

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЖИГАНИЯ БИОМАССЫ

В. А. Пашинский¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, pashynski@mail.ru

Представлены результаты оценки передового европейского опыта сжигания древесины и других видов биомассы. Подробно описываются технико-экономические и экологические аспекты установок, работающих на биомассе, с автоматическим управлением технологическим процессом мощностью от 0,4 до 5 МВт.

Ключевые слова: биомасса; биотопливо; сжигание; технические аспекты; экономические аспекты; экологические аспекты.

TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF BIOMASS COMBUSTION

Vasil Pashynski¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, pashynski@mail.ru

The results of evaluation of the best European experience in combustion of wood and other types of biomass are presented. The technical, economic and environmental aspects of biomass plants with automatic process control with capacities from 0.4 to 5 MW are described in detail.

Keywords: biomass; biofuel; combustion; technical aspects; economic aspects; environmental aspects.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-187-192>

Установки, предназначенные для сжигания биомассы, представляют собой сложные системы, содержащие большое число компонентов. Обеспечение рациональной и экономически эффективной эксплуатации таких установок требует выполнения на надлежащем профессиональном уровне проектных и строительно-монтажных работ, включая определение параметров мощности установок.

Проектные и строительно-монтажные работы энергоисточников на основе сжигания биомассы включают ряд этапов. Одними из важнейших этапов являются технико-экономическое и экологическое обоснование.

Основными элементами технологического процесса сжигания биомассы, являются:

- склад топлива (склад длительного хранения, склад ежедневного пользования);
- система подачи и погрузки/разгрузки топлива;
- топка для сжигания биомассы
- котлоагрегат (водогрейный котел, паровой котел, котел с тепловым маслом)
- резервный котлоагрегат или котлоагрегат для использования при пиковых нагрузках (например, котел, работающий на природном газе или мазуте);
- система утилизации тепла (экономайзер или устройство конденсации топочного газа);
- система золоудаления и предварительной обработки золы;
- система очистки дымовых газов;
- дымовая труба;

- оборудование системы управления и воспроизведения данных;
- электротехнические и гидравлические устройства;
- аккумулятор тепла;
- паровая турбина, электрогенератор;
- сеть трубопроводов системы центрального теплоснабжения.

С целью оценки целесообразности инвестиций в энергоисточник, работающий на сжигании биомассы, введены технические, экономические и экологические критерии. Соблюдение этих критериев является обязательным условием принятия решения по реализации строительства новых систем теплоснабжения и установок комбинированного производства тепловой и электрической энергии на основе сжигания биотоплива:

- коэффициент одновременности k_o , %

$$k_o = \frac{Q_{э.п.}}{Q_{\Sigma}} 100, \quad (1)$$

где $Q_{э.п.}$ – эффективная тепловая пиковая нагрузка – системы централизованного теплоснабжения, Гкал;

Q_{Σ} – суммарная номинальная мощность потребителей, Гкал.

- число часов максимума использования тепловой нагрузки в год τ_m , ч/год

$$\tau_m = \frac{W_{\Sigma}}{8760 \cdot W_n}, \quad (2)$$

где W_{Σ} – количество теплоты, произведенное котлоагрегатом в год, Гкал;

W_n – номинальная мощность котлоагрегата, Гкал.

- среднее значение расхода топлива на производство 1 Гкал теплоэнергии, кг у. т./Гкал;

$$g_{уд} = \frac{N_{\Sigma}}{W_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где N_{Σ} – годовой расход топлива, кг у. т.

- потери энергии в тепловых сетях, %

$$\eta = \frac{W_{\Sigma} - W_g}{W_{\Sigma}} 100, \quad (4)$$

где W_g – количество теплоты, полученное потребителем в год, Гкал.

- удельные инвестиции, руб/кВт

$$k_{уд} = \frac{K}{W_n}, \quad (5)$$

где K – капиталовложения в котельную, ТЭЦ, руб.

- себестоимость тепловой энергии, руб/Гкал

$$C = \frac{3_a + 3_n}{W_g}, \quad (6)$$

где 3_a – амортизационные отчисления, руб;

3_n – затраты на топливо, зарплату и пр., руб.

Определение оптимальных параметров котлоагрегата зависит от величины капитальных затрат на установку для сжигания биомассы и эксплуатационных затрат (в основном затрат на топливо и оплату труда) табл. 1 [1].

