

УДК 621.181

В.К. Любов

Любов Виктор Константинович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 150 публикаций в области совершенствования энергохозяйств промышленных предприятий.



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрены способы повышения эффективности работы котельных установок, сжигающих древесные отходы; предложены пути увеличения их экономических и экологических показателей.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, древесные отходы, топочная камера, котлоагрегат, эмиссия оксидов азота и оксида углерода, коэффициент полезного действия, золоуловитель, потери теплоты, воздухоподогреватель, газоочистная установка.

Объекты малой энергетики Архангельской области в основном оборудованы котлами со слоевыми топками для сжигания каменных углей Печорского бассейна, а также топками скоростного горения и с наклонными колосниковыми решетками для сжигания древесных отходов [1–5, 7–9]. Кроме этого, в котельных широко используют котлы малой мощности, работающие на мазуте [7].

Топки с наклонной колосниковой решеткой установлены на многих предприятиях области. Они позволяют сжигать топливную смесь, состоящую из опилок, щепы и стружки. Однако возможности данных топок ограничены необходимостью поддерживать скорость первичного воздуха ниже критической для обеспечения устойчивости плотного слоя. Кроме того, они очень чувствительны к изменению качества отходов и их сыпучести [1, 2, 5].

При испытании котлоагрегатов ДКВр-10-13 ст. № 2, 4 ОАО «Лесозавод № 3», оборудованных шахтными предтопками с наклонными колосниковыми решетками и рекуперативными воздухоподогревателями, было отмечено, что они не обеспечивают высокую эффективность использования древесных отходов. КПД брутто котлов $\eta_{бр}$ изменялся в диапазоне 58,3 ... 76,9 %, при этом потери теплоты с уходящими газами $q_2 = 18,9 \dots 22,4$ %, с химической неполнотой сгорания $q_3 = 0,14 \dots 16,55$ %, с механической неполнотой сгорания $q_4 = 0,13 \dots 0,2$ %, от наружного охлаждения $q_5 = 3,85 \dots 4,71$ %. Удельный расход условного топлива на выработку 1 ГДж составлял 44,4 ... 58,5 кг у.т./ГДж.

Низкий уровень потерь теплоты с механической неполнотой сгорания топлива объясняется малой зольностью ($A^f = 0,17$ %) древесных отходов, а также возвратом в топку недогоревших коксовых частиц (на котлах установлены дымососы – золоуловители [15]).

При проведении испытаний котлоагрегатов ДКВр-10-13 ст. № 1, 3, оборудованных чугунными водяными экономайзерами для обогрева сортировочных бассейнов, были выявлены в основном сходные проблемы. Однако более глубокое охлаждение продуктов сгорания за счет экономайзеров обеспечило более высокие значения КПД брутто $\eta_{к.а}^{бр} = 72,9 \dots 78,4$ % и меньший удельный расход условного

топлива 43,4...46,6 кг у.т./ГДж. При проведении испытаний котлов ДКВр-10-13 ст. № 1–4 максимальное теплонапряжение зеркала горения $q_R = 0,8$ МВт/м², а эмиссии вредных ингредиентов изменялись в следующем диапазоне: NO_x = 29 ... 68 мг/МДж; CO = 0,10 ... 0,19 г/МДж для котла № 2 и CO = 0,27 ... 14,58 г/МДж для № 1, 3, 4.

Для повышения технико-экономических и экологических показателей работы котлов, оборудованных неподвижными колосниковыми решетками, была оптимизирована конструкция узла ввода вторичного дутья за счет применения дискретно расположенных сопел прямоугольной формы. Кроме того, были разработаны технические решения, обеспечивающие более оптимальное распределение топлива по длине решетки и организацию «активной» аэродинамики в надслоевой области предтопок. Реализация разработанных мероприятий позволит обеспечить низкоэмиссионное сжигание древесных отходов по трехступенчатой схеме.

При обследовании котельной ЛДК-12 с котлоагрегатами КЕ-10-14, оборудованными аналогичными предтопками, был выявлен круг проблем, близких к ранее изложенным, поэтому разработанные технические решения предложено использовать и при реконструкции данных котлов.

