

Программа развития ООН (ПРООН)

Глобальный экологический фонд (ГЭФ)

Департамент по энергоэффективности  
Государственного Комитета по Стандартизации

**Утилизация золы котельных,  
работающих на древесном  
топливе**

**МИНСК, 2007**

**Программа развития ООН (ПРООН)**

**Глобальный экологический фонд (ГЭФ)**

**Департамент по энергоэффективности  
Государственного Комитета по Стандартизации**

Книга издана и переведена в рамках совместного проекта ПРООН/ГЭФ и Правительства Республики Беларусь “Применение биомассы для отопления и горячего водоснабжения в Республике Беларусь”.

**Утилизация золы котельных, работающих на древесном топливе**

Рецензент к.т.н. И. Н. Потапова

Составитель Норберт Вильдбахер/ Norbert Wildbacher

BIOS (Bioenergiesysteme Gmbh)  
Inffeldgasse 216 A-8010 GRAZ, Austria  
tel: +43 316 481300  
fax: +43 316 481300-4  
www.BIOOS-BIOENERGY.at  
e-mail: office@bios-bioenergy.at

# Содержание

1	Введение .....	4
2	Образование золы и аэрозолей в процессе сжигания биомассы .....	5
3	Характеристики золы .....	6
3.1	Размеры частиц и плотность золы биомассы .....	7
3.2	Концентрация растительных питательных веществ в различных типах золы, получаемой при сжигании биомассы.....	9
3.3	Концентрация тяжелых металлов в различных типах золы, получаемой при сжигании биомассы .....	10
3.4	Органические загрязняющие вещества и органический углерод в золе, получаемой при сжигании биомассы ...	10
3.5	Значение pH и электропроводимости золы, получаемой при сжигании биомассы .....	12
3.6	Концентрации Si, Al, Fe, Mn и карбонатов в золе, получаемой при сжигании биомассы .....	12
4	Общие аспекты использования золы .....	14
5	Использование золы, получаемой при сжигании биомассы .....	15
5.1	Нынешняя ситуация .....	15
5.2	Австрийские руководящие документы .....	15
5.3	Рекомендуемые процедуры и предельные количественные показатели для переработки золы, получаемой при сжигании биомассы, в Австрии .....	16
6	Использование золы, получаемой при сжигании биомассы, в Швеции .....	18
6.1	Нынешняя ситуация .....	18
6.2	Обработка, транспортировка и внесение золы – шведский подход .....	18
6.3	Экологические аспекты .....	20
7	Использование золы, получаемой при сжигании биомассы, в Дании .....	22
7.1	Нынешняя ситуация/энергетическая политика Дании .....	22
7.2	Законодательство Дании, касающееся использования золы, получаемой при сжигании биомассы .....	23

## 1 Введение

Процесс сжигания твердых видов биотоплива (подача топлива, его горение, удаление твердых и газообразных частиц) зависит от вида используемого твердого биотоплива, его физических характеристик (напр., размера частиц, объемной плотности, содержания влаги, общей теплотворной способности) и химического состава. Благодаря последним научным исследованиям, внедрённым в производство, технологии сжигания биомассы достигли очень высокого уровня и используются в установках любой тепловой мощности. Наиболее важное преимущество биотоплива по сравнению с ископаемыми видами топлива заключается в том, что его сжигание рассматривается как  $\text{CO}_2$ -нейтральный процесс. Кроме того, современные системы сжигания биомассы, включая системы совместного сжигания с другими видами топлива, обеспечивают низкие уровни выброса  $\text{CO}$ -,  $\text{NO}_2$ - и общего органического углерода, сопоставимые с уровнями выброса от установок, предназначенных для сжигания ископаемого топлива.

Вследствие расширения практики использования биомассы для производства энергии, растёт и количество твёрдых отходов, таких как зола, содержание которой в биотопливе колеблется от 0,5 весовых процентов (на сухую массу) для мягких пород древесины до 4-8 весовых процентов для коры, которая характеризуется повышенным содержанием золы с одной стороны, и большим содержанием минеральных примесей (песка, земли, камней) с другой стороны.

**Таблица 1.** Содержание золы в различных видах биотоплива [1]. Низкое содержание в древесной щепе и опилках и более высокое в коре.

Используемое биотопливо	Содержание золы
Кора	5,0 – 8,0
Древесная щепа с корой (лесная)	1,0 – 2,5
Древесная щепа без коры (промышленная)	0,8 – 1,4
Опилки	0,5 – 1,1

**Примечания:** Содержание золы измеряется в весовых процентах (по сухой массе); измерение содержания золы проводится согласно ISO 1171-1981 при температуре 550 °C.

В связи с увеличением расходов на утилизацию золы, получаемой от сжигания биомассы, встаёт вопрос о необходимости её регулируемого использования.

Для устойчивого использования золы очень важно замкнуть цикл обращения компонентов золы и включить золу биомассы в естественные циклы обращения веществ. По этой причине цикл обращения минералов (почва/питательные вещества → корни/растение → сжигание → зола → почва) должен быть максимально замкнутым.

Ранее проведенные исследования показали, что естественный цикл обращения минералов в процессах получения энергии из биомассы нарушается вследствие накопления тяжелых металлов в лесной экосистеме в результате загрязнения окружающей среды. По этой причине в большинстве

случаев невозможно использовать в полном объеме золу, образующуюся в процессе сжигания. Отделение части золы, богатой тяжелыми металлами, должно обеспечить возможность для утилизации основной её части.

Для того чтобы использование золы, получаемой при сжигании биомассы, было максимально устойчивым, требуется предварительная её переработка, что делает золу полезным продуктом для сельского хозяйства. Золу необходимо перемешивать таким образом, чтобы обеспечить необходимый химический состав, который отслеживается с помощью системы контроля качества. Кроме того, зола должна поставляться потребителям таким образом, чтобы ее можно было вносить с помощью традиционных разбрасывателей навоза. Предварительная обработка золы зависит от габаритов сжигающей установки, а также от вида используемого биотоплива. Большое значение имеет хранение золы, если нет возможности непосредственно увязать между собой процессы ее получения и использования.

Помимо прямого использования золы в сельскохозяйственных или лесных угодьях, ее можно использовать косвенно – путем добавления в сельскохозяйственный компост. Непрямое использование золы снижает образование пыли, однако требует выполнения других рабочих операций. Для правильного выбора процесса использования золы необходимо учитывать несколько факторов, таких как сельскохозяйственная инфраструктура и общие затраты на применение определенной технологии использования золы.

Получение гранулированной золы за счет отверждения золы водой является обычной технологией предварительной обработки золы, получаемой при сжигании биомассы. В частности, она широко используется и исследуется в Швеции [2]. Гранулирование золы позволяет снизить уровень образования пыли в процессе переработки и внесения. Кроме того, уменьшается выщелачивание питательных веществ из золы, что делает ее близкой по составу к почве и снижает возможное активное кислотно-щелочное воздействие на растения.

