

УДК 621.182.94

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 энергохозяйства промышленных предприятий.



УМЕНЬШЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрены основные проблемы, снижающие эффективность работы газоочистных установок; приведены рекомендации по повышению степени очистки дымовых газов различными золоулавливающими установками.

Ключевые слова: газоочистная установка, золоуловитель, лесопромышленный комплекс, древесные отходы, котлоагрегат, эмиссия оксидов азота, коэффициент полезного действия, степень очистки дымовых газов, вредные вещества, концентрация, топливо.

В настоящее время с предприятиями энергетики связаны наибольшие выбросы вредных веществ в атмосферу, что приводит к возникновению экологических проблем локального, континентального и глобального масштабов. В соответствии с законами об охране окружающей среды многие страны значительно снизили выбросы вредных веществ в атмосферу. Однако валовые выбросы в атмосферу оксидов серы (SO_2) и азота (NO_x), твердых частиц достаточно велики [1, 8, 13]. Разработка методов снижения выбросов данных веществ является актуальнейшей задачей.

В суммарное загрязнение атмосферного воздуха Архангельской области основной вклад вносят предприятия лесопромышленного комплекса (ЛПК) – более 37 % и электроэнергетики – более 32 %. Структура выбросов: SO_2 – 40,6 %, твердые частицы – 25,7 %, CO – 17,0 %, NO_x – 9,4 % [2].

Малая энергетика потребляет свыше 1/4 топлива и в ее обслуживании занято больше людей, чем в станционной, поэтому здесь заложен мощный резерв экономии топлива, трудовых резервов и охраны окружающей среды. Проведение энергоаудита и режимно-наладочных работ позволяет выявить основные недостатки в работе котлов и в ряде случаев обеспечивает повышение КПД на 10 ... 20 % [6–8].

Анализ валовых выбросов вредных веществ объектами малой энергетики области показал, что на долю твердых частиц приходится 42,5 %, далее следуют SO_2 (34,6 %) и CO (21,6 %). Это объясняется низкой степенью очистки (5 ... 83 %) продуктов сгорания в применяемых золоуловителях, а также отсутствием газоочистных установок (ГОУ) на многих котлах, работающих на каменном угле и биотопливе. Поскольку показатели работы большинства действующих ГОУ не отвечают современному уровню разви-

тия техники и требованиям закона РФ об охране атмосферного воздуха важной задачей развития ЛПК и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является поэтапная модернизация и во многих случаях замена устаревшего оборудования на современное. Внедрение высокоэффективных золоуловителей, особенно, на котлах, сжигающих биотопливо, – важный шаг в реализации концепции экологически чистой теплоэлектростанции ТЭС (котельной) [8, 13].

В настоящее время большинство пылеугольных энергоблоков оснащены электрофильтрами, широкое применение которых обусловлено их универсальностью, высокой степенью очистки газов (98 ... 99 %) при сравнительно низких энергозатратах, а также способностью обеспечить очистку больших объемов газов с концентрацией частиц до 50 г/м^3 и выше. К сожалению, на объектах Архангельской области электрофильтры нашли ограниченное применение и используются только для очистки дымовых газов содорегенерационных котлов.