Топки скоростного горения системы В.В. Померанцева с зажатым слоем позволяют значительно повысить теплонапряжение зеркала горения за счет увеличения скорости воздуха, пронизывающего слой топлива. Они широко используются для котлов ДКВр и КЕ на предприятиях лесопромышленного комплекса (ЛПК) [1– 3, 5]. В котельных ОАО ЛДК-3 и ЗАО «Лесозавод 25» установлено по три утилизационно-энергетических котлоагрегата КЕ-10-14МТ и по два мазутных ДЕ-25-14. В 1997 г. на ЛДК-3 была также пущена в эксплуатацию финская водогрейная котельная с двумя утилизационно-энергетическими котлами мощностью по 6 МВт.

Топливом для утилизационно-энергетических котлов служат древесные отходы лесопильного производства. Однако в последнее время стали сжигать и древесные отходы с отвалов. Анализ проб древесных отходов с ОАО ЛДК-3, СЛДК, СЦБК и других предприятий лесопромышленного комплекса (ЛПК) показал, что повышенное содержание внешней влаги приводит к значительному снижению нижней теплоты сгорания на рабочую массу (до $Q_i^r = 3075$ кДж/кг). Для повышения энергоэкологоэкономических показателей котлов необходимо снижать содержание внешней влаги в отходах, что можно обеспечить за счет естественной подсушки на промежуточных складах, а также в цикле предварительной подготовки отходов к сжиганию. Необходимо отметить, что сроки хранения древесных отходов должны быть ограничены для исключения процесса гниения. Кроме того, при длительном хранении происходит засорение древесных отходов внешними минеральными примесями. При этом зольность на сухую массу иногда повышается до $A^d = 12$ %, что также снижает их тепловую ценность. Для получения полной картины топливных балансов предприятий ЛПК необходимо периодически определять теплотехнические характеристики всех видов образующихся древесных отходов, что позволит с большой степенью точности прогнозировать качество древесного топлива и учитывать возможную динамику его изменения при эксплуатации котлоагрегатов, а также определять оптимальные соотношения компонентов в смеси древесных отходов и схемы их энергетического использования [4, 8].

Для оценки эффективности работы утилизационно-энергетических котлоагрегатов с предтопками скоростного горения были проведены исследования в соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленно-эксплуатационным испытаниям второй категории сложности. Полученные результаты обрабатывали с

использованием программно-методического комплекса [6]. Состав продуктов сгорания исследовали с помощью газоанализаторов TESTO-350 и IMR-3000R. Анализ результатов испытаний котлоагрегатов показан ряд недостатков в их работе, характерных и для других котельных региона.

Общим недостатком для котлов ОАО ЛДК-3 является работа при большом разрежении в топке ($S_T = 70 \dots 160$ Па), что неблагоприятно сказывается на функционировании всего котлоагрегата. При высоком разрежении значительно возрастает присосы воздуха в газовый тракт, возникают высокоамплитудные пульсации в топке, ухудшаются условия выгорания топлива вследствие затягивания факела в конвективные поверхности нагрева, создаются пожароопасные условия в кубах рекуперативных воздухоподогревателей. На многих котлах была отмечена неудачная трассировка воздухопроводов и газоходов в аэродинамическом и компоновочном отношениях. Эксплуатационные испытания показали, что существующая схема ввода подового дутья не обеспечивает эффективного догорания топливных частиц ввиду наличия «мертвых» зон. Более рациональной схемой является организация «многовихревой» аэродинамики со встречно-смещенными струями [3, 8–10].

КПД брутто котлов № 1, 2 ОАО ЛДК-3 в зависимости от нагрузки изменялся в диапазоне 65,9 ... 80,11 %. При этом потери теплоты составляли: $q_2 = 9,43 \dots 13,88$ %, $q_3 = 0,46 \dots 20,14$ %, $q_4 = 0,74 \dots 6,24$ %, $q_5 = 1,76 \dots 10,83$ %; эмиссии вредных ингредиентов: $\text{NO}_x = 39 \dots 149$ мг/МДж, $\text{CO} = 0,65 \dots 26,10$ г/МДж. Удельный расход условного топлива – 42,6 ... 51,8 кг у.т./ГДж. Модернизация системы подового дутья увеличила максимальный КПД брутто котлов до 82,1 % и уменьшила выброс вредных веществ.