Таблица 1

Сравнение удельных затрат на инвестиции с затратами на топливо для установок, работающих на биомассе и мазуте мощностью котла 5 МВт

Установка	Удельные инвестиции	Затраты на топливо
На биомассе	Высокие (около 100 Евро/кВт)	Низкие (около 17,5 Евро/Гкал)
На топочном мазуте	Низкие (около 20 Евро/кВт)	Высокие (около 34,9 Евро/Гкал)

Удельные капиталовложения в строительство котельных установок на биомассе зависят от мощности котлоагрегата. Сравнение величин удельных капиталовложений в строительство котельных установок на биомассе в Австрии и Дании в зависимости от мощности котлов приведена на рис. 1 в ценах 1998 г. [1]. Инвестиции включают: затраты на топку с колосниковой решеткой для сжигания древесной щепы, резервный котел (на мазуте), склад топлива, систему подачи топлива, устройство очистки дымовых газов, дымовую трубу, здания и сооружения, гидравлическое и электротехническое оборудование, проектные, строительно-монтажные работы (без трубопроводной сети). Для снижения затрат на производство тепловой энергии необходимо обеспечить рациональную эксплуатацию установки. Так, себестоимость тепловой энергии при эксплуатации котлов, работающих на биомассе, зависит от числа часов работы с полной нагрузкой и мощности котлоагрегата. Что бы достичь приемлемой окупаемости инвестиций, число часов работы установки, работающей на биомассе с полной нагрузкой, должно быть не менее 4000 часов в год. Для ТЭЦ на биомассе соответствующий плановый показатель составляет 5000 или более часов работы с полной нагрузкой.

В результате полного сгорания топлива в котлоагрегатах, работающих на биомассе, образуются следующие выбросы в атмосферу двуокись углерода CO_2 , оксиды азота NO_x , оксиды серы SO_x , хлористый водород HCl , механические частицы и тяжелые металлы, наиболее важными из которых являются медь, свинец, кадмий и ртуть.

Снижение уровня выбросов вредных веществ при сжигании биомассы достигается посредством либо предотвращения создания таких веществ (*первичные меры*), либо удаления этих веществ из топочного газа (*вторичные меры*). В настоящем разделе описываются меры по снижению первичных выбросов, образующихся при неполном сгорании и первичные меры по снижению уровня выбросов направлены на снижение образования и/или снижение уровня выбросов в топочной камере. С этой целью применяется ряд мер, включая:

- изменение уровня влажности топлива;
- изменение размеров частиц топлива;
- выбор соответствующего оборудования для сжигания топлива;
- оптимизация управления процессом горения;
- ступенчатый выпуск воздуха при сжигании топлива;
- ступенчатое сжигание и дожиг топлива.

На практике эти меры часто взаимосвязаны.

Двуокись углерода, источником которой служит содержащийся в топливе углерод, является основным продуктом сгорания всех видов топливной биомассы. В целом выброс CO_2 в атмосферу является нежелательным, поскольку считается основной причиной, вызывающей парниковый эффект. Однако при сжигании древесной щепы количество выделяемого CO_2 не превышает количества CO_2 , которое было связано древесиной во время роста дерева. Также при сжигании щепы выделяется такое же количество CO_2 , что и при разложении древесины,

которое является основной альтернативой использованию древесины для производства энергии. Таким образом, древесная щепа считается нейтральным материалом по CO_2 .

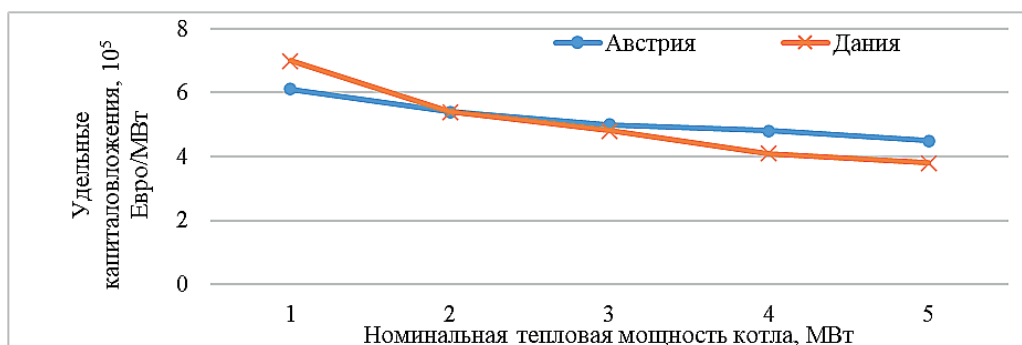


Рис. 1. Сравнение величины удельных инвестиций в строительство котельных установок на биомассе в Австрии и Дании в зависимости от тепловой мощности котла