Анализ факторов, влияющих на эффективность очистки газов в электрофильтрах, приведен в [1, 5, 12]. Результаты испытаний котлоагрегатов ПК-10 ТЭЦ «Явожно-2» и ОР-215 ТЭЦ «А3 «Пулавы» показали, что модернизация котлов на низкоэмиссионную вихревую технологию (ВИР-технология) сжигания позволила снизить выбросы оксидов азота и серы, повысить КПД брутто котлоагрегатов на 1 ... 2 %, электрофильтров – на 0,7 ... 1,5 % [5]. Эффект повышения степени очистки газов в электрофильтрах без их модернизации связан с увеличением удельной площади поверхности летучей золы за счет меньшей степени оплавленности частиц золы, большей полифракционности и тонкости ее гранулометрического состава. Это объясняется особенностями аэродинамики топочной камеры с ВИР-технологией, обеспечивающей снижение максимальных температур в топке на 150 ... 200 °С. Повышение адсорбционной способности частиц золы за счет увеличения удельной площади ее поверхности позволило воспринимать больший электрический заряд, кроме того, снижение температуры уходящих газов усилило адсорбцию поверхностью частиц компонент с низким удельным сопротивлением (пары H_2O и SO_x) и обеспечило уменьшение удельного электрического сопротивления золы. Данные факторы увеличили скорость дрейфа частиц к осадительным электродам и степень очистки продуктов сгорания [5]. Снижение температуры уходящих газов и организация эффективного сгорания топлива при сверхмалых избытках воздуха позволили снизить скорость газов в активной зоне электрофильтров, что также оказало влияние на повышение их КПД [5, 12].

Перевод котлов на ВИР-технология сжигания позволил также повысить долю улавливания мелких фракций золы. Так, содержание частиц диаметром $d_{\text{ч}} < 50 \text{ мкм}$ в золе, отобранной из-под электрофильтров модернизированного котла, увеличилось на 18,6 % [5]. Наиболее вредными для органов дыхания человека являются мелкие фракции ($d_{\text{ч}} \leq 10 \text{ мкм}$). В них преимущественно отмечены радионуклиды и повышенное содержание свинца,

поэтому низкотемпературная вихревая (НТВ-) и ВИР-технологии сжигания позволяют уменьшить вредное воздействие летучей золы на окружающую среду.

Результаты анализов летучей золы котлов с НТВ-технологией на содержание бенз(а)пирена показали, что оно ниже, чем у золы котлоагрегатов с прямоточным пылеугольным факелом, а также намного ниже, чем ПДК для почвы и фоновые концентрации в почве [13]. Исследование удельной активности образцов летучей золы котлов с НТВ-технологией сжигания дробленых углей, показало, что содержание естественных радионуклидов близко к среднему в земной коре, в 4–5 раз ниже существующих нормативов для строительных материалов и в 20–25 раз ниже допустимых для минеральных удобрений [13]. Полученные результаты позволили рекомендовать золу НТВ-котлов, работающих на дробленых углях, к использованию в сельском хозяйстве, а также в дорожном, промышленном и гражданском строительстве [13].

Рукавные фильтры позволяют обеспечить более устойчивую и эффективную очистку газов (до 99,9 %) по сравнению с электрофильтрами при одинаковых параметрах улавливаемой твердой фазы, однако они дороже и занимают, как правило, больше места. Основной причиной, сдерживающей их распространение, является также высокое гидравлическое сопротивление (до 1,5 кПа) и невысокая температуростойкость тканей фильтров [1, 12]. Рукавные фильтры были установлены в ОАО «Савинский цементный завод», однако в результате пожара они были выведены из строя, поэтому отсутствует возможность оценки эффективности их работы на предприятиях нашего региона. Опыт внедрения рукавных фильтров за рубежом показал, что они позволяют снизить концентрацию частиц золы в уходящих газах котельных установок до 35 ... 50 мг/м³, что соответствует показателям экологически безопасных ТЭС [1].

Большой комплекс работ по снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду был выполнен в ОАО СЦБК. Наиболее крупным, из реализованных проектов, является перевод с модернизацией мазутного котлоагрегата КМ-75-40 ст. № 5 на сжигание кородревесных отходов в предтопке с «кипящим слоем» конструкции ООО «ИНЭКО». Для мокрой очистки продуктов сгорания от твердых частиц в газовом тракте перед дымососом были установлены два кассетных эмульгатора (проектная степень очистки газов 99 %). Опыт эксплуатации модернизированного котлоагрегата КМ-75-40 ст. № 5, оснащенного предтопком с кипящим слоем, показал, что котел стабильно работает при паропроизводительности до 65 т/ч, при повышении нагрузки появляется каплеунос из эмульгаторов. Данное явление вызывает налипание частиц золы на лопатки рабочего колеса дымососа. Нарастание вибрации снижает экономичность работы, вызывает незапланированные остановки котлоагрегата на чистку, сверхплановый перерасход мазута и дополнительные затраты на ремонт. Степень очистки дымовых газов, достигнутая в эмульгаторах, составила 93 ... 96 %.