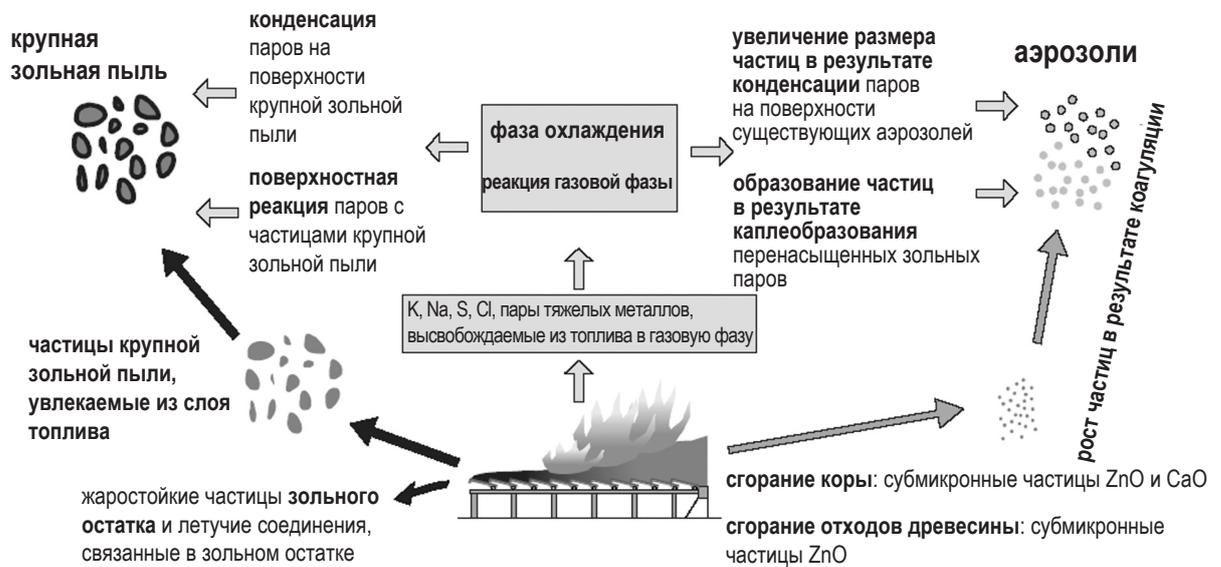
## **2 Образование золы и аэрозолей в процессе сжигания биомассы**

Золу, образуемую в процессе сжигания биомассы, можно подразделить на зольный остаток (подовая зола) и летучую золу (зола уноса). Фракция летучей золы обычно включает крупную и мелкую части. Если крупная фракция (частицы размером более нескольких микрометров) просто образуется в результате уноса золы из слоя топлива, процессы образования мелкой формы (так называемых аэрозолей с частицами диаметром менее 1 мкм) являются намного более сложными.

Основные механизмы образования аэрозолей в процессах горения в целом хорошо описаны в некоторых исследовательских работах [3].

Летучие соединения золы, которые включают K, Na, S, Cl, а также тяжелые металлы (Zn и Cd), выделяются из топлива в газовую фазу и затем вступают в реакции газовой фазы. Как только давление пара в смеси превышает давление насыщения, что может иметь место либо вследствие

высокой скорости образования данного соединения, либо вследствие охлаждения топочного газа, происходит образование частиц в результате конденсации таких паров на существующих поверхностях. Процессы каплеобразования и конденсации всегда сопутствуют друг другу, и, если имеется достаточная поверхность для конденсации, процесс каплеобразования может частично или полностью подавляться. В противном случае образуются очень малые аэрозольные частицы (несколько нм). Как только такие частицы образуются, они начинают коагулировать с другими аэрозолями или с частицами крупной фракции уноса.



**Рисунок 1.** Механизмы, участвующие в образовании золы в процессе сгорания биомассы. [4]

Вследствие различия в процессах образования крупных частиц золы уноса и аэрозолей, а также вследствие различия их химического состава и поведения эти две фракции золы уноса всегда должны обрабатываться и использоваться отдельно. Однако поскольку присутствие крупных частиц золы уноса влияет на образование и поведение аэрозолей, необходимо учитывать факторы взаимодействия между этими двумя фракциями. На рисунке 1 показаны различные процессы образования золы и аэрозолей; более подробную информацию можно найти в работе [4].

### 3 Характеристики золы

В установках для сжигания биомассы обычно присутствуют три фракции золы:

- зольный остаток (подовая зола);
- зола уноса из циклонов;
- зола уноса из фильтров.

Подовая зола образуется на решетке в топке. Эта зольная фракция часто смешивается с минеральными примесями, содержащимися в биотопливе, такими как песок, камни и земля. Минеральные примеси могут вызывать – особенно в котельных установках с неподвижным слоем при большом содержании коры – образование шлака (ввиду понижения температуры плавления) и спекание частиц золы в зольном остатке.

Циклонная зольная пыль включает мелкие, в основном неорганические, частицы золы, уносимые вместе с топочным газом из топки и осаждаемые преимущественно в мультициклонах, расположенных за топкой. Эта зольная фракция, в основном, содержит крупные частицы золы уноса.

Фильтрационная зола уноса представляет собой вторую, более мелкую фракцию, осаждаемую в электростатических фильтрах, тканевых фильтрах или в виде конденсационного шлама в блоках конденсации топочного газа (обычно расположенных за мультициклонами). Эта зольная фракция, в основном, включает аэрозоли.

### 3.1 Размеры частиц и плотность золы

В таблице 2 показаны стандартные значения среднего распределения по массе различных фракций золы относительно общего её содержания в топке с неподвижным слоем. Указанные различия обусловлены применением различных технологий сжигания и различными размерами измельчённого биотоплива. Распределение по массе также зависит от геометрии топки, подачи воздуха для горения, системы управления процессом и используемой технологии отделения пыли.

**Таблица 2.** Процентное содержание различных зольных фракций от общего количества золы.

Биотопливо/зольная фракция	Кора	Древесная щепа	Опилки
Подовая зола	65 – 85	60 – 90	20 – 30
Циклонная зола уноса	10 – 25	10 – 30	50 – 70
Зола уноса фильтров тонкой очистки	2 – 10	2 – 10	10 – 20

Примечания: Данные взяты из источников [5, 6, 7]. Все топки оснащены циклонами, за которыми установлен второй, более эффективный блок осаждения пыли.

Среднее количество получаемой золы зависит в первую очередь от топлива (см. таблицу 1). Работа систем сжигания в псевдосжиженном слое сопровождается выделением большего объема пыли по сравнению с системами сжигания в неподвижном слое, поскольку, помимо золы, получаемой при сжигании биомассы, из топки также выводится инертный рабочий материал самого слоя. Доля подовой золы в общем объеме золы, получаемой в установках для сжигания в псевдосжиженном слое, значительно ниже, чем в системах сжигания с неподвижным слоем, и составляет 20-30%. Остальные 70-80% получаемой золы составляет зола уноса, которая выносится с топочным газом и отделяется в секциях котла и в пылесадителях, расположенных за секциями котла.

Плотность частиц уменьшается по мере перехода от подовой золы к фильтрационной золе (таблица 3), что можно объяснить уменьшением количества минеральных примесей в зольной фракции и увеличением солесодержания. Объемная (насыпная) плотность уменьшается по мере уменьшения размеров зольной фракции.

**Таблица 3.** Средняя плотность частиц и объемная (насыпная) плотность золы биомассы.

Зольная фракция	Средняя плотность частиц (кг/м <sup>3</sup> )	Объемная (насыпная) плотность	
		Среднее значение (кг/м <sup>3</sup> )	Стандартное отклонение (кг/м <sup>3</sup> )
<b>Сжигание коры (подвижная решетка и топка с нижней подачей топлива)</b>			
Подовая зола	2600 – 3000	950	200
Циклонная зола	2400 – 2700	650	120
Зола фильтра тонкой очистки	2300 – 2600	350	120
<b>Сжигание щепы (подвижная решетка и топка с нижней подачей топлива)</b>			
Подовая зола	2600 – 3000	950	200
Циклонная зола	2400 – 2700	500	150
Зола фильтра тонкой очистки	2300 – 2600	--	--
<b>Сжигание опилок (топка с нижней подачей топлива)</b>			
Подовая зола	2600 – 3000	650	150
Циклонная зола	2400 – 2700	300	100
Зола фильтра тонкой очистки	2300 – 2600	--	--

Примечания. Данные взяты из источников [8, 9]. Все цифры приведены к сухой массе.

Размеры частиц зависят от фракционного состава используемого топлива, содержания золы, химического состава золы и объема минеральных примесей в топливе. Размеры частиц подовой золы зависят от её спекания, в то время как размеры частиц золы уноса зависят от используемой технологии разделения золы уноса, а также от химического состава биотоплива.

### 3.2 Содержание питательных веществ в различных типах золы, получаемой при сжигании биомассы

В таблице 4 показаны средние значения содержания растительных питательных веществ в золе, получаемой при сжигании коры, щепы и опилок. Анализируемые типы золы содержат значительное количество растительных питательных веществ, что делает использование золы экономически привлекательным. Единственное растительное питательное вещество, отсутствующее в золе от сжигания биомассы, – это азот. Во время сгорания топлива азот окисляется и почти полностью уходит вместе с топочными газами.