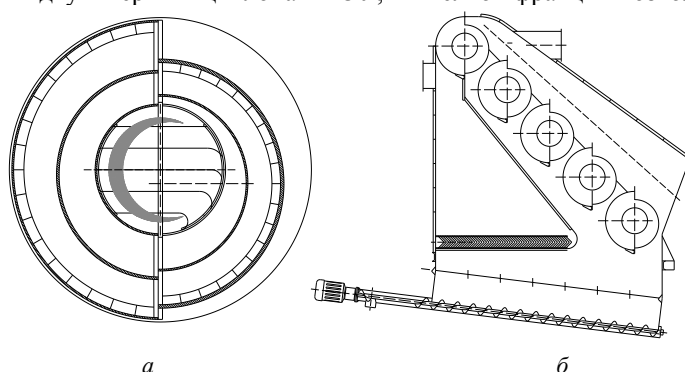
Учитывая, что максимальная температура в топках котлов не превышает 1473 К, образование термических NO_x практически не происходит, генерация NO_x идет за счет окисления азота топлива и зависит от коэффициента избытка воздуха в топке. Большие значения эмиссии CO свидетельствуют о нерациональном распределении воздуха или о его недостатке. Следует также отметить неоптимальный ввод воздуха в предтопок, который осуществляется со стороны боковых стен, более эффективным является фронтальной.

Кроме того, котлы ОАО ЛДК-3 работают без золоуловителей. Выброс золовых частиц неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей среды в районе расположения котельной, а также наносит вред готовой продукции предприятия, складываемой на открытом воздухе.

Для повышения экологических показателей котельной и устранения ущерба от снижения качества пиломатериалов была разработана газоочистная установка (ГОУ). Однако тесная компоновка основного и вспомогательного оборудования котельной исключила возможность оснащения котлов индивидуальными ГОУ, поэтому ООО «Валер» при участии автора был разработан проект объединенной ГОУ (на три котла), расположенной за пределами котельной перед дымовой трубой. Данная ГОУ состоит из пяти коаксиальных циклонных элементов, расположенных по ходу газов, каждый из которых имеет по четыре «обратных» связи для повышения степени очистки (см. рисунок). Наличие жалюзийного сепаратора в нижней части бункера исключает явление вторичного уноса уловленных частиц. Испытания ГОУ показали, что ее КПД = 79,6 ... 86,6 % при расходе продуктов сгорания 10,6 ... 11,8 $\text{нм}^3/\text{с}$ (проектный $\geq 13,9$ $\text{нм}^3/\text{с}$), а ее сопротивление – 0,60 ... 0,72 кПа. Данная степень очистки газов получена при работе двух котлов КЕ-10-14, сжигающих древесные отходы, в которых доминировал опилоч (влажность на рабочую массу $W'_t = 48,1$ %). Запыленность дымовых газов определяли при изокINETических усло-

виях, используя метод внутренней фильтрации газов через аллонжи с объемной набивкой из стекловолна и результаты предварительно проведенных тарировок [14]. Расход отбираемого газа регулировали с помощью аспирационного устройства типа ПУ-4Э.

Исследования показали, что материал, уловленный в ГОУ, является полифракционным и крупнодисперсным ($n = 1,67$, $b = 0,2 \cdot 10^{-4}$), при этом два первых по ходу газов циклона улавливают преимущественно крупную фракцию с диаметром частиц $d_p \geq 0,4$ мм, которой содержится около 52 %. Доля горючих в данной фракции $C^r = 85 \dots 92$ %, а летучих $C^l = 5 \dots 10$ % (от первоначального количества). Реконструкция зольного бункера с организацией отдельного сбора и вывода крупной, уловленной в двух первых циклонах ГОУ, и мелкой фракций позволит получить



Комбинированная газоочистная установка: *a* – циклонный элемент с обратными связями; *б* – продольный разрез ГОУ

углеродный сорбент с насыпной плотностью $100 \dots 170$ кг/м³ и удельной поверхностью $350 \dots 500$ м²/г. Производительность установки по углеродному сорбенту составляет 80 кг/сут при работе двух котлов на средних нагрузках (максимальная – до 260 кг/сут). Качественные показатели данного сорбента выше, чем у коксовой пористой крошки (КПК), получаемой при сжигании дробленых бурых углей по низкотемпературной вихревой технологии, но ниже, чем у КПК после парогазовой активации в реакторе, а также активированных углей марок АГ-3, АР-А. Мелкую фракцию повышенной зольности следует использовать в сельском хозяйстве. Результаты химического анализа золы, образующейся при сжигании древесных отходов, показали, что она богата элементами, необходимыми для повышения плодородия почвы.