Для устранения явления каплеуноса из эмульгаторов при нагрузках котлоагрегата более 65 т/ч и улучшения условий работы газового тракта и дымососа ООО «ИНЭКО» был разработан проект модернизации ГОУ, в котором был предусмотрен монтаж дополнительного двухкорпусного батарейного циклона (БЦУ 200/176) с разделительной перегородкой. Циклон был смонтирован в газовом тракте котлоагрегата параллельно с существующими эмульгаторами. Анализ результатов, полученных в ходе испытаний реконструированной золоулавливающей установки котлоагрегата ст. № 5, позволил сделать следующие выводы.

1. Комбинированная ГОУ, состоящая из эмульгаторов и параллельно включенной батарейной циклонной установки, повысила КПД нетто котла за счет уменьшения доли горячего воздуха, направляемого в газовый тракт за ГОУ, и увеличения температуры горячего воздуха, подаваемого для организации топочного процесса; повысила надежность работы дымососа за счет снижения вероятности налипания золых частиц на его рабочие органы; снизила температуру сернокислотной точки росы и уменьшила последствия низкотемпературной сернокислотной коррозии.

2. Установка циклона облегчила условия работы эмульгаторов и обеспечила повышение степени очистки газов в них. Суммарная степень очистки продуктов сгорания в комбинированной ГОУ составила 89 ... 92 %, что в значительной степени определяется эффективностью работы эмульгаторов, которые в настоящее время имеют КПД ниже проектного. Следует предполагать, что пуск в эксплуатацию системы короподготовки повысит полноту выгорания горючих компонентов топлива и позволит обеспечить дальнейший рост эффективности работы котла и его ГОУ.

3. В батарейную циклонную установку с потоком дымовых газов поступают преимущественно мелкие твердые фракции ($d_{\text{ч}} < 250$ мкм), имеющие повышенное содержание горючих веществ и низкую кажущуюся плотность, что в комплексе с небольшой начальной концентрацией твердых частиц усложняет условия работы БЦУ 200/176 и снижает степень очистки газов в ней до 50 ... 53 %. Включение в работу батарейной циклонной установки необходимо производить только при повышенных нагрузках котлоагрегата, при этом следует ограничивать степень открытия клапанов на газоходах к БЦУ до указателя положения $У_{\text{лев/прав}} = 60/60$ %. При регулировании степени открытия данных клапанов к числу определяющих параметров следует относить сопротивление корпусов БЦУ и температуру газов перед дымососом.

4. Для обеспечения нормальных условий эксплуатации ГОУ необходим периодический контроль за уплотнением ее элементов, установка штатных систем контроля за сопротивлением корпусов БЦУ, оптимизация распределения газа по циклонным элементам.

Другим крупным проектом, реализованным в ОАО СЦБК, является модернизация ГОУ угольного котлоагрегата ЦКТИ-40-34 ст. № 2 для повышения его энергоэкологоэкономических показателей. В ходе модернизации был установлен батарейный золоуловитель БЦ-512-(12 × 6), разработанный

ОАО НПО ЦКТИ. Смонтированная ГОУ оборудована 72 циклонными элементами, каждый из которых оснащен 4 тангенциально расположенными входными устройствами, обеспечивающими закрутку запыленного потока дымовых газов. Циклонные элементы скомпонованы в четыре секции (по 18 элементов в каждой), каждая секция оборудована индивидуальным бункером для сбора и вывода уловленной золы. Продукты сгорания после конвективной шахты котла по двум газоходам подводятся к золоуловителю, после которого поступают к дымососу двухстороннего всасывания и далее, по газоходу, направляются в дымовую трубу.

