

УДК 621.18

**Л. А. Боднар, к. т. н.; С.И. Ткаченко, д. т. н., проф.; О. В. Дахновская****ПРОБЛЕМЫ СЖИГАНИЯ НИЗКОСОРТНОГО ТОПЛИВА В КОТЛАХ  
МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

*В статье проанализированы основные проблемы сжигания низкосортных видов топлива в котлах малой мощности и методы их решения с целью повышения энергоэкологической эффективности.*

**Ключевые слова:** низкосортные топлива, конденсация смол, котлы малой мощности, проблемы сжигания.

**Введение**

Среди различных источников энергии, используемых на сегодняшний день, органическому топливу отводится главная роль (более чем 94 % в масштабах всего мира). В последние десятилетия из-за устойчивого роста цен на топливо высокого качества значительно возрастает интерес к котельным агрегатам, обеспечивающим эффективное сжигание дешевых видов топлива.

Существует много разновидностей низкосортных энергетических топлив. К низкосортным видам топлива относят высокозольный или высоковлажный уголь, соленый уголь, горючие сланцы, торф, горючую часть городских отходов, отходы промышленности (деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности), сельскохозяйственные отходы (солома, шелуха, стебли подсолнечника и т. д.), шламы и промежуточные продукты обогащения каменного угля, предназначенные для технологического потребления. Общим признаком низкосортных энергетических топлив является низкая теплота сгорания, которая обычно не превышает  $Q_n^P = 10 \dots 20$  МДж/кг [1]. Такая низкая теплота сгорания топлива этой категории определяется главным образом высоким содержанием в них балласта: золы и влаги.

Если в большой энергетике разработано достаточно много эффективных методов сжигания низкосортных топлив в промышленных котлах (низкотемпературный и высокотемпературный кипящий слой, низкотемпературная выхревая технология, газогенерация с дальнейшим сжиганием искусственного газа), то при сжигании таких видов топлива в котлах малой мощности возникает ряд технических и экологических проблем.

**Целью** данной работы является анализ проблем сжигания низкосортных видов топлива в котлах малой мощности и методов их решения для повышения энергоэкологической эффективности.

**Экологические проблемы**

Все процессы, связанные с сжиганием органических видов топлива в котельных установках разной мощности, являются источниками загрязняющих веществ. Их антропогенное воздействие на окружающую среду может проявляться на разных уровнях: локальном, региональном и глобальном.

Для котлов на твердом топливе нормируют только выбросы СО [2]. Так, при сжигании антрацита допустимое содержание СО составляет  $10000 \text{ мг/м}^3$ , при сжигании каменного и бурого угля с выходом летучих соединений от 17 % до 50 % соответственно –  $46000 \text{ мг/м}^3$ . Для котлов, работающих на древесине, отечественные стандарты отсутствуют. Согласно [3], в европейских странах для котлов, работающих на древесине мощностью менее 50 кВт гранично допустимое значение выбросов СО составляет  $5 \text{ г/м}^3$ , органических газообразных веществ –  $0,15 \text{ г/м}^3$ , твердых частиц  $0,2 \text{ г/м}^3$ .

В ГОСТ [4] также нормируют выбросы вредных веществ для дерева, торфа, каменного и бурого угля. Так, для котлов с ручной топкой мощностью от 100 до 300 кВт, в случае сжигания древесины и торфа, выбросы СО находятся в пределах от 5000 до 24000 мг/м<sup>3</sup>. Документов, ограничивающих выбросы загрязняющих веществ для газогенераторных котлов, авторами не найдено.

В [4] отмечается, что содержание твердых частиц в дымовых газах от котлов, работающих на твердом топливе, должно быть указано в эксплуатационных нормативных документах для конкретных котлов.

В источнике [5] приведены данные по работе постоянно действующих котлов малой мощности для твердых видов топлива и показано, что выбросы от них значительно превышают нормы.

При сжигании низкосортных топлив образуется минеральный остаток – зола. Хотя зольность биотоплив довольно низкая (таблица 1), плавильные характеристики золы напрямую воздействуют на работу котла. Плавление золы может привести к шлакованию топки и появлению плотных отложений на конвективных поверхностях нагрева. Летучая зола загрязняет воздушный бассейн.