**Таблица 4.** Средняя концентрация питательных веществ в различных зольных фракциях, получаемых при сжигании коры, щепы и опилок в котельных установках.

Питательные вещества	Зольный остаток		Циклонная зольная пыль		Зольная пыль фильтра тонкой очистки	
	Ср. значение	Ст. откл.	Ср. значение	Ст. откл.	Ср. значение	Ст. откл.
CaO	41,7	8,7	35,2	11,8	32,2	6,9
MgO	6,0	1,2	4,4	0,9	3,6	0,7
K <sub>2</sub> O	6,4	2,1	6,8	2,3	14,3	7,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,6	1,0	2,5	0,9	2,8	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,7	0,2	0,6	0,3	0,8	0,6

Примечания: Данные взяты из источников [5, 6, 7]. Концентрация в весовых процентах (по сухой массе). Типы используемой биомассы: щепа и кора ели. Ст. откл. = стандартное отклонение.

Концентрация кальция в золе, получаемой при сжигании коры и древесной щепы, значительно выше, чем, например, в золе, получаемой при сжигании соломы и злаковых. Для калия это соотношение является обратным. Значения концентрации магния аналогичны для золы, получаемой при сжигании всех анализируемых видов биотоплива. В таблице 5 показан химический состав золы, получаемой при сжигании отходов древесины. Состав золы в отходах древесины такой же, как состав золы, получаемой при сжигании свежей древесины.

**Таблица 5.** Средняя концентрация растительных питательных веществ в различных зольных фракциях, получаемых при сжигании отходов древесины.

Питательные вещества	Подовая зола	Циклонная зола	Зола фильтра тонкой очистки
CaO	32,6	32,3	--
MgO	3,0	3,2	--
K <sub>2</sub> O	6,6	7,5	--
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,9	1,3	--
Na <sub>2</sub> O	--	--	--

Примечания: Данные взяты из источников [10, 11, 12]. Концентрация в весовых процентах (по сухой массе).

### 3.3 Содержание тяжелых металлов в различных типах золы, получаемой при сжигании биомассы

В таблице 6 показаны средние значения концентрации тяжелых металлов в различных зольных фракциях, получаемых при сгорании древесной коры в топках с неподвижным слоем. Концентрация летучих и экологически активных соединений тяжелых металлов (цинка (Zn), кадмия (Cd), свинца (Pb)) увеличивается по мере перехода от зольного остатка к зольной пыли. Это объясняется тем, что летучие соединения тяжелых металлов переходят в паровую фазу в процессе сгорания и затем конденсируются, или вступают в реакцию, образуя новые, очень мелкие зольные частицы (аэрозоли), или аккумулируются на поверхности существующих частиц золы уноса. Содержание определенных тяжелых металлов в самых мелких зольных фракциях – фильтрационной золе – значительно превышает соответствующие предельные значения, что не позволяет использовать эту фракцию на сельскохозяйственных полях или в лесах. Следовательно, её необходимо подвергать утилизации или промышленной переработке. Остальные зольные фракции (подовую золу и циклонную золу, которые обычно составляют более 90 весовых процентов) следует смешивать в определенном отношении (так называемая пригодная зола) и использовать на сельскохозяйственных полях или в лесах для удобрения или известкования.

**Таблица 6.** Средняя концентрация тяжелых металлов в различных зольных фракциях, получаемых при сгорании коры, щепы и опилок.

Элементы	Подовая зола		Циклонная зола		Фильтрационная зола	
	Ср. значение	Ст. откл.	Ср. значение	Ст. откл.	Ср. значение	Ст. откл.
Cu	164,6	85,6	143,1	46,7	389,2	246,4
Zn	432,5	305,2	1870,4	598,5	12980,7	12195,9
Co	6,5	19,0	19,0	7,3	17,5	5,2
Mo	2,8	0,7	4,2	1,4	13,2	9,8
As	4,1	3,1	6,7	4,3	37,4	41,4
Ni	66,0	13,6	59,6	19,0	63,4	35,4
Cr	325,5	383,0	158,4	61,0	231,3	263,7
Pb	13,6	10,4	57,6	20,5	1053,3	1533,0
Cd	1,2	0,7	21,6	8,1	80,7	59,2
V	43,0	10,0	40,5	16,6	23,6	9,1
Hg	0,01	0,03	0,04	0,05	1,47	2,05

Примечания: Данные взяты из источников [5, 6, 7]. Концентрация в мг/кг (по сухой массе). Типы используемой биомассы: щепа и кора ели. Ст. откл. = стандартное отклонение.

### 3.4 Органические загрязняющие вещества и органический углерод в золе, получаемой при сжигании биомассы

Концентрация органических загрязняющих веществ (ПХДД/Ф, ПАУ) в подовой золе и циклонной золе, получаемых в установках для сжигания биомассы с использованием химически необработанной биомассы и отходов в соответствии с действующими технологическими стандартами, в целом невысока и экологически безопасна (см. таблицу 7). В фильтрационной золе пыли содержится значительное количество органических загрязняющих веществ.

Следовательно, эту зольную фракцию необходимо собирать отдельно и не вносить в почву.

Анализ золы, получаемой при сжигании коры и древесины, показывает наличие корреляции между содержанием органического углерода и содержанием ПАУ в циклонной золе. Это подчеркивает важность полного сжигания древесного топлива. Содержание  $C_{\text{орг}}$  в золе биомассы должно быть ниже 5 весовых процентов (по сухой массе), что предусматривается действующими руководящими документами по использованию золы в сельскохозяйственных целях и в лесах, принятыми в различных странах (напр., в Австрии и Дании). При повышении концентрации  $C_{\text{орг}}$  требуется дополнительное определение содержания ПХДД/Ф и ПАУ в золе.

**Таблица 7.** Концентрация углерода, хлора и органических загрязняющих веществ в золе, получаемой при сжигании биомассы.

Зольная фракция	$C_{\text{орг}}$ (вес. % по сух. массе)	Cl (вес. % по сух. массе)	ПХДД/Ф (нг ЭТ/кг сух. массе)	ПАУ (мг/кг сух. массе)	Б[а]П (мкг/кг сух. массе)
<b>Сжигание коры</b>					
Подовая зола	0,2 – 0,9	<0,06	0,3 – 1,7	1,4 – 1,8	1,4 – 39,7
Циклонная зола	0,4 – 1,1	0,1 – 0,4	2,2 – 12,0	2,0 – 5,9	4,7 – 8,4
Фильтрационная зола	0,6 – 4,6	0,6 – 6,0	7,7 – 12,7	137,0 – 195,0	900,0 – 4900,0
<b>Сжигание древесной щепы</b>					
Подовая зола	0,2 – 1,9	<0,01	2,4 – 33,5	1,3 – 1,7	0,0 – 5,4
Циклонная зола	0,3 – 3,1	0,1 – 0,5	16,3 – 23,3	27,6 – 61,0	188,0 – 880,0
Фильтрационная зола	--	--	--	--	--
<b>Сжигание опилок</b>					
Подовая зола	0,2 – 3,4	<0,1	1,3 – 2,1	14,7 – 21,1	21,0 – 40,5
Циклонная зола	3,2 – 15,3	0,1 – 0,6	1,5 – 3,7	11,2 – 150,9	180,0 – 670,0
Фильтрационная зола	--	--	--	--	--

Примечания: Данные взяты из источников [5, 6, 7]. ЭТ – эквивалент токсичности; ПХДД/Ф – полихлордibenзо-р-диоксин и dibензофуран; ПАУ – полициклические ароматические углеводороды согласно рекомендациям Управления по охране окружающей среды США (16 соединений); Б[а]П – бензо[а]пирен (канцерогенный ПАУ, указанный отдельно).

Процесс образования органических загрязняющих веществ можно ограничить за счет высокой степени сгорания биомассы и использования топлива с низкой концентрацией хлора.

Зола, получаемая в результате сжигания древесных отходов, имеет концентрацию ПХДД/Ф от 3 до 5 нг ЭТ/кг (по сухой массе) (содержание хлорида в золе: 0,01 – 0,6 весовых процентов (по сухой массе)) [11].