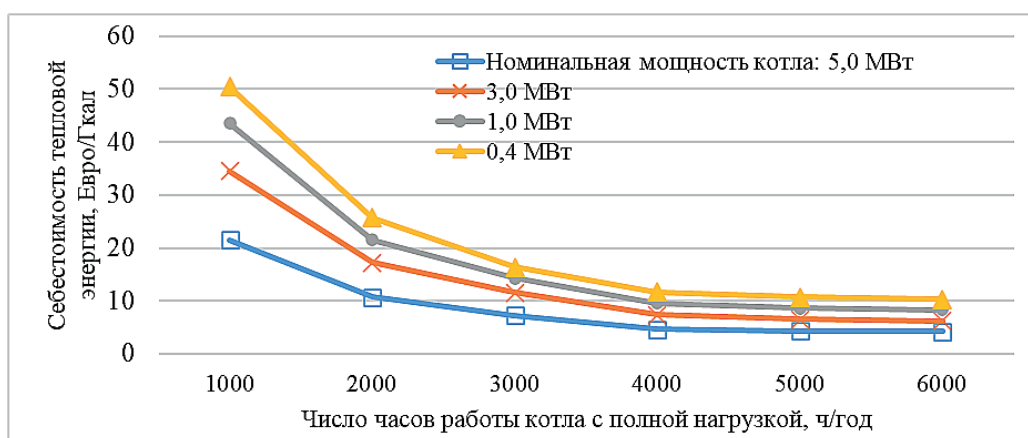


Рис. 2. Себестоимость тепловой энергии котельных установок на биомассе в зависимости от мощности и степени использования котлов

Оксиды азота (NO_x) образуются в процессе горения в результате трех различных процессов:

- NO образуется из азота, содержащегося в топливе при температуре сжигания более $1300^\circ C$ в результате окисления азота воздуха;
- NO_x образуется в результате сгорания углеводородов молекулярного азота с образованием свободных радикалов;

Так как температура сгорания биомассы в современных технологических процессах составляет от 800 до $1200^\circ C$, то угрозы образования NO отсутствует. Топливный NO_x играет наиболее важную роль в составе выбросов и уменьшить их можно с помощью первичных и вторичных мер.

Выбросы N_2O образуются при полном окислении содержащегося в топливе азота. Выбросы N_2O можно уменьшить с помощью первичных мер снижения уровня выбросов.

Оксиды серы образуются в результате полного окисления содержащейся в топливе серы. При этом образуется в основном SO_2 ($>95\%$). Однако при более низких температурах также возможно образование некоторого количества SO_3 ($<5\%$). Источником серы, выделяющейся при сжигании древесной щепы, являются соединения серы, поглощенные деревом в период его роста. При сжигании щепы на отопительных установках образуется значительно меньшее количество выбросов SO_x , чем при сжигании мазута или угля, которые часто заменяет биомасса.

Часть содержащегося в топливе хлора выделяется в форме HCl . Древесина имеет очень низкое содержание хлора. Содержащийся в топливе хлор не полностью преобразуется в HCl .

Как и двуокись хлора, хлористый водород HCl способствует окислению, однако быстрее конденсируется (образуя соляную кислоту) и, следовательно, не только может вызывать повреждение материалов в месте образования, но также наносить вред растениям.

Выбросы HCl можно уменьшить посредством промывки топлива, что в ряде случаев используется для очистки соломы, или с помощью вторичных мер снижения уровня выбросов.

Механические частицы включают зольную пыль, образующуюся в результате уноса частиц золы дымовыми газами, и соли (KCl , NaCl , K_2SO_4), образующиеся в результате реакций между K или Na и Cl или S . Оптимальная конструкция топочной камеры позволяет в некоторой степени предотвратить вынос зольной пыли, увлекаемой с топочным газом из камеры, которая оседает на дно камеры и затем удаляется как зольный остаток.

Все виды топлива из сырой биомассы содержат некоторое количество тяжелых металлов (наиболее важными из которых являются Cu , Pb , Cd , и Hg). Эти тяжелые металлы остаются в золе или испаряются, оседают на поверхности частиц, выбрасываемых в атмосферу, или остаются внутри зольных частиц. Выбросы тяжелых металлов можно уменьшить с помощью вторичных мер снижения их уровня.