Таблица 1

**Характеристики низкосортных топлив**

Низкосортное топливо	Теплота сжигания топлива, МДж/кг	Влажность топлива, %	Зольность топлива, %
Торф кусковой	10,07	40	6,6
Торф фрезерный	8,5	50	5,5
Камыш	15,5	16	2,0
Солома	13,12	8	5,0
Шелуха подсолнечника	15,5	15	2,0
Стружка и опилки	16,9	25	1,0
Отходы древесины	15,12	40	0,9

Из-за высокой стоимости данного оборудования, на котлах малой мощности не устанавливают золоулавливающих устройств.

#### **Конденсация смол в газоходах котла**

С одной стороны, в низкосортных биотопливах мало серы, поэтому можно обеспечить невысокую температуру дымовых газов на выходе из котла (рис. 1), с другой – даже известные зарубежные производители котлов рекомендуют температуру дымовых газов на выходе не менее 200 °С [6]. Это связано с тем, что при газификации и сжигании низкосортных топлив в котлах, на теплообменных поверхностях и дымовых трубах откладываются смолистые отложения – сложные смеси органических соединений.

В работе [7] приведены результаты исследований процессов газификации твердого топлива и способы очистки искусственных газов от смолы. Для удаления смолы предлагается применять ступенчатую схему охлаждения газа, которая обеспечивает успешное разделение смолы и воды. В первой ступени конденсации при температуре 130 – 150 °С конденсируется в основном тяжелая смола, а в другой ступени, где газ охлаждается до 25 – 40 °С, – легкая смола. Очистка сточных вод осуществляется отстаиванием от смолы и фильтрацией через кварцевые фильтры. Недостатком данной схемы является образование устойчивых смоловодящих эмульсий в подсмольной воде. Данную схему можно применить в промышленном производстве генераторного газа. В котлах малой мощности на органических видах топлива можно только применять методы предотвращения отложения смол, поскольку это является более эффективным способом, чем очистка загрязненных поверхностей.

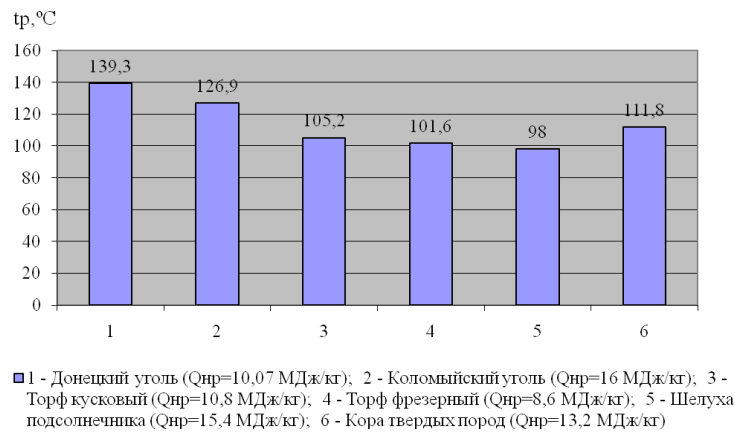


Рис. 1. Зависимость температуры точки росы от вида низкосортного топлива

Голландская компания ECN [8] активно занимается изучением свойств смол, особенностей их конденсации и очистки газообразных продуктов сгорания от них. Исследователи ECN классифицировали смолы на пять классов (таблица 2).

Таблица 2

#### Классификация смол

Класс	Свойства класса
Класс 1	Тяжелые смолы, которые конденсируются при высоких температурах даже при очень низких концентрациях
Класс 2	Гетероциклические компоненты (фенол, пуриден, крезол), которые обычно проявляют высокую растворимость в воде, благодаря своей полярности
Класс 3	Ароматические компоненты – легкие углеводороды
Класс 4	Легкие полициклические ароматические углеводороды
Класс 5	Тяжелые полициклические ароматические углеводороды

На рис. 2 представлена зависимость температуры точки росы смолы от ее концентрации в дымовых газах [8].