### 3.5 Значение рН и электропроводимости золы, получаемой при сжигании биомассы

Значения рН золы, получаемой при сжигании древесины, варьируются от 12 до 13 (см. таблицу 8).

**Таблица 8.** Значение рН и электропроводимость золы из биомассы.

	Подовая зола		Циклонная зола		Фильтрационная зола	
	Значение рН в CaCl <sub>2</sub>	Эл. пров. (мС/см)	Значение рН в CaCl <sub>2</sub>	Эл. пров. (мС/см)	Значение рН в CaCl <sub>2</sub>	Эл. пров. (мС/см)
Кора	12,7	8,9	12,7	10,8	12,7	35,6
Древесная щепа/опилки	12,8	10,2	12,7	13,1	12,6	39,5

Примечания: Данные взяты из источников [5, 6, 7]. Эл. пров. = электропроводимость.

После внесения золы в почву происходит быстрое превращение гидроокислов в карбонаты вследствие присутствия CO<sub>2</sub> в воздухе, содержащемся в почве. В результате значение рН золы уменьшается до нейтрального значения, а значение рН почвы увеличивается. Параллельно с образованием карбонатов за несколько дней произойдет снижение электропроводимости в почве до нормальных значений (ниже 0,75 мС/см). На данный момент отрицательного влияния золы биомассы на почву или растения вследствие изменения рН не обнаружено.

### 3.6 Содержание Si, Al, Fe, Mn и карбонатов в золе, получаемой при сжигании биомассы

В таблице 9 показана средняя концентрация соединений кремния (Si), алюминия (Al), железа (Fe), марганца (Mn) и карбонатов (в виде CO<sub>2</sub>) в смесях подовой и циклонной золы (так называемой «пригодной золы») для различных видов биотоплива. Экологическое воздействие от внесения такой золы в почву описано ниже для различных компонентов золы.

**Таблица 9.** Концентрация соединений Si, Al, Fe, Mn и карбонатов в золе, получаемой при сжигании биомассы (смеси подовой и циклонной золы), для различных типов топлива.

Соединение (вес. % по сух. массе)	Кора	Древесная щепа	Опилки
SiO <sub>2</sub>	26,0	25,0	25,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,1	4,6	2,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5	2,3	3,8
MnO	1,5	1,7	2,6
SO <sub>3</sub>	0,6	1,9	2,4
CO <sub>2</sub>	4,0	3,2	7,9

Примечания: Данные взяты из источника [1].

Кремний (Si) нейтрален с экологической точки зрения, нерастворим и может улучшать структуру почвы [13].

Содержание алюминия (Al) в верхнем слое почвы, например в Австрии, варьируется от 15 000 до 60 000 мг/кг (по сухому весу) [14]. По этой причине концентрации Al выше только в золе, получаемой при сжигании коры, по сравнению с нормальной концентрацией Al в почве. Если значение pH в почве выше 5, Al нерастворим и, следовательно, нейтрален в экологическом смысле (находится в связанном состоянии в виде окислов или гидроокислов). Если значение pH ниже 3,8 (в лесной почве), высвобождение ионов Al<sup>3+</sup> будет усиливаться, что вредно для растительности. Поэтому содержание Al в золе при сжигании биомассы не представляет опасности для почвы, если значения pH выше 3,8. Щелочной эффект золы, получаемой при сжигании биомассы, будет увеличивать значение pH в почве и препятствовать высвобождению Al.

Железо (Fe) и марганец (Mn) представляют собой важнейшие питательные вещества для растений. Вследствие низкой концентрации серы в золе, получаемой при сжигании биомассы, серу также можно считать питательным веществом [13].

Концентрация Fe и Al в подовой и циклонной золе одинакова. Сера (S) обладает сильной летучестью, поэтому S концентрируется в циклонной золе. Si и Mn концентрируются в подовой золе.

Элементы, содержащиеся в подовой и циклонной золе, обычно представлены окислами, однако они могут иметь форму гидроокислов, карбонатов и сульфатов. Количество карбонатов (в пересчете на CO<sub>2</sub>) в различных зольных фракциях сильно зависит от времени воздействия на золу влаги и атмосферы, богатой CO<sub>2</sub> (в дымоходах, окружающем воздухе), а также от температуры сгорания. Это означает, что если температура сгорания высока, а время пребывания золы уноса в дымоходах незначительно (при полной нагрузке котельной установки), содержание углерода в золе будет ниже. Вторым фактором, влияющим на образование карбонатов, является концентрация Ca и Mg в золе. По этой причине содержание карбонатов в установках для сжигания соломы низкое, несмотря на относительно невысокую температуру в топке (кремний (Si) образует окислы; калий (K) образует окислы, хлориды или сульфаты).

## 4 Общие аспекты использования золы

Зола, получаемая при сжигании твердых видов биотоплива, содержит большое количество растительных питательных веществ, что привлекательно с точки зрения использования её в почве (см. раздел 3.2). Конечно, с экологической точки зрения использование золы привлекательно только в отношении золы, получаемой при сжигании химически необработанных видов биотоплива (в почву не следует вносить золу, получаемую при сжигании загрязненных видов биотоплива, таких как некоторые отходы древесины). Для устойчивого использования биотоплива очень важно замкнуть цикл обращения минералов и включить золу, получаемую при сжигании биомассы, в естественные циклы. Цикл минералов должен быть максимально замкнутым.

Однако ранее проведенные исследования показали, что естественный цикл минералов в процессе получения энергии из необработанной биомассы нарушается вследствие осаждения тяжелых металлов в лесной экосистеме в результате загрязнения окружающей среды. По этой причине в большинстве случаев использовать всю золу, получаемую в процессе сгорания, невозможно. Это, в основном, справедливо для такого древесного топлива, как кора, древесная щепа и опилки.

Тяжелые металлы, содержащиеся в биотопливе (Zn и Cd), которые опасны для окружающей среды, концентрируются, в основном, в золе уноса, в то время как питательные (M, Mg и P) и известковые вещества (Ca) содержатся, в основном, в подовой золе [15]. Зола, получаемая при сжигании древесины и коры, богата Ca, в то время как зола, получаемая при сжигании соломы и злаковых, имеет большое содержание K.

Причиной повышенного содержания тяжелых металлов в золе уноса по сравнению с подовой золой является то, что летучие соединения тяжелых металлов Cd и Zn, в основном, испаряются в процессе горения и затем осаждаются на поверхности частиц золы уноса или образуют аэрозоли. Часть мелких частиц золы уносится с топочным газом из слоя топлива и образует крупную фракцию золы уноса, причём минеральное содержание этих крупных частиц, уносящихся с решетки, аналогично минеральному составу подовой золы.

Следовательно, смесь подовой золы и циклонной золы (в основном, в виде крупных частиц золы уноса), так называемая «пригодная зола» с низким содержанием тяжелых металлов, может быть использована в качестве удобрения, а фракцию фильтрационной золы (которая обычно составляет лишь 10% от общего количества золы) с высоким содержанием тяжелых металлов необходимо утилизировать или подвергать промышленной переработке.

Для эффективного отделения соединений тяжелых металлов установку для сжигания биомассы необходимо оборудовать надежной системой подготовки рабочей воздушной смеси, с тем чтобы обеспечить низкий коэффициент избытка воздуха для горения на решетке и в первичной камере горения.

Температура топочного газа в этой зоне должна быть высокой. Коэффициент избытка воздуха для горения ниже 1 (восстановительная среда) и высокая температура усиливают выход летучих соединений тяжелых металлов из слоя топлива. Кроме того, система очистки должна иметь две стадии осаждения золы уноса, включая осадитель крупной фракции золы пыли и высокоэффективный осадитель мелкой фракции. Рекомендуется отделять потоки золы с малым и большим содержанием металлов (фильтрационной золы пыли) и использовать основную часть получаемой золы в качестве вторичного сырья – для удобрения и известкования сельскохозяйственных и лесных земель.

## 5 Использование золы, получаемой при сжигании биомассы

### 5.1 Нынешняя ситуация

Австрия является первой европейской страной, где было принято четкое законодательство по вопросам использования золы, получаемой при сжигании биомассы. Эти нормативные положения кратко описаны ниже.

