

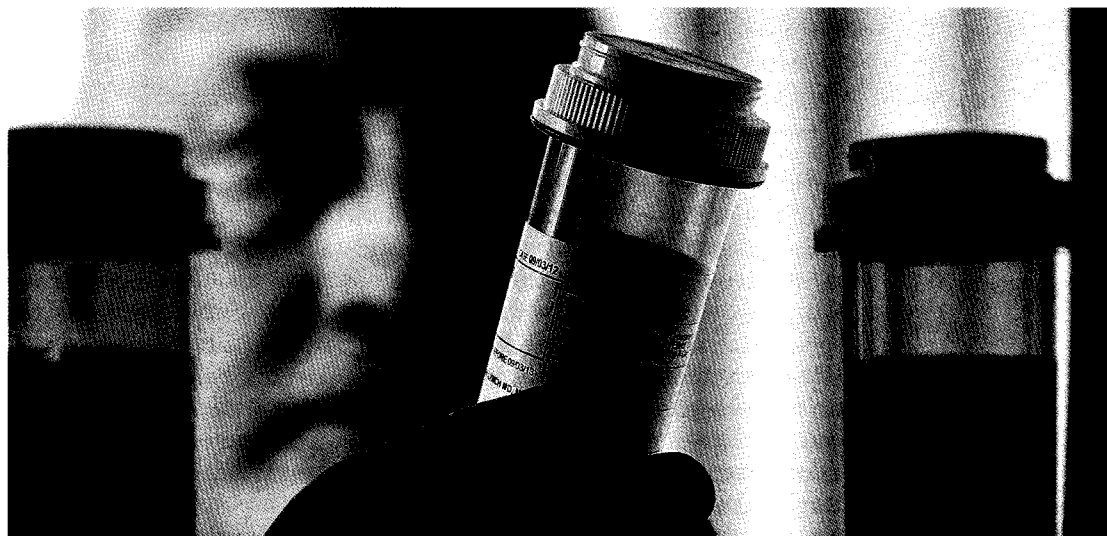
В.П. Голубев,

кандидат биологических наук, доцент кафедры «Экология» БНТУ

Т.С. Благовещенская,

*эксперт-аудитор по качеству в области сертификации СУОС,
международный ведущий аудитор EMS*

Применение инновационного метода СВЧ-излучения для пиролитического обезвреживания медицинских отходов



Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в 1979 г. отнесла отходы медицинской сферы к группе особо опасных и указала на необходимость создания специализированных служб по их уничтожению и переработке. Базельская конвенция в 1992 г. выделила 45 видов опасных отходов, список которых открывается клиническими отходами.



Лекарственные средства с истекшим сроком годности, а также флаконы, системы переливания, шприцы, загрязненные остатками цитостатических фармацевтических препаратов, требуют особо пристального внимания и уверенных гарантий того, что они не причинят вреда здоровью человека и не загрязнят окружающую среду.



СПРАВОЧНО

В соответствии с СанПиН 2.1.7.14-20-2005 «Правила обращения с медицинскими отходами»¹ (далее — СанПиН 2.1.7.14-20-2005) отходы, образующиеся в лечебно-профилактических организациях, по степени их эпидемической и токсикологической опасности разделяются на четыре группы:

- группа А — неопасные отходы (коммунальные).

Подгруппы:

- А1 — вторичные материальные ресурсы;
- А2 — органические отходы;
- А3 — другие неопасные отходы;

- группа Б — опасные отходы.

Подгруппы:

- Б1 — анатомические отходы;
- Б2 — острые предметы;
- Б3 — фармацевтические препараты, непригодные к использованию;
- Б4 — отходы, загрязненные кровью или биологическими жидкостями не инфицирующими;
- Б5 — инфицирующие отходы;
- Б6 — цитостатические фармацевтические препараты;

- группа В — чрезвычайно опасные отходы;

- группа Г — другие опасные отходы, подобные отходам производства.

Основную проблему при обращении с медицинскими отходами в Республике Беларусь представляет этап их обезвреживания. В настоящее время широко используется обезвреживание фармацевтических отходов и цитостатических фармацевтических препаратов термическими методами или инсинерацией (сжигание при высоких температурах). Однако в процессе сжигания образуются диоксины. Кроме того, высокой токсичностью обладает зола из инсинераторов. Поэтому ВОЗ считает разработку и внедрение новых технологий обезвреживания наиболее эффективным подходом в решении проблемы обезвреживания медицинских отходов. Использование традиционной технологии сжигания (инсинерации) ВОЗ считает возможным в тех странах, которые не имеют возможности использовать альтернативные, экологически безопасные методы обращения с отходами здравоохранения.