Испытания золоулавливающей установки при работе котлоагрегата ст. № 2 на длиннопламенных углях Хакассии показали, что установленный батарейный золоуловитель имеет «аэродинамическую плотность», соответствующую требованию норм [10] и обеспечивает степень очистки продуктов сгорания в диапазоне 89,3 ... 92,5 %. Повышение полноты выгорания горючих компонентов в летучей золе до $C_{\text{ун}}^f \leq 6,5$ % позволит повысить степень очистки газов до 93 ... 94 %. Для обеспечения нормальных условий эксплуатации ГОУ необходимы периодический контроль за уплотнением ее элементов и приведение в рабочее состояние системы КИПиА котла.

Объекты малой энергетики Архангельской области в основном оборудованы котлами со слоевыми топками для сжигания каменных углей, а также топками скоростного горения и с наклонными колосниковыми решетками для сжигания древесных отходов. Кроме того, широко используются котлы малой мощности, работающие на мазуте [6–8].

Топки с наклонной колосниковой решеткой установлены на многих предприятиях ЛПК и позволяют сжигать топливную смесь, состоящую из опилок, щепы и стружки. Для повышения энергоэкологоэкономических показателей работы котлоагрегаты с данными топками часто оборудуют дымососами – золоуловителями [6, 12]. Исследования показывают, что удлинение вала дымососа для установки улитки-концентратора и дополнительной крыльчатки приводит к увеличению параметров вибрации и уменьшению его межремонтной компании. Кроме этого, применение золоуловителей данного типа вызывает необходимость перехода на менее эффективный метод регулирования производительности дымососа, так как взамен осевого направляющего аппарата устанавливается язычковая заслонка на входе газов в улитку-концентратор. Работа данных золоуловителей характеризуется также повышенным абразивным износом выносного циклона и газохода, подводящего газовый поток с высокой концентрацией твердой фазы к циклону, при номинальной и близких к ней нагрузках котлоагрегата.

На многих котлах малой энергетики и утилизационно-энергетических котлоагрегатах предприятий лесопромышленного комплекса золоулавливающие установки отсутствуют. Выброс частиц золы с дымовыми газами неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей среды и здоровье людей, наносит вред готовой продукции предприятий, складываемой на открытом воздухе, и может явиться причиной пожара. Для устранения данных негативных явлений и с учетом тесной компоновки основного

и вспомогательного оборудования котельной была разработана объединенная (на три котла) ГОУ, расположенная 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, а также оснащена жалюзийным сепаратором для исключения вторичного уноса из сборного бункера [9]. Испытания ГОУ на двух котлах КЕ-10-14, сжигающих древесные отходы, показали, что ее КПД составляет 79,6 ... 86,6 % при расходе дымовых газов 10,6 ... 11,8 $\text{нм}^3/\text{с}$ (проектный $\geq 13,9 \text{ нм}^3/\text{с}$), сопротивление – 0,60 ... 0,72 кПа.