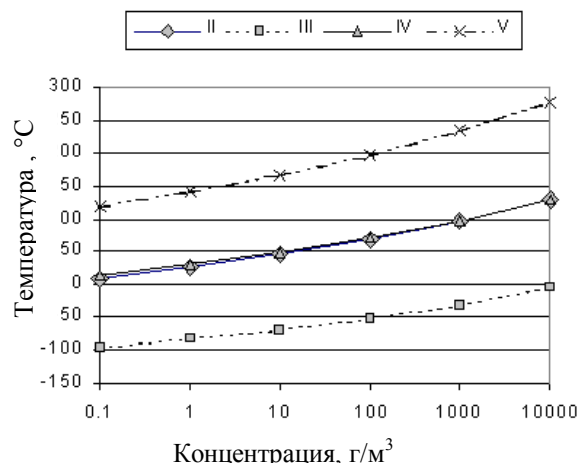


Рис. 2. Зависимость температуры точки росы смолы от ее концентрации

Так как низкотемпературные смолы содержат гораздо меньше молекул, чем высокотемпературные смолы, то температура их точки росы гораздо ниже [8].

Поскольку работа котлов на низкосортных топливах сопровождается отложениями смолистых веществ на теплообменных поверхностях и дымоходах, то при разработке котлов малой мощности обязательно необходимо учитывать возможность конденсации смол.

Авторами проведены исследования влияния интенсивности теплообмена с обеих сторон теплообменной поверхности в конвективной части котла на температуру стенки трубы теплообменника. Такая информация необходима для выбора способа охлаждения дымовых газов, при котором не происходит конденсация смол в теплообменнике. Для газотрубного водогрейного котла с начальными параметрами: мощность  $Q \leq 32$  кВт; топливо – древесина (состав топлива  $C=51\%$ ,  $H_2=6,1\%$ ,  $O_2=42,3\%$ ,  $N_2=0,6\%$ ,  $A=1\%$ ,  $W=25\%$ ); трехходовая конструкция пучка; коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,4$ ; температурный режим воды 60/80 °С; при разных значениях коэффициента теплоотдачи от стенки к воде  $\alpha_s=200\dots 900$  Вт/м<sup>2</sup>·К. При этом коэффициент теплоотдачи со стороны газов изменялся в пределах  $\alpha_g=7\dots 19$  Вт/м<sup>2</sup>·К. Температура стенки пучка со стороны газов определялась в зависимости от нагрузки котла (рис. 3).

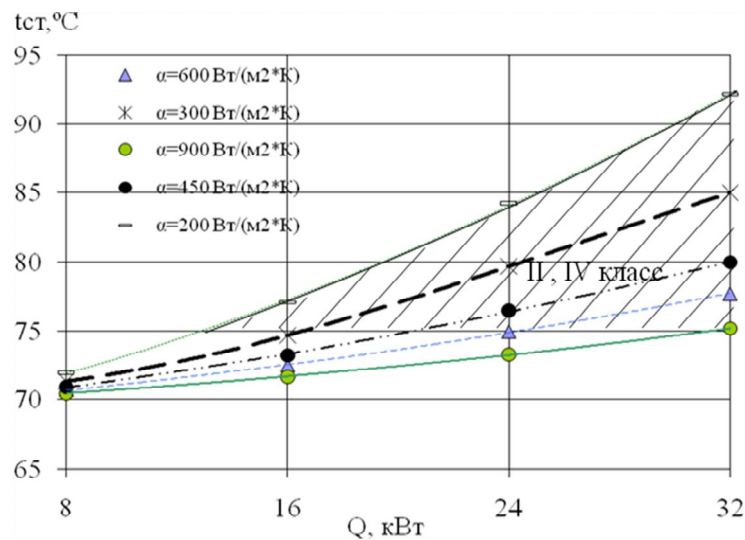


Рис. 3. Зависимость температуры стенки теплообменника котла со стороны газов от нагрузки (охлаждение водяное)

Стоит отметить, что в продуктах сгорания древесины и ее отходов, а также других низкосортных топлив [9, 10] концентрация смол может быть в пределах от 1000 до 10000 мг/м<sup>3</sup>. Это было учтено при выборе температуры конденсации смолы. При температуре стенки теплообменника котла со стороны газов 75 °С и выше будут откладываться II и IV классы смол, т. е. гетероциклические компоненты и легкие полициклические ароматические углеводороды.

Если же в конвективном пучке будет двигаться воздух с температурой на входе и на выходе соответственно 10/50 °С с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_{воз}=15\dots 90$  Вт/м<sup>2</sup>·К, то температура стенки пучка будет меняться, как показано на рис. 4.