Данное направление по переводу котлов, сжигающих древесные отходы, в энерготехнологический режим работы является достаточно перспективным, так как наряду с уменьшением выбросов твердых частиц в атмосферу позволяет получить углеродный сорбент среднего качества (низкой стоимости), который можно использовать для очистки сточных вод и уходящих газов промышленных предприятий, а также мелкофракционную золу для повышения плодородия почвы [8, 9].

Для улучшения энергоэкологоэкономических показателей теплогенерирующих установок ЗАО «Лесозавод 25» была проведена модернизация трех котлоагрегатов КЕ-10-14МТ, в ходе которой изменены конструкция предтопка и аэродинамическая структура топливно-газовых потоков с организацией многотурбулентной схемы в нижней части топки. Комплексные испытания котлов показали, что их модернизация позволила поднять КПД брутто на $6 \dots 8$ %, снизить эмиссию СО в 1,5–3 раза и увеличить паропроизводительность. Так, максимальная производительность

ность котла ст. № 3 увеличена на 30 % по сравнению с номинальной (до $1,3 D_{\text{ном}}$) при сжигании древесных отходов непроектного состава (опилок и его смесь с корой до 25 %) даже при наличии повышенных присосов холодного воздуха в топку ($\Delta\alpha_{\text{т}} = 0,27 \dots 0,90$) и пониженной плотности кубов воздухоподогревателя ($\Delta\alpha_{\text{вп}} = 0,40 \dots 0,70$). При изменении нагрузки котла в диапазоне ($0,3 \dots 1,3$) $D_{\text{ном}}$ и давления насыщенного пара $P_{\text{н.п}}^{\text{абс}}$ от 1,0 до 1,4 МПа полный расход древесных отходов ($W_i^r = 53,3 \dots 54,4$ %; $A^r = 0,29 \dots 0,64$ %; $Q_i^r = 6,7 \dots 7,1$ МДж/кг) составил 2,01 ... 5,52 т/ч, удельный расход условного топлива – 42,4 ... 44,15 кг у.т./ГДж, КПД brutto 76,0 ... 79,7 %.

Учитывая, что данный котлоагрегат имел повышенные потери теплоты как от наружного охлаждения ($q_5 = 1,6 \dots 4,7$ %), вызванные отсутствием тепловой изоляции на многих элементах газового и воздушного трактов, так и с уходящими газами ($q_2 = 16,1 \dots 16,9$ %), восстановление тепловой изоляции, обмуровки котла и плотности воздухоподогревателя в соответствии с требованиями [12, 13] и установка улиточного золоуловителя с выносным циклоном ЦН-24 для возврата уловленных коксовых частиц ($C^r = 89 \dots 96$ %) в топочную камеру, а также четырех сопел третичного воздуха, выполненных с наклоном вниз и сфокусированных тангенциально к условной окружности в центре топки, позволили поднять КПД brutto до 84,5 ... 85,0 %, обеспечили дальнейшее снижение эмиссии СО (на 70 ... 85 %) и выбросов твердых частиц в окружающую среду (до 142 мг/нм³). Комплекс аналогичных мероприятий был выполнен и на котлах № 1, 2, но, в отличие от котлоагрегата ст. № 3, очищенные продукты сгорания возвращались в газовый тракт до воздухоподогревателя.

Обобщая полученные результаты, необходимо отметить, что модернизация котлов с предтопками скоростного горения позволила:

1) поднять КПД brutto на 9 ... 11 % при сжигании древесных отходов непроектного состава с крайне неоднородными гранулометрическими и теплотехническими характеристиками ($W_i^r \leq 60$ %); увеличить паропроизводительность котлов до $1,3 D_{\text{ном}}$ и выше, а также их кампанию по условиям расшлаковки; сжигать смесь древесных отходов и твердых бытовых отходов с пониженными эмиссиями вредных веществ;

2) снизить эмиссию оксида углерода в 2,5–3,7 раза; обеспечить стабильный уровень эмиссии оксидов азота (≤ 80 мг/МДж) даже при повышении производительности котлов до $1,3 D_{\text{ном}}$ за счет эффекта ступенчатого сжигания топлива и дополнительного разложения NO_x на поверхности коксовых частиц, циркулирующих в вихревых потоках;