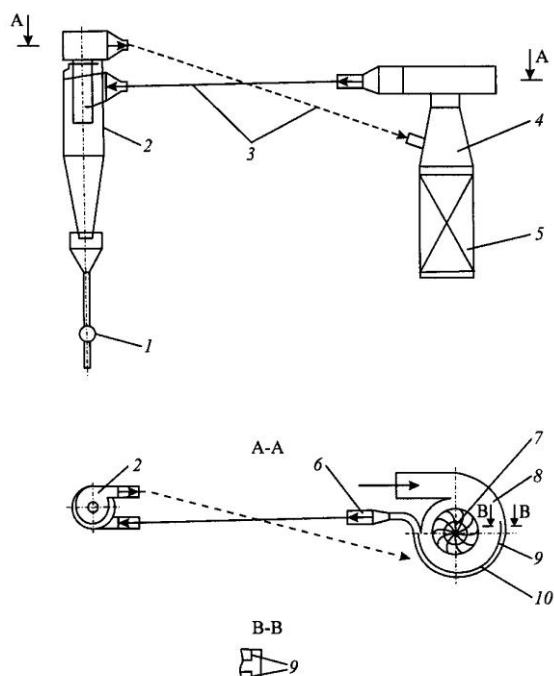
Как видно из результатов исследования, материал, уловленный в ГОУ, является полифракционным ($n = 1,67$) и крупнодисперсным ($b = 0,2 \times 10^{-4}$), при этом два первых по ходу газов циклона улавливают преимущественно крупную фракцию с $d_{\text{ч}} \geq 0,4$ мм, доля которой около 52 %. Содержание горючих веществ в данной фракции составляет 85 ... 92 %. Реконструкция бункера золы с организацией раздельного сбора и вывода крупной, уловленной в двух первых циклонах ГОУ, и мелкой фракций позволит получать углеродный сорбент с насыпной плотностью 100...170 $\text{кг}/\text{м}^3$ и удельной поверхностью 350 ... 500 $\text{м}^2/\text{г}$. Производительность установки по углеродному сорбенту составит 80 $\text{кг}/\text{сут}$ (при работе двух котлов на средних нагрузках), максимальная – до 260 $\text{кг}/\text{сут}$. Данный сорбент имеет более низкие качественные показатели, чем активированные угли промышленного производства, но значительно дешевле. Мелкую фракцию ($d_{\text{ч}} < 0,4$ мм) повышенной зольности следует использовать в сельском хозяйстве, т. к. она богата элементами, необходимыми для повышения плодородия почвы [8].

Данное направление по переводу котлов, сжигающих древесные отходы, в энерготехнологический режим работы является перспективным, так как он, наряду с уменьшением выбросов твердых частиц в атмосферу, позволяет получать углеродный сорбент для очистки сточных вод и уходящих газов, а также мелкофракционную золу для повышения плодородия почвы.

При проведении промышленных испытаний данной золоулавливающей установки и других ГОУ запыленность дымовых газов определяли при изокINETических условиях с использованием метода внутренней фильтрации газов через аллонжи и фильтровальные патроны с объемной набивкой из стекловолокна, для регулирования расхода отбираемого газа использовали ПУ-4Э [11]. Расчет концентрации твердой фазы в дымовых газах проводили в соответствии с [11, 12]. При исследовании гранулометрического состава твердой фазы использовали ситовой метод [2, 3], реализуемый с помощью анализаторов «029» и воздушно-струйного ВС 1С-15-01. Обработку полученных результатов выполняли по методике [4].

На утилизационно-энергетических котлах с предтопками скоростного горения для очистки продуктов сгорания часто устанавливают золоуловители различных модификаций. Результаты испытаний показали, что многие из них находятся в неудовлетворительном состоянии, поэтому степень очистки дымовых газов на обследованных объектах при сжигании

Улиточный золоуловитель:
 1 – клапан-мигалка, 2 – выносной циклон, 3 – связующие газоходы, 4 – выхлопной патрубок, 5 – воздухоподогреватель, 6 – пылеотводящий патрубок, 7 – радиальный направляющий аппарат, 8 – улитка-концентратор, 9 – спиральный козырек



древесных отходов, в которых доминировали опилки ($W_t = 47 \dots 49 \%$), составляла $5 \dots 42 \%$. ОАО НПО ЦКТИ и фирма «Лесэнерго» разработали усовершенствованную модель улиточного золоуловителя (см. рисунок). На котлах КЕ-10-14МТ (ЗАО «Лесозавод 25») фирма «Лесэнерго» смонтировала золоуловители с выносными циклонами ЦН-24, которые имеют небольшую металлоемкость, габариты и умеренное аэродинамическое сопротивление.