Древесная зола определяется как зола, получаемая при сжигании химически необработанной древесной биомассы, например, древесной щепы, коры и опилок. В более широком смысле термин “зола, получаемая при сжигании биомассы” включает золу, образующуюся при сжигании соломы, злаковых, сена и других сельскохозяйственных отходов.

Подовая зола из топки, циклонная и фильтрационная зола, получаемые на установках для сжигания биомассы, законодательно считаются промышленными и неопасными отходами. В случае использования отходов их можно рассматривать как вторичное сырье при условии, что процесс является экологически безопасным и значимым. Кроме того, зола, получаемая при сжигании биомассы, не считается удобрением, поскольку химический состав такой золы сильно меняется. Использование золы, получаемой при сжигании биомассы, как вторичного сырья должно регулироваться законодательно.

### 5.2 Австрийские руководящие документы

На основании результатов комплексных исследований Министерство сельского и лесного хозяйства Австрии разработало два руководящих документа [16, 17] для обеспечения правильного использования золы, получаемой при сжигании биомассы, на сельскохозяйственных полях и в лесах.

Эти руководящие документы регулируют следующие вопросы:

- какой тип золы, получаемой при сжигании биомассы, которые можно использовать в качестве удобрений и для известкования сельскохозяйственной и лесной почвы (эти руководящие принципы определяют тип зольных фракций, а также концентрацию тяжелых металлов в золе);
- как и когда можно вносить золу (технология внесения, климатические и погодные условия);
- максимально допустимое количество вносимой золы;
- требования к составу почвы (тип почвы, химический состав).

Внесение фильтрационной золы в почву запрещено. Такая зольная фракция должна рассматриваться как промышленные отходы.

### 5.3 Рекомендуемые процедуры и предельные количественные показатели для внесения золы, получаемой при сжигании биомассы, в Австрии

Приведенные ниже рекомендации основаны на результатах комплексного анализа золы, полевых испытаниях и материальном балансе в системе «зола-почва/грунтовые воды – растение» для сельскохозяйственных земель, пастбищ и лесов в Австрии. Эти рекомендации также включены в руководящие документы Австрии, касающиеся внесения золы, получаемой при сжигании биомассы, в почвы.

Из всех зольных фракций, получаемых в установках для сжигания биомассы (подовая зола, циклонная зола и фильтрационная зола), в качестве вторичного сырья обычно используется смесь подовой и циклонной золы в определенном отношении, зависящем от растительности (так называемая пригодная зола), поскольку она обладает свойствами, необходимыми для удобрения и известкования почвы.

Чтобы избежать экологической несовместимости и ущерба для окружающей среды, необходимо учитывать следующие факторы:

- Допускается использовать только золу, получаемую при сжигании химически необработанного биотоплива.
- Фильтрационную золу и циклонную золу следует собирать отдельно. Фильтрационную золу пыль необходимо утилизировать или использовать в промышленности (после соответствующей обработки).
- Перед внесением в почву пригодную золу, получаемую на установке для сжигания биомассы, необходимо исследовать для определения содержания питательных веществ и экологически вредных тяжелых металлов. Анализ золы следует проводить регулярно.
- При внесении в почву пригодной золы, получаемой при сжигании коры, древесной щепы и опилок, необходимо учитывать следующие рекомендуемые предельные количественные показатели [16, 17]: 1 000 кг на га в год на сельскохозяйственных землях, 750 кг на га в год на пастбищах и 3 000 кг на га за 50 лет в лесах.
- Количество пригодной золы, получаемой при сжигании соломы и злаковых, следует определять, исходя из потребностей растений и почвы в питательных веществах. Вследствие низкой концентрации тяжелых металлов в таких видах золы не должно быть никаких экологических факторов, ограничивающих её использование в почвах при условии отделения фильтрационной зольной пыли.

Предельные показатели для использования золы, получаемой при сжигании биомассы, в сельском хозяйстве и лесах Австрии, а также рекомендуемые значения для почв приведены в таблице 10.

Предельные количественные показатели для использования золы на сельскохозяйственных землях и пастбищах рассчитываются на основании содержания тяжелых металлов в золе. Если содержание тяжелых металлов в используемой золе ниже предельного значения, указанного в руководящем документе, количество золы можно увеличивать [17].

Предельные показатели для золы, используемой в лесах, рассчитываются на основе содержания Cd в золе. Этот предельный показатель гарантирует, что поступление Cd в лесную систему вследствие внесения золы не превышает выхода Cd из лесной системы при заготовке леса [16].

Золу, получаемую при сжигании коры или древесины, следует использовать в лесах или в посадках с коротким оборотом рубки, в то время как золу, получаемую при сжигании соломы или злаковых, следует использовать на сельскохозяйственных землях.

Ввиду высокого содержания Ca и Mn в золе, получаемой при сжигании древесины и коры, эффект от использования древесной золы в качестве удобрения будет таким же, как при известковании лесной почвы (аналогичное отношение CaO/CaCO<sub>3</sub>, высокое значение pH в древесной золе). Большие размеры частиц древесной золы снижают ее агрессивное воздействие по сравнению с известью. По этой причине использование древесной золы рекомендовано для лесных почв, где желательно увеличить значение pH.

**Таблица 10.** Предельные значения концентрации тяжелых металлов в золе, получаемой при сжигании биомассы, вносимой в сельскохозяйственную и лесную почву, согласно действующим нормативам в Австрии.

Элемент	Предельные значения для леса	Предельные значения для сельского хозяйства*
Cu	250	250
Zn	1500	1000
Ni	100	100
Cr	250	250
Pb	100	250
Cd	8	5

Примечания: Данные взяты из источников [16, 17]. Концентрации в мг/кг по сухой массе.\* Согласно классу качества I.

В целом, количество золы, используемой для удобрения, зависит от условий обработки почвы, ее состава и внесения дополнительных удобрений и должно рассчитываться ежегодно по балансу питательных веществ.

Что касается содержания калия (K), зола, получаемая при сжигании биомассы, аналогична промышленным удобрениям. Поэтому она пригодна для растений, которые чувствительны к Cl (деревья, кустарник, различные овощные культуры) и могут переносить увеличение pH почвы. Кроме того, зола, получаемая при сжигании биомассы, может использоваться для удобрения однолетних растений, используемых в качестве источника энергии, с высоким содержанием Cl с целью уменьшения поглощения Cl растениями [18].

Что касается фосфора (P), зола, получаемая при сжигании древесины и коры, может лишь поддерживать стабильный уровень P в почве. Концентрация и содержание P выше в золе, получаемой при сжигании соломы и злаковых. Если в почве имеется нехватка P, дополнительно следует применять искусственные удобрения.

## **6 Использование золы, получаемой при сжигании биомассы, в Швеции**

### **6.1 Нынешняя ситуация**

Биоэнергия в Швеции представляет собой важный и широко популярный источник энергии. Основную долю биомассы составляют лесные виды топлива. Они включают, например, черный щелок (остаток производства древесной массы), другие побочные продукты целлюлозной промышленности, отходы деревообработки, дрова и отходы лесозаготовки [20].

Учитывая далеко идущую цель – создание устойчивой энергетической системы – можно ожидать, что использование возобновляемых источников энергии в Швеции будет расти, при этом в значительной степени за счёт биотоплива.

Увеличение объемов использования биотоплива в последние десятилетия привело к росту объемов получаемой при этом древесной золы.

Примерно 40% золы – это результат сжигания коры, древесной щепы и опилок в котельных на лесопилках, деревоперерабатывающих и целлюлозно-бумажных предприятиях. Еще 35% золы получают на предприятиях районного теплоснабжения. Остальная часть золы образуется при сжигании древесины в частном секторе, в основном, владельцами жилья в сельских районах.

Зола, получаемая в промышленном секторе или на предприятиях районного теплоснабжения, обычно легкодоступна и может использоваться в большом объеме. В частном секторе (в домохозяйствах) древесную золу получают в малых количествах с большим разбросом точек ее производства, поэтому ее доступность невысока.