При воздушном охлаждении при температуре стенки 100 – 140 °С будут откладываться II и IV классы смол, а при температуре – 240 °С и выше (V класс) – тяжелые полициклические ароматические углеводороды. Можно ожидать, что воздушные теплогенераторы будут более эффективно работать на низкосортных топливах (более широкий диапазон надежной работы, чем у водогрейных).

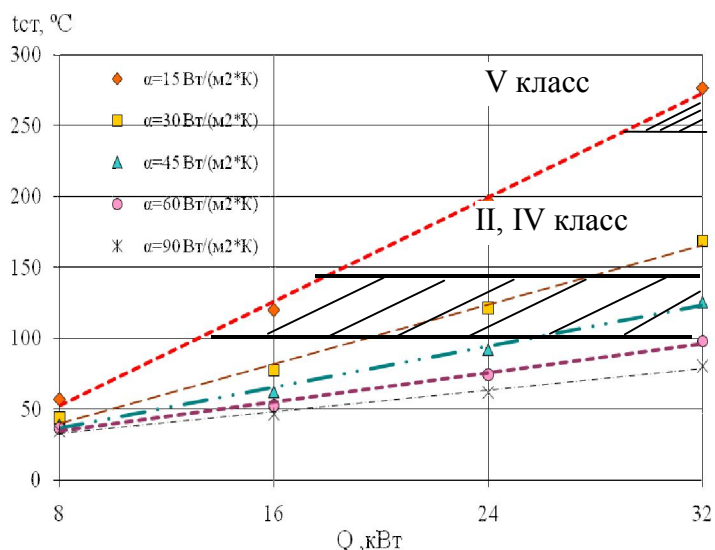


Рис. 4. Зависимость температуры стенки теплообменника котла со стороны газов от нагрузки (охлаждение воздушное)

По мнению авторов, комбинированное использование поверхностей (сначала воздушное охлаждение дымовых газов, а затем – водяное) позволит частично решить проблему отложения смол на поверхностях котла, а также предусмотреть места их отложения с целью облегченного доступа для очистки.

Для водяного охлаждения котла методы предотвращения конденсации смолы приведены в таблице 3, где авторами также систематизированы другие проблемы сжигания низкосортных топлив и методы их решения.

Таблица 3

**Проблемы сжигания низкосортных видов топлива и методы их решения**

№ п/п	Проблема	Методы решения
1	Выбросы твердых частиц (золы) [1, 3, 13]	1) Создание двухкамерных топок. 2) Установка на выходе из котла сегментных перегородок, задерживающих золу в котле *. 3) Установка золоуловителей. 4) Создание рециркуляции.
2	Отложения смол в газоходах котла [7, 11, 12]	1) Создание зон высокой температуры. 2) Соответствие мощности котла фактическому потреблению тепла. 3) Использование буферных емкостей для сглаживания неравномерности потребления и работы котла. 4) Изоляция дымоходов. 5) Соблюдение низкой влажности топлива. 6) Поддержание температуры обратной воды не менее 65 °С. 7) Установление вторичных излучателей в топке (зон высоких температур), катализаторов. 8) Оптимизация подачи воздуха порциями (первичное, вторичное, третичное) с целью качественной организации сжигания топлива. 9) Предотвращение длительной работы котла на минимальном режиме.
3	Плавление золы, зашлаковывание колосниковой решетки [3, 13]	1) Водяное охлаждение колосниковой решетки. 2) Воздушное охлаждение. 3) Использование вибрационной колосниковой решетки *. 4) Низкотемпературное сжигание *. 5) Обеспечение равномерного распределения топлива и слоя угля по всей поверхности решеток с целью равномерной подачи первичного воздуха. 6) Использование вращающейся конусной топки.

		7) Ступенчатое сжигание топлива (посредством разделения топки на первичную и вторичную камеры). 8) Использование топок с нижней подачей топлива.
4	Низкая температура в зоне горения при сжигании влажных топлив [14]	1) Подача подогретого воздуха в зону горения. 2) Исполнение внутренней поверхности топки с теплоаккумулирующих материалов (керамики, майолики).
5	Выбросы CO [11]	1) Качественное смешение топочного газа с вторичным воздухом. 2) Применение вторичных излучателей.

\* – для котлов средней мощности.

### Выводы

В связи с подорожанием цены на природный газ вызывают интерес альтернативные источники энергии – низкосортные виды топлива. В большой энергетике разработано достаточно много эффективных методов сжигания низкосортных топлив в промышленных котлах, а при сжигании таких топлив в котлах малой мощности возникает ряд технических и экологических проблем.