Комплексными исследованиями установлено, что смонтированные золоуловители имеют КПД = $77,5 \dots 81,0 \%$ (при приемлемых режимных параметрах). Это позволяет снизить выбросы твердых частиц в окружающую среду до 142 мг/нм^3 . Данные золоуловители обеспечивают возврат уноса ($C^r = 89 \dots 96 \%$) на дожигание в топочную камеру, стабилизируя уровень эмиссии NO_x до значений $\leq 80 \text{ мг/МДж}$ за счет эффекта ступенчатого сжигания и дополнительного разложения NO_x на поверхности коксовых частиц, циркулирующих в вихревых потоках, даже при повышении производительности котлов на 30% выше номинальной [4].

Исследования показали, что очищенные продукты сгорания из ЦН-24 должны возвращаться в газоход до воздухоподогревателя (экономайзера). Учитывая, что степень очистки газов в выносном циклоне больше, чем в улитке-концентраторе, необходимо конструктивными методами обеспечить повышение ее сепарационной способности. Это даст возможность повысить КПД золоуловителя до $82 \dots 84 \%$ и обеспечит концентрацию твердой фазы в удаляемых газах до 120 мг/нм^3 . Выполненный комплекс работ позволил повысить технико-экономические и экологические показатели

работы котлов малой и стационарной энергетики даже при сжигании непроектных видов топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов, А.И.* Повышение экологической безопасности тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов [Текст] / А.И. Абрамов [и др.]; под ред. А.С. Седлова. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 378 с.
2. *Любов, В.К.* Испытания твердых топлив: метод. указания [Текст] / В.К. Любов, Ю.К. Опякин. – Архангельск: РИО АЛТИ, 1988. – 24 с.
3. *Любов, В.К.* Определение гранулометрического состава производственной пыли методом ситового воздушно-струйного сортирования: метод. указания [Текст] / В.К. Любов. – Архангельск: РИО АГТУ, 1996. – 13 с.
4. *Любов, В.К.* Программно-методический комплекс для обработки результатов испытаний теплоэнергетического оборудования и расчета вредных выбросов [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Тр. 2-й Рос. нац. конф. по теплообмену. В 8 т. Т. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при хим. превращениях. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 225–228.
5. *Любов, В.К.* Влияние схемы организации топочного процесса на степень очистки газов в электрофильтрах [Текст] / В.К. Любов [и др.] // Повышение эффективности энергетических систем и оборудования: сб. науч. тр. АГТУ. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – С. 100–105.
6. *Любов, В.К.* Резервы энергосбережения в малой энергетике [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвузов. сб. науч. тр./ СПб ГТУ РП. – СПб., 2002. – С. 138–147.
7. *Любов, В.К.* Анализ схем сжигания отходов переработки древесной биомассы [Текст] / В.К. Любов, В.А. Дьячков, Р.А. Ефимов // Тр. 3-ей Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 1. Пленарные и общие проблемные доклады. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 228–231.
8. *Любов, В.К.* Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлив и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива [Текст]: дисс. ... докт. техн. наук: 05.14.04 / В.К. Любов. – Архангельск, 2004. – 204 с.
9. *Любов, В.К.* Совершенствование энергохозяйств предприятий лесопромышленного комплекса [Текст] / В.К. Любов // Лесн. журн. – 2006. – № 4. – С. 135–142. – (Изв. высших учеб. заведений).
10. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов [Текст]. – М.: ПИО ОБТ, 1996.
11. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах [Текст]. – Л.: Гидрометеониздат, 1987.
12. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст]. Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
13. *Шестаков, С.М.* Низкотемпературная вихревая технология сжигания дробленого топлива в котлах как метод защиты окружающей среды [Текст]: дисс. ... докт. техн. наук: 05.14.16 / С.М. Шестаков. – СПб., 1999. – 39 с.

Архангельский государственный
технический университет

V.K. Lyubov

Reducing Environmental Pollution

The main problems reducing the operation efficiency of gas-cleaning installations are analyzed; recommendations on increasing degree of treatment efficiency for smoke fumes by various ash-collecting devices are provided.