3) обеспечить степень очистки продуктов сгорания до 77 ... 82 % в котлоагрегатах с улиточными золоуловителями повышенной компактности при режимных параметрах приемлемых для котла (очищенные продукты сгорания следует возвращать в газоход до воздухоподогревателя; модернизация сепарационного элемента улитки-концентратора [11] создает возможность повышения степени очистки газов до 82,0 ... 84,0 % и обеспечения концентрации твердых частиц в удаляемых газах до 120 мг/нм³).

Применение ГОУ с коаксиальными циклонами позволяет достичь степени очистки продуктов сгорания до 79,6 ... 86,6 % и концентрацию твердых частиц в удаляемых газах менее 60 мг/нм³, а также осуществить перевод котлов, сжигающих древесные отходы, в энерготехнологический режим, обеспечивающий получение углеродного сорбента ($2,5 > d_{\text{ч}} \geq 0,4$ мм), близкого по свойствам к активированным углям промышленного производства. Его можно использовать для очистки сточных

вод и уходящих газов промышленных предприятий, а мелкую фракцию – для повышения плодородия почвы.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований показали, что для дальнейшего повышения эффективности работы котлов серии КЕ с предтопками скоростного горения необходимо также реконструировать панель схода топлива, демонтировав чугунные накладные колосники и выполнив приварку между труб стальных проставок [10]. Разработанные технические решения необходимо использовать и при модернизации котлов ДКВр, дополнительно заменив кирпичный сход топлива «плавниковой» панелью, включенной в циркуляционный контур котлоагрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головкин, С.И. Энергетическое использование древесных отходов [Текст] / С.И. Головкин, И.Ф. Коперин, В.И. Найденков. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 224 с.
2. Любов, В.К. Анализ методов энергетического использования отходов переработки древесной биомассы [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Вологда, 2000. – С. 225–227.
3. Любов, В.К. Анализ схем сжигания отходов переработки древесной биомассы [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков, Р.А. Ефимов // Тр. Третьей рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 1. Пленарные и общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 228–231.
4. Любов, В.К. Исследование теплотехнических характеристик древесных отходов и торфа [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр./ СПб ГТУ РП. – СПб, 2001. – С. 240–248.
5. Любов, В.К. Повышение эффективности работы котлов, сжигающих древесные отходы [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Тр. Второй рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при хим. превращениях. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 229–232.
6. Любов, В.К. Программно-методический комплекс для обработки результатов испытаний теплоэнергетического оборудования и расчета вредных выбросов [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Тр. Второй рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при хим. превращениях. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 225–228.
7. Любов, В.К. Резервы энергосбережения в малой энергетике [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр./ СПб ГТУ РП. – СПб, 2002. – С. 138–147.
8. Любов, В.К. Уменьшение выбросов вредных веществ путем повышения экологических показателей работы котлоагрегатов и увеличения доли биотоплива в топливном балансе региона [Текст] / В.К. Любов // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: матер. междунар. конф. Т. 1. – Архангельск: Ин-т экол. проблем Севера УрО РАН, 2002. – С. 200–204.
9. Любов, В.К. Уменьшение загрязнения окружающей среды путем повышения эффективности работы котлоагрегатов и увеличения доли биотоплива в топливном балансе региона [Текст] / В.К. Любов, О.А. Любова // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 2. – С. 120–122.
10. Пат. 2220371 РФ. Топочное устройство для сжигания древесных отходов [Текст] / В.К. Любов. (РФ). – № 2002101162; заявл. 08.01.2002; Бюл. № 36.
11. Пат. 2309786 РФ. Пылеулавливающее устройство [Текст] / В.К. Любов. (РФ). – № 2005138190; заявл. 08.12.2005; Бюл. № 31.
12. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей [Текст]. – 15-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 288 с.

13. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов [Текст]. – М.: ПИО ОБТ, 1996. – 215 с.

14. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 217 с.

15. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 07.02.05

V.K. Lyubov

Increasing of Operating Efficiency of Boiler Plants

The main way of increasing the operation efficiency of boiler plants are investigated, the ways of increasing both economic and ecological parameters are offered.