Предельно допустимые уровни выбросов, определяемые для установок, осуществляющих сжигание биомассы, колеблются в значительных пределах в различных странах и выражаются в различных единицах, что затрудняет их сравнение. Нормы выбросов при сжигании биомассы в котлах для Беларуси приведены в табл. 2 [2], а для Австрии, Финляндии, Бельгии, Дании и Швеции в табл. 3 [1]. Максимальные допустимые уровни выбросов играют важную роль при выборе технологии и определении конфигурации системы ТЭЦ или котельной. Применение крупных котельных и ТЭЦ на биомассе ограничено возможностями транспортировки биомассы, поэтому интересным вариантом представляется выращивание быстрорастущей биомассы у потребителя.

Таблица 2

Нормы выбросов при сжигании биомассы в котлах

Номинальная тепловая мощность котла, МВт	Норма выброса, мг/м ³			
	твердые частицы	углерод оксид	азота диоксид	сера диоксид
для котлов, введенных в эксплуатацию с 1 января 1975 г. до 30 июня 2006 г.				
0,1–0,3 включительно	-	15 000	-	-
от 0,3 до 2,0 включительно	500	5 000	-	3 000
от 2,0 до 25 включительно	300	2 000	750	2 500
от 25 до 50 включительно	200	1 500	750	2 000
от 50 до 100 включительно	150	1 000	600	1 500
свыше 100	100	500	500	850
для котлов, введенных в эксплуатацию с 1 июля 2006 г. до 31 декабря 2018 г.				
0,1–0,3 включительно	600	7 500	750	-
от 0,3 до 2,0 включительно	300	2 500	600	2 500
от 2,0 до 25 включительно	150	1 000	500	2 000
от 25 до 50 включительно	100	750	500	1 500
от 50 до 100 включительно	50	500	400	850
свыше 100	30	500	200	200
для котлов, введенных в эксплуатацию с 1 января 2019 г.				
0,1–0,3 включительно	50	2 500	600	-
от 0,3 до 2,0 включительно	50	1 000	500	2 000
от 2,0 до 25 включительно	50	750	400	1 500
от 25 до 50 включительно	50	500	400	850
от 50 до 100 включительно	50	500	300	400
свыше 100	30	500	200	200

Предельно допустимые уровни выбросов при сжигании биомассы в котлах

Страна		Австрия	Финляндия (новые)	Бельгия	Дания	Швеция
Топливо		древесная биомасса	биомасса	биомасса	биомасса	биомасса
Параметр	Номинальная тепловая мощность котла, МВт	мг/нм ³ 13 % O ₂	мг/нм ³ 6 % O ₂	мг/нм ³ 11 % O ₂	мг/нм ³ 6 % O ₂	мг/нм ³ 6 % O ₂
твердые частицы	<0,12	150	-	150	-	350
	0,12-1	150	-	150	-	100
	1-2	150	265	150	-	100
	2-5	50	265	150	-	100
	5-10	50	-	30	-	100
	10-30	50	159	30	-	35
	30-100	50	50	10	50	35
CO	0,1-0,12	250	-	250	-	-
	0,12-1	250	-	250	-	-
	1-5	250	-	250	-	250
	5-50	100	-	200	-	250
	>50	100	-	100	-	250
NO _x	0,1-5	250	-	г.с.о.	-	200–300
	5-10	250	-	г.с.о.	-	200–300
	>10	200	-	г.с.о.	-	200
	>100	200	-	г.с.о.	-	200
	<30	г.с.о.	-	400	-	200
	30-50	200	-	200	-	200
	50-100	200	400	200	400	150–200
SO _x	<50	-	-	300	-	-
	50-100	-	200	50	200	200

Примечание. г.с.о. – диапазон при иных условиях.

Библиографические ссылки

1. Vos, J. Передовой опыт в использовании энергии биомассы / J. Vos // перевод с английского: в 2 ч. / учебно-выставочный и издательский центр УП «Белэнергогосбережение», 2006. 198 с
2. Об утверждении экологических норм и правил ЭкоНиП 17.08.06-001-2022 «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой). Требования экологической безопасности в области охраны атмосферного воздуха» : М-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 29 декабря 2022 г. № 32–Т : в ред. от 01 марта 2023 г. № 32 Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: https://naturegomel.by/sites/default/files/inline/files/ekonip_32-t.pdf (дата обращения: 03.01.2025).