Альтернативные технологии обезвреживания должны обеспечивать:

- экологическую безопасность метода, включая выбросы в атмосферу;
- полную степень обезвреживания отходов, включая золу пиролиза;
- максимальное уменьшение объема отходов на выходе;
- безопасные условия работы обслуживающего персонала;
- минимальную стоимость оборудования и последующих эксплуатационных расходов.

¹ Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 20 октября 2005 г. № 147.



С целью разработки такой технологии и оборудования для обезвреживания медицинских отходов реализуется инновационный проект для государственных нужд «Разработка комплекса оборудования для обезвреживания фармацевтических отходов и цитостатических фармацевтических препаратов. Освоения производства комплекса оборудования». Целью проводимых научно-исследовательских и опытно-технологических работ является разработка инновационных, альтернативных инсинерации методов обезвреживания фармацевтических отходов (подгруппа Б3) и цитостатических фармацевтических препаратов (подгруппа Б6) на основе современных технологий высокотемпературного нагрева и стерилизации.

Предлагаемый способ обезвреживания состоит из двух стадий: на первой стадии осуществляется термический пиролиз медицинских отходов, содержащих цитостатические фармацевтические препараты, при температурах 550–600 °С с образованием пиролитических газов, которые обезвреживаются на второй стадии при температуре не менее 1200 °С.

На первой стадии в блоке микроволнового нагрева и стерилизации происходит пиролитическое разложение органических веществ в интервале температур 550–600 °С в зависимости от вида отходов. При такой температурной обработке происходит также полная стерилизация отходов. Оборудование не использует для пиролиза органическое топливо, что значительно уменьшает количество газообразных выбросов в атмосферу.

Процесс пиролиза осуществляется с помощью микроволновых излучателей и электронагревателей. Применение СВЧ-излучения увеличивает скорость пиролиза и, следовательно, сокращает время, необходимое для обезвреживания. Продукты пиролиза охлаждаются в специальном устройстве для сбора жидкой фракции пиролиза, которая может использоваться в качестве органического топлива. Пиролитические газы направляются на вторую стадию обработки.

На второй стадии в блоке высокотемпературного микроволнового нагрева проводится нагрев газообразных продуктов при температуре не менее 1200 °С. В отличие от метода инсинерации на этом этапе также не используется органическое топливо, что значительно сокращает выбросы в атмосферу.

В данной статье будут представлены результаты разработки экологически безопасной технологии пиролитического обезвреживания медицинских отходов (1-я стадия). Эта стадия является основной в процессе обезвреживания отходов методом микроволнового пиролиза, здесь протекают химические реакции расщепления молекул опасных для окружающей среды и человека веществ. Отработка безопасной технологии обезвреживания отходов на этой стадии является основой обеспечения экологической безопасности комплекса оборудования в целом. Учитывая многообразие факторов экологической безопасности, работа выполнялась в несколько этапов, каждый из которых был направлен на решение конкретной экологической задачи.

На первом этапе была исследована безопасность эксплуатации экспериментального образца комплекса оборудования для обслуживающего персонала. Результаты измерения интенсивности СВЧ-излучения в окружающей среде во время его работы представлены в табл. 1.

Снижение газообразных выбросов в процессе микроволнового пиролиза приводит к увеличению объема жидкой пиролизной фракции, которую используют в качестве печного топлива.



Таблица 1. Интенсивность СВЧ-излучения в окружающей среде во время работы экспериментального образца комплекса оборудования

Стадия эксперимента	Место измерения интенсивности СВЧ-излучения в окружающей среде, мкВт/см ²			
	Верхняя крышка	Боковой периметр корпуса	Нижняя крышка	Стык нижней крышки с боковым периметром корпуса
До включения комплекса оборудования	0	0	0	0
В момент включения комплекса оборудования	9	12	16	24
0,5 ч после начала эксперимента	8	14	19	26
1 ч после начала эксперимента	9	16	18	26
2 ч после начала эксперимента	8	15	19	25
3 ч после начала эксперимента	8	15	17	26
4 ч после начала эксперимента	9	16	17	27
После выключения комплекса оборудования	0	0	0	0

В соответствии с гигиеническими нормативами «Предельно допустимые уровни электромагнитных излучений радиочастотного диапазона при их воздействии на человека»² предельно допустимые уровни плотности потока электроэнергии при продолжительности воздействия в течение 8 ч составляют 25 мкВт/см². Учитывая, что процесс микроволнового пиролиза продолжается около 4 ч, подобные уровни СВЧ-излучения не представляют опасности для обслуживающего персонала.