Авторами выделены основные проблемы сжигания низкосортных видов топлива в котлах небольшой мощности и методы их устранения. Одной из основных является откладывание смол на теплообменных поверхностях и дымоходах котла. Для определения режимов конденсации смол в котле проведено исследование влияния интенсивности теплообмена с обеих сторон теплообменной поверхности в конвективной части котла на температуру стенки трубы теплообменника. Определено, что при воздушном охлаждении дымовых газов температура стенки теплообменника составляет 100 – 275 °С в зависимости от нагрузки котла, а при водяном охлаждении – 75 – 95 °С, т. е. в последнем случае вероятность отложения смол на стенках теплообменника более высокая.

С точки зрения авторов, комбинированное использование поверхностей (сначала воздушное охлаждение дымовых газов, а затем – водяное) позволит частично решить проблему интенсивности отложения смол на поверхностях котла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мисак Й. С. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив: навч. посіб / Й. С. Мисак, Я. М. Гнатишин, Я. Ф. Івасик. – Л.: Львівська політехніка, 2002. – 135 с.
2. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Загальні технічні умови: ДСТУ 2326–93. – [Чинний від 1995-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 17 с. – (Державний стандарт України).
3. Справочник потребителя биотоплива / [под. ред. Виллу Вареса]. – Таллин: Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.
4. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт. Общие технические условия. – Минск, 2001. – 20 с.
5. Накоряков В. Е. Оценка экологической эффективности теплоисточников малой мощности / В. Е. Накоряков, С. Л. Елистратов // Промышленная энергетика. – 2009. – № 2. – С. 44 – 51.
6. Viessmann. Инструкция по проектированию [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.viessmann.ua>.
7. Альтшулер В. С. Новые процессы газификации твердого топлива / В. С. Альтшулер. – М.: Недра. – 1976. – 280 с.
8. "Thersites": website for tar dew point calculations. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.thersites.nl](http://www.thersites.nl).
9. Соловьев В. Н. Отработка элементов технологии газификации местных видов топлива и органических отходов в обращенном режиме / В. Н. Соловьев, Л. А. Бида, Г. И. Фокина и др. – Минск, 2003. – 37 с.
10. Nimbkar Agricultural Research Institute [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.nariphaltan.org](http://www.nariphaltan.org).
11. Гришкова А. В. Уменьшение выбросов оксидов азота от водогрейных котлов путем внесения в топку промежуточного излучателя с оптимальными параметрами / А. В. Гришкова, Б. М. Красовский // Промышленная энергетика. – 2004. – № 5. – С. 32 – 33.
12. Степанов Д. В. Методи запобігання конденсації смол в котлах малої потужності на нетрадиційних паливах / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар // Энергетика та електрифікація. – 2010. – № 12. – С. 48 – 51.
13. Сарана В. В. Аналіз способів та обладнання для спалювання відходів переробки сільськогосподарських

культур і деревини / В. В.Сарана // Науковий вісник національного університету біоресурсів і природокористування України. – Вип. 134. Ч. 2. – 2009. – С. 41 – 53.

14. Новожилов Ю. Н. Схема подогрева воздуха в котлах малой мощности / Ю. Н. Новожилов // Промышленная энергетика. – 2003. – № 9. – С. 27.

15. Жовмир Н. М. Анализ нормативных требований к эмиссии загрязняющих веществ при сжигании биомассы / Н. М. Жовмир // Промышленная теплотехника – 2012. – № 1.– С. 77 – 86.

16. Ахтямов Ф. Г. Универсальный котел “ЭкоТермУниверсал” на альтернативных видах топлива / Ф. Г. Ахтямов // Энергетик. – 2010. – № 12. – С. 23 – 25.

17. Звягинцев В. Л. Котлы малой энергетики – мнение специалиста / В. Л. Звягинцев // Энергосбережение. – 2009. – № 5. – С. 13 – 15.

**Боднар Лилия Анатольевна** – к. т. н., ст. преподаватель кафедры теплоэнергетики.

**Ткаченко Станислав Иосифович** – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики.

**Дахновская Ольга Викторовна** – аспирант кафедры теплоэнергетики.

Винницкий национальный технический университет.