### **6.2 Обработка, транспортировка и внесение золы – шведский подход**

Не рекомендуется использовать сухую золу без предварительной обработки. Помимо таких влияющих факторов, как соли и высокий уровень pH при погрузке-выгрузке и внесении золы в почву могут возникать серьезные проблемы пылеобразования. К тому же, зола обладает сильными коррозионными свойствами [21].

Поэтому до внесения древесной золы необходимо обеспечить ее стабилизацию. Стабилизация должна облегчить погрузку-выгрузку, транспортировку и внесение в почву. Она также должна быть направлена на обеспечение требуемых щелочных свойств переработанного материала. Медленный процесс выделения веществ из стабилизированной золы исключает резкое изменение уровня pH и содержания соли в почве. В некоторых случаях золу следует повторно сжигать, чтобы уменьшить содержание несгоревшего углерода. Кроме того, вероятно, можно уменьшить содержание тяжелых металлов в золе.

С целью стабилизации золы в неё добавляют воду, которая способствует медленной реакции с двуокисью углерода в воздухе. При этом меняется ее химический состав, образуя гораздо менее растворимую форму. После смешивания с водой происходит агломерация золы. Были проведены исследования для изучения преимущественно трех методов агломерации золы после ее смешивания с водой – самоотверждение, гранулирование и таблетирование.

Самоотверждение представляет собой кондиционирование золы с ее последующим уплотнением. Этот простой метод успешно используется для обработки различных видов золы с содержанием несгоревшего углерода ниже 10%. Зола необходимо хранить в течение нескольких недель или месяцев, чтобы обеспечить достаточное уплотнение. Зола, получаемая при сжигании торфа и древесины, обладает худшими свойствами самоотверждения по сравнению с чисто древесной золой. Метод самоотверждения не столь эффективен. Недостатком его является потребность в организации больших площадок для хранения. Иногда получается слишком большая фракция мелких частиц в зольном продукте. Не всегда можно обеспечить достаточный контроль за выщелачиванием. Основное преимущество – простота и низкие затраты.

Увлажненную золу также можно гранулировать в роторном барабане. Этот процесс может быть полностью автоматизированным, однако при этом содержание несгоревшего углерода не должно превышать 10%. Основным преимуществом гранулирования является хороший контроль за качеством конечного продукта (малая фракция мелких частиц и низкая растворимость). Недостатком метода являются высокие затраты по сравнению с самоотверждением.

Был также опробован метод таблетирования путем пропускания влажной золы через матрицу. Этот метод меньше зависит от содержания несгоревшего углерода в золе, однако при этом отмечается высокое потребление энергии, оборудование подвергается интенсивной коррозии, а матрица засоряется.

В Швеции древесную золу в основном получают в холодный период года. Некоторое время её приходится хранить на котельной установке, в отвердевшем виде или в виде сухой золы, прежде чем можно будет внести в почву в летнее время. При хранении требуются некоторые меры защиты от воздействия снега и дождя.

Отвердевшую золу можно перевозить в лес в грузовиках-самосвалах. Можно использовать и другие системы транспортировки с применением контейнеров и больших мешков. Агломерированную золу можно вносить, используя вертолеты, лесные трактора, специальные автомобили или даже лошадей при небольших объёмах.

Энергия, необходимая для переработки, транспортировки и внесения золы, составляет примерно 0,3% от количества энергии в топливе, из которого получают золу [22].

Ответственность за переработку золы не определена. Одним из возможных вариантов является ответственность производителя за переработку и качество золы, в то время как владелец леса или поставщик топлива отвечают за правильное внесение золы на соответствующих участках и в нужное время.

### 6.3 Экологические аспекты

В идеальном случае переработка древесной золы и ее внесение в лесную почву должны проводиться таким образом, чтобы использовать все необходимые полезные свойства и в то же время снизить отрицательное воздействие на фауну, наземную растительность и поверхностные воды. Неотвержденная зола относительно быстро растворяется, влияя на состояние почвы и на некоторые виды организмов, в то время как отвержденная и/или гранулированная зола в целом обладает меньшей растворимостью и замедленным воздействием. В принципе следует избегать использования неотвержденной золы, особенно в больших количествах, на вырубках или площадках с чувствительной растительностью. Однако при внесении хорошо стабилизированной золы в умеренных количествах (3 тонны на га) отрицательного экологического воздействия фактически не наблюдалось.

Древесную золу можно вносить в лесную почву с хорошим дренажем и в облесенную торфяную почву. В минеральных почвах с хорошим дренажем азот обычно является питательным веществом, сдерживающим рост деревьев, при этом внесение удобрений без содержания азота не будет оказывать воздействия на рост леса. На таких почвах внесение золы не преследует стимулирования роста леса, а лишь является методом сохранения плодородия почвы. Общая цель внесения золы в почву состоит в поддержании питательного статуса в долгосрочном плане. В некоторых случаях, в частности, в сильно кислых почвах на юге Швеции, оно производится для улучшения состояния почвы. На облесенных дренируемых торфяных почвах ситуация несколько иная. В таких лесах часто отмечается нехватка фосфора и калия, то есть внесение древесной золы значительно стимулирует процессы роста. Фактически лесное хозяйство на торфяниках зачастую является неустойчивым без внесения питательных веществ, даже если не проводится уборка отходов лесозаготовки.

Полевые эксперименты показали, что концентрация в почве многих питательных веществ, особенно калия, магния и фосфора, обычно повышается после внесения древесной золы. Отвержденная зола с замедленной растворимостью умеренно увеличивает уровень pH, в то время как pH почвы может увеличиться на несколько единиц, при внесении значительной дозы неотвержденной золы (более 5 тонн на га).

Следует отметить, что повышение уровня pH может стимулировать активность микроорганизмов в почве, а также усилить процесс образования нитратов. Нитраты, которые образуются в результате микробного окисления аммония, находятся в почве в подвижном состоянии и в случае выщелачивания могут вызвать эвтрофикацию поверхностных вод. Таким образом, при внесении золы в почву на участках с высоким содержанием азота важно использовать умеренную дозу хорошо отвержденного продукта с низкой скоростью растворения. Кроме того, пока не будут проведены дополнительные исследования, не рекомендуется вносить золу на свежих вырубках, поскольку вскоре после вырубki часто наблюдается высокое содержание неорганического азота и повышение pH. Это создает идеальные условия для образования азота. Однако внесение стабилизированной золы в почву зрелых лесов или на вырубках в течение первых лет после валки леса, вероятно, не повышает концентрацию нитратов в грунтовых водах.

Некоторые экспериментальные результаты указывают на то, что уборка отходов лесозаготовки после вырубki может снижать содержание азота и приводить к выщелачиванию нитратов по

сравнению с традиционной лесозаготовкой. Таким образом, чистый эффект заготовки биотоплива в сочетании с переработкой и внесением хорошо отвержденной древесной золы может обеспечить снижение риска выщелачивания азота из лесной почвы [23].

Внесение неотвержденной или отвержденной древесной золы с высоким содержанием мелких частиц таит в себе определенный риск воздействия на растительность. Чувствительные растения, особенно мхи и лишайники, могут быстро повреждаться вследствие увеличения уровня pH и концентрации солей. Повышенные уровни неорганического азота могут вызвать изменения в растительном покрове. Отвержденная и измельченная древесная зола оказывает менее заметное воздействие, но, как показали наблюдения, большая фракция мелких частиц оказывает временное влияние на некоторые мхи. С другой стороны, внесение гранулированной золы в соответствующих дозах не влияет существенным образом на растительность [24].

Согласно рекомендаций Шведского агентства защиты окружающей среды и Лесного совета, древесную золу следует возвращать на лесные участки в количестве, примерно соответствующем содержанию золы в собранной биомассе [25]. Это позволяет избежать накопления тяжелых металлов в почве, если зола не была очищена. Важно использовать «чистое» древесное топливо, если планируется возврат золы в лес.

Существует опасение по поводу того, что тяжелые металлы, присутствующие в золе, могут оказывать влияние на экосистему, особенно на ягоды и грибы. Процесс выделения тяжелых металлов из хорошо отвержденной и гранулированной золы протекает медленно, со скоростью, отмечаемой при разложении иглы хвой. Большинство соединений тяжелых металлов имеют низкую растворимость при нормальном значении pH лесной почвы, что исключает их избыточное поглощение растительностью и грибами. Однако соединения кадмия имеют большую растворимость по сравнению с другими тяжелыми металлами, следовательно, воздействию кадмия уделялось особое внимание.

Наблюдения показали, что содержание тяжелых металлов в грибах и ягодах, как правило, увеличивается в течение нескольких (2-10) лет после внесения золы (1-10 тонн на га), однако в целом этот эффект был незначительным и меньше естественного колебания между видами и площадками. Было отмечено, что после внесения гранулированной золы в грибах и ягодах наблюдалось отсутствие тяжелых металлов или очень умеренное повышение уровня их содержания. Даже внесение неуплотненной и неотвержденной золы увеличивало такое влияние незначительно, за одним исключением, когда содержание кадмия значительно увеличилось в одном виде *Cortinarius*.

Переработку древесной золы можно рассматривать как обязательное условие для устойчивого использования лесного топлива. Чистая зола, получаемая при сжигании биотоплива, может перерабатываться, не нарушая экологии, при условии, что такая зола является хорошо отвержденной и вносится в почву в дозах, соответствующих количеству собранных лесосечных отходов.

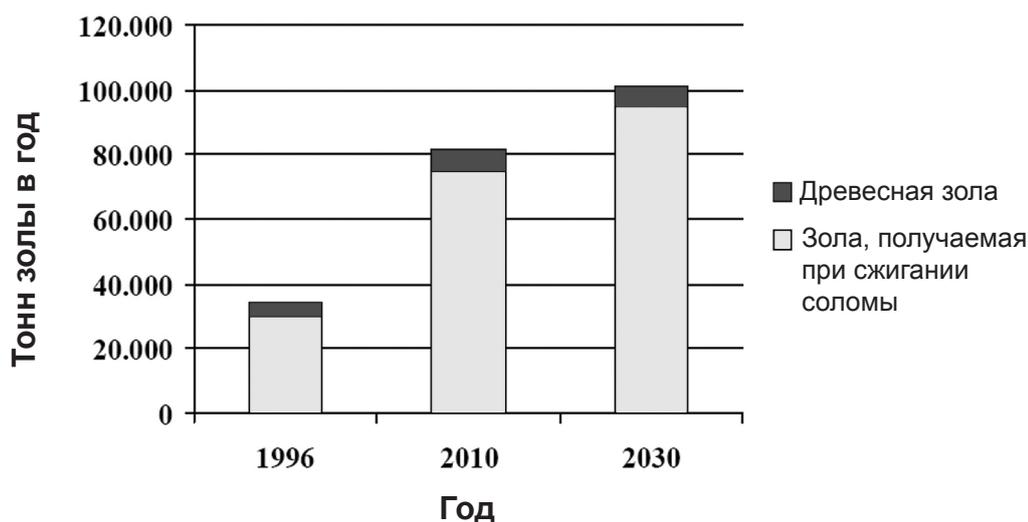
Фракция мелких частиц в золе должна быть довольно низкой. Зола можно вносить в лесонасаждения, а также в молодые посадки.

## 7 Использование золы, получаемой при сжигании биомассы, в Дании

### 7.1 Нынешняя ситуация/энергетическая политика Дании

В национальном плане Дании «Энергия 21» отмечается значительное увеличение потребления биомассы для выработки энергии. Следовательно, у производителей энергии, использующих биомассу в качестве топлива, в конечном итоге будет образовываться большое количество золы, получаемой при её сжигании. К 2030 году, после завершения реализации плана «Энергия 21», ожидается, что в год будет образовываться 100 000 тонн золы, получаемой при сжигании биомассы. Такая зола содержит как ценные питательные вещества, так и экологически опасные тяжелые металлы и органические соединения, напр., полициклические ароматические углеводы (ПАУ). Если золу, получаемую при сжигании биомассы, не вносить в пахотные земли, то необходимо использовать искусственные удобрения, а золу свозить на свалки. Такое решение нежелательно с экономической и экологической точки зрения. Использование золы, получаемой при сжигании биомассы, на сельскохозяйственных полях будет единственным эффективным решением, если делать это с учётом экологических рисков.

Солома и древесина обычно дают соответственно 3-5% и 0,5-2% золы. Как упоминалось выше, согласно плану «Энергия 21», интенсивное использование биомассы для выработки энергии, безусловно, приведет к значительному увеличению производства золы. Зола, получаемая в малых котельных, обычно вносится на сельскохозяйственные поля или используется в частных садах и огородах. Для сельскохозяйственного использования золы, получаемой на крупных котельных сетях районного теплоснабжения, работающих на соломе и древесине, требуется разрешение местного совета. Количество такой золы будет расти особенно быстрыми темпами (см. рисунок 2).



**Рисунок 2.** Ожидаемые объемы получения золы на ТЭЦ и котельных сетях районного теплоснабжения, работающих на соломе и древесине.

Примечания: Данные взяты из источника [21].

## 7.2 Законодательство Дании, касающееся использования золы, получаемой при сжигании биомассы

Для сельскохозяйственного использования золы требуется разрешение местного совета. В этом случае использование золы регулируется Постановлением 823 Департамента защиты окружающей среды и энергетики от 16 сентября 1996 года, которое определяет правила использования отходов в сельскохозяйственных целях. Согласно этому документу, содержание тяжелых металлов в золе не должно превышать предельных значений, приведённых в таблице 11.

В то же время Датское агентство защиты окружающей среды имеет право делать исключения. Содержание тяжелых металлов в золе может рассчитываться по сухой массе золы или же по содержанию в ней фосфора.

**Таблица 11.** Предельное содержание тяжелых металлов в золе, используемой в сельском хозяйстве.

Тяжелые металлы	Действующее предельное значение 01.10.1996 – 30.06.2000		Действующее предельное значение 01.07.2000	
	мг / кг по сухой массе	мг / кг по общему фосфору	мг / кг по сухой массе	мг / кг по сухой массе
Кадмий	0,8	200	0,4	100
Ртуть	0,8	200	0,8	200
Свинец	120	10 000	120	10 000
Никель	30	2500	30	2500
Хром	100		100	
Цинк	4000		4000	
Медь	1000		1000	

Постановление 823 от 16 сентября 1996 года первоначально предусматривало регулирование процессов переработки жидкого шлама, компоста и, следовательно, не очень подходило для регулирования использования золы, получаемой при сжигании биомассы. Помимо норм для тяжелых металлов, в этом Постановлении указаны предельные значения для других продуктов, оказывающих потенциально вредное воздействие на окружающую среду, включая полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и другие органические соединения (таблица 11).

Если зола, получаемая при сжигании биомассы, не отвечает требованиям этого Постановления, то её нельзя использовать в качестве удобрения, и следует вывозить на свалку.

На практике, как показано в таблице 12, концентрация кадмия и в некоторой мере свинца может превышать предельное значение, указанное в Постановлении 823. До настоящего момента обычно делались исключения и золу, как правило, разрешалось использовать в качестве удобрения. Однако по мере увеличения объемов золы, получаемой при сжигании биомассы, такое решение нельзя признать эффективным.

Очевидным решением является фракционирование золы, получаемой при сжигании биомассы, для получения 1) менее загрязненной зольной фракции, которую можно использовать на сельскохозяйственных полях без экологического риска, и 2) меньшей по объему, но более загрязненной фракции, которую следует вывозить на свалку.

**Таблица 12.** Содержание питательных веществ и тяжелых металлов в золе, получаемой в котельных сетях районного теплоснабжения, работающих на древесине (9 установок) и соломе (26 установок).

	Древесная зола			Зола после сжигания соломы		
	Среднее значение	Отклонение Квантиль 25-75%	Кол-во наблюдений	Среднее значение	Отклонение Квантиль 25-75%	Кол-во наблюдений
<b>Питательные вещества % по сухой массе</b>						
Общий азот	0,1	<0,1-0,3	11	0,09	0,05-0,14	21
Общий фосфор	1	0,8-1,6	14	1	0,67-1,4	36
Общий калий	5	2,8-7	6	11	6,7-20	10
<b>Тяжелые металлы, мг/кг по сухому весу</b>						
Кадмий	4	0,8-9,7	20	2	<1-3,8	41
Ртуть	<0,07	<0,05-0,4	18	0,1	<0,1-0,3	36
Свинец	40	8-75	18	9	<8-22	36
Никель	20	18-32	18	5	<5-12	36
Хром	20	10-74	10	2	1-5	5
Цинк	240	91-880	9	140	96-460	6
Медь	80	49-185	10	30	23-125	9

Примечания: Данные взяты из источника [21].