Необходимо отметить, что с целью повышения безопасности работ экспериментальный образец комплекса оборудования изначально разрабатывался с выносным пультом управления.

Интенсивность электромагнитного излучения в месте установки пульта управления не превышала 1–8 мкВт/см², что меньше интенсивности электромагнитного излучения ряда моделей мобильных телефонов. В период работы экспериментального образца комплекса оборудования обслуживающий персонал находится только у пульта управления.

На следующем этапе было проведено исследование экологической безопасности газообразных выбросов в атмосферный воздух. В экспериментальный образец комплекса оборудования загружали от 10 до 13 кг отходов. Обезвреживание проводили при температурах около 600 °С. Время обработки варьировалось от 2 до 5 ч в зависимости от вида отходов.

Анализ выбросов в атмосферный воздух и воздух рабочей зоны проводили по Методике выполнения измерений содержания оксида углерода, диоксида азота, диоксида серы с помощью электронных газоанализаторов типа *Testo* (МВИ. МН 1936-3003)³.

Результаты измерений выбросов газообразных продуктов в атмосферный воздух представлены в табл. 2.

² Утверждены постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 5 марта 2015 г. № 23.

³ ГОСТ 17.2.6.02-86 «Охрана природы. Атмосфера. Газоанализаторы автоматические для контроля загрязнения атмосферы. Общие технические требования».



Таблица 2. Анализ газообразных выбросов в атмосферный воздух при проведении микроволнового пиролиза отходов

Время измерения	Наименование определяемого вредного вещества	Концентрация максимальная, мг/м ³	Максимальный фактический выброс, г/с
0,5 ч после начала эксперимента	Азота диоксид	2,4	0,0017
	Серы диоксид	3,3	0,0023
	Углерода оксид	11,8	0,0082
1,5 ч после начала эксперимента	Азота диоксид	0	0
	Серы диоксид	6,7	0,0047
	Углерода оксид	22,0	0,016
2 ч после начала эксперимента	Азота диоксид	2,4	0,0017
	Серы диоксид	6,7	0,0048
	Углерода оксид	17,6	0,013

Анализ газообразных выбросов показывает, что количество выбрасываемых веществ незначительное, в десятки раз меньше выбросов в атмосферу при использовании традиционного сжигания отходов. Полученные данные доказывают перспективность разработки технологии обезвреживания медицинских отходов с использованием микроволнового пиролиза. Разрабатываемый метод позволяет обеспечить уровень экологической безопасности, недостижимый для метода обезвреживания путем сжигания.

Для подтверждения экологической безопасности использования экспериментального комплекса оборудования и микроволновой технологии обезвреживания медицинских отходов было проведено сравнение фактических концентраций загрязняющих веществ с нормативно допустимыми концентрациями⁴. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение норм выбросов загрязняющих веществ при обезвреживании медицинских отходов с концентрациями, полученными в ходе инструментальных измерений

Наименование загрязняющего вещества	Нормативная концентрация, мг/м ³	Фактическая концентрация, мг/м ³
Азота диоксид	Не более 200	2,4
Серы диоксид	Не более 300	6,7
Углерода оксид	Не более 100	22,0

Как следует из результатов, представленных в табл. 3, при эксплуатации экспериментального образца комплекса оборудования для микроволнового обезвреживания медицинских отходов обеспечивается соблюдение норм выбросов загрязняющих веществ согласно приложению к Инструкции о правилах и методах обезвреживания отходов лекарственных средств, изделий медицинского назначения и медицинской техники⁵.

⁴ Какарека С. В. Источники и уровни выбросов твердых взвешенных частиц на территории Беларуси // Природные ресурсы. 2007. № 2. С. 20–32; СТБ ИСО 12141-2005 «Наименование. Стационарные источники выбросов. Определение массовой концентрации взвешенных частиц (пыли) при низких концентрациях. Гравиметрический метод»; постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 23 июня 2009 г. № 42 «Об утверждении Инструкции о порядке инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух»; постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 14 мая 2007 г. № 60 «Об утверждении правил эксплуатации газоочистных установок».

⁵ Утверждена постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 22 ноября 2002 г. № 81.



Снижение газообразных выбросов в процессе микроволнового пиролиза приводит к увеличению объема жидкой пиролизной фракции, анализ которой проводят на следующем этапе работ.

Обычно жидкую фракцию пиролиза используют в качестве печного топлива