными – для бурых), применения пылеугольных горелок, соединения мельничных систем и топки с помощью пылепроводов и в целом благодаря переводу схемы пылеприготовления на работу под поддувом. Избыточное давление перед размольной установкой (~0,581–1,962 кПа) расходуется на преодоление сопротивления дополнительно после молотковой мельницы. Такие схемы пылеприготовления широко применяются для каменных и бурых углей к котлам средней и большой мощности.

Для мощных блоков, например с турбиной 210 МВт, разработан котельный агрегат Е<sub>п</sub>-670-140 (ТПЕ-208), предназначенный для работы на фрезерном торфе, а также мазуте и торфе (количество мазута – 30 % по теплоте [4]). Котельный агрегат – двухкорпусный. Каждый корпус представляет собой самостоятельный агрегат. Корпуса симметричны, могут работать независимо друг от друга. Каждый корпус имеет П-образную компоновку и состоит из топочной камеры и конвективной шахты. Котел барабанный, с естественной циркуляцией, на высокие параметры, с пром-

перегревом. Котел предназначен для работы с уравновешенной тягой с твердым шлакоудалением. Для удаления шлака из-под котла служит установка типа «сдвоенный шнек», в которой шлак измельчается и перебрашивается от бункеров в канал золоудаления.

Пароперегреватель высокого давления выполнен в виде двух (на корпус) независимых потоков. Температура перегретого пара регулируется впрыском собственного конденсата в парохладитель.

Тракт пара промперегревателя состоит из двух (на корпус) независимых потоков. Температура пара промперегревателя регулируется методом изменения расхода газов (газовое регулирование).

Предусмотрен также аварийный впрыск питательной воды. Для очистки поверхностей нагрева котла от загрязнений предусмотрены: паровая обдувка топочных экранов, виброочистка ширмовых поверхностей, расположенных в конвективной шахте.

Для подогрева воздуха имеется трубчатый воздухоподогреватель из труб диаметром 40 мм с толщиной стенки 1,6 мм (сталь ст. 2), вынесенный за пределы котельной. В каждом корпусе – по восемь эжекторных щелевых горелок типа МЭИ, присоединенных по две к четырем молотковым мельницам.

Торфовоздушная смесь (первичный воздух) выходит из вертикальных щелей со скоростью около 10 м/с. Ее смешение со вторичным воздухом начинается внутри горелок, из которых пылевоздушный поток выходит со скоростью примерно 30–40 м/с. Во избежание шлакования боковых экранов все горелки несколько повернуты в сторону оси топочной камеры. Кроме того, на задней стенке топки установлены против горелок 16 щелевых сопел для вторичного вдувания в горизонтальном направлении дополнительного воздуха. Вторичное дутье через заднюю стенку топки рассматривается как резервный способ регулирования топочного режима при изменении условий сжигания топлива.

Технические характеристики котла Е<sub>п</sub>-670-140:

паропроизводительность – 670 т/ч;

расход пара через промперегреватель – 590 т/ч;

давление пара на выходе из:

пароперегревателя высокого давления – 13,72 МПа;

промперегревателя – 2,45 МПа;

температура:

пара высокого давления – 545 °С;

пара промперегрева – 545 °С;

питательной воды – 145 °С.

## ВЫВОД

Приведенный материал показывает, что накоплен большой положительный опыт сжигания фрезерного торфа в котлах тепловых электростанций. В настоящее время, когда намечено в ближайшем будущем увеличение добычи фрезерного торфа, этот опыт его сжигания может быть использован при решении проблемы замещения импортируемых источников топлива местными видами топлива, одним из которых является фрезерный торф.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическое использование фрезерного торфа / В. М. Попов [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – С. 303.
2. К о в а л е в, А. П. Сжигание фрезерного торфа в системе плоских параллельных струй в шахтно-мельничных топках / А. П. Ковалев, Д. М. Хзмалян. – М.: Энергия, 1964. – С. 96.
3. Г о р ю н о в, В. П. Из опыта сжигания фрезерного торфа на Шатурской ГРЭС / В. П. Горюнов // Сжигание торфа на электростанциях. – М.; Л.: Госэнергонадзор, 1961. – С. 246.
4. М е й к л я р, М. В. Современные котельные агрегаты ТКЗ / М. В. Мейкляр. – М.: Энергия, 1978. – С. 223.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 12.11.2012