Биомасса не только содержит опасные тяжелые металлы, но также значительное количество ценных растительных питательных веществ (см. таблицу 12). Если зола, получаемая при сжигании биомассы, не вносится в почву, на сельскохозяйственных полях будет ощущаться нехватка питательных веществ. В таком случае необходимо применять искусственные удобрения. Несмотря на то что концентрация питательных веществ в золе намного ниже, чем в искусственных удобрениях, к 2030 году с золой, получаемой при сжигании биомассы будет внесено в почву примерно 100 тонн азота, 1000 тонн фосфора и 10 000 тонн калия.

Тяжелые металлы попадают в сельскохозяйственную почву различными путями. Одним из основных является внесение искусственных удобрений. По этой причине общее уменьшение объема вносимых искусственных удобрений позволит снизить нагрузку со стороны тяжелых металлов. Если солома

не используется для выращивания скота или для получения энергии, она обычно запахивается в почву непосредственно после уборки урожая. Поскольку в соломе содержится такое же (или даже большее) количество тяжелых металлов, чем затем в золе, нагрузка со стороны тяжелых металлов на почву не будет существенно меняться в зависимости от того, вносится ли солома в почву сразу же или после ее сжигания в виде золы.

По этой причине в скором времени появится новое Постановление, касающееся использования золы, получаемой при сжигании биомассы, в сельском хозяйстве. Это новое Постановление будет основываться на «принципе кругооборота», что означает, при определенных условиях, возможность внесения золы, содержащей то же количество тяжелых металлов, которое было поглощено в процессе роста. Это позволит устранить законодательное препятствие на пути увеличения объема выработки энергии с использованием биомассы и позволит добиться в этой области значительного прогресса.

## Литература

1. OBERNBERGER, I., 1997: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente, book series „Thermal Biomass Utilization“. Vol. 1, BIOS (ed.), Graz, Austria, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Austria, ISBN 3-7041-0241-5.
2. LUNDBORG, A., 1998: Ecological and economical evaluation of biomass ash utilization – the Swedish approach, in: Ashes and particulate emissions from biomass combustion, Series Thermal Biomass Utilization. Vol. 3, BIOS (ed.), Graz, Austria, dbv-Verlag, ISBN 3-7041-0254-7.
3. Friedlander S.K. (1977): Smoke, Dust and Haze, ISBN: 0-19-512999-7, John Wiley and Sons, New York, USA.
4. Brunner Thomas, JOLLER Markus, Obernberger Ingwald, 2004: Aerosol formation in fixed-bed biomass furnaces – results from measurements and modeling. To be published in: Proc. of the Internat. Conf. Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, Sept. 2004, Canada.
5. OBERNBERGER, I., BIEDERMANN, F., and KOHLBACH, W., 1995: FRACTIO – Fraktionierte Schwermetallabscheidung in Biomasseheizwerken, annual report, Institute of Chemical Engineering (ed.), Technical University, Graz, Austria.
6. OBERNBERGER, I., WIDMANN, W., WURST, F., and WORGETTER, M., 1995: Beurteilung der Umweltverträglichkeit des Einsatzes von Einjahresganzflanzern und Stroh zur Fernwärmeerzeugung, annual report for the research project, Institute of Chemical Engineering (ed.), Technical University, Graz, Austria.
7. RUCKENBAUER, P., OBERNBERGER, I., and HOLZNER, H., 1996: Erforschung der Verwendungsmöglichkeiten von Aschen aus Hackgut- und Rindenfeuerungen, final report of phase 2 of a research project of the same name, Institute for Plant Production and Plant Breeding (ed.), BOKU Wien, Vienna, Austria.
8. OBERNBERGER, I., POLT, P., and PANHOLZER, F., 1995: Charakterisierung von Holzrasche aus Biomasseheizwerken, Teil II: Auftretende Verunreinigungen, Schutt- und Teilchendichten, Korngrößen und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Aschee-Fractionen; In: Umweltwissenschaften und

---

Schadstoff-Forschung – Zeitschrift für Umweltchemie und Okotoxikologie, Heft 1 (1995).

9. OBERNBERGER, I., 1996: Prüfung, Beurteilung und Optimierung des Einsatzes von rotierenden Partikelabscheidern für Biomassefeuerungen, Forschungsbericht I-B2-1997, Ingenieurbüro BIOS (Hrsg.), Graz, Austria.
10. TOBLER, H., and NOGER, N., 1993: Brennstoff und Holzverbrennungsrückstände von Altholzfeuerungen: 1. Teilbericht zum Projekt HARVE, EMPA St. Gallen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (ed.), Bern, Switzerland.
11. NOGER, D., FELBER, H., and FLETSCHER, E., 1995: Holzasche und Rückstände, deren Verwertung oder Entsorgung, draft final report for the project HARVE, EMPA St. Gallen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (ed.), Bern, Switzerland.
12. NOGER, D., FELBER, H., and FLETSCHER, E., 1994: Zusatzanalysen zum Projekt HARVE, research report No. 22'032 C, EMPA St. Gallen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (ed.), Bern, Switzerland.
13. SCHEFFER/SCHLACHTSCHABEL, 1992: Lehrbuch der Bodenkunde, 13. edition, ENKE Verlag Stuttgart (Ed.), Germany.
14. STEIERMARKISCHE LANDESREGIERUNG, 1991: Steiermarkischer Bodenschutzbericht 1991: State Government of Styria (ed.), Graz, Austria.
15. Biedermann, F., Obernberger I., 1998: Fractionated heavy metal separation in biomass combustion plants – possibilities, technology, experiences and new approaches, In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Bioenergy Conference, June 1998, Würzburg, Germany, C.A.R.M.E.N. (ed.), Rimpfing, Germany, 1998, pp. 235-241.
16. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1997: Der sachgerechte Einsatz von Pflanzenaschen im Wald, guidelines: Ministry for Agriculture and Forestry (ed.), Vienna, Austria.
17. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1998: Der sachgerechte Einsatz von Pflanzenaschen im Acker- und Grünland, Richtlinie: Ministry for Agriculture and Forestry (ed.), Vienna, Austria.

18. HOLZNER, H, and RUCKENBAUER, P., 1994: Pflanzenbauliche Aspekte einer Holz-ascheausbringung auf Acker- und Grünland; In: Proceedings to the international symposium „Sekundärrohstoff Holzasche“, Sept. 1994, Graz; Institute of Chemical Engineering (ed.), Technical University, Graz, Austria.
19. HOLZNER, H, and RUCKENBAUER, P., 1994: Pflanzenbauliche Aspekte einer Holz-ascheausbringung auf Acker- und Grünland; In: Proceedings to the international symposium „Sekundärrohstoff Holzasche“, Sept. 1994, Graz; Institute of Chemical Engineering (ed.), Technical University, Graz, Austria.
20. ANONYMOUS, (1998): Energy in Sweden, Swedish National Energy Administration, Stockholm, Sweden.
21. OBERNBERGER, I., 1998: Ashes and particulate emissions from biomass combustion, Formation, characterization, evaluation, treatment, Series Thermal Biomass Utilization, Vol. 3, BIOS (ed.), Graz, Austria, dbv-Verlag, ISBN 3-7041-0254-7.
22. BLUMER M., (1997): Energy efficiency in the bio-energy system, Vattenfall Project Bioenergy Report 1997/1, Stockholm, Sweden.
23. KELLNER, O., and WEIBULL H., 1998): Effects of wood ash on byophytes and lichens in a Swedish pine forest, Scan. J. For. Res. in press.
24. ANONYMOUS, (1994): Recycling of ash from biofuels, Swedish Environmental Protection Agency, SNV 91-620-9564-1/94.06, Stockholm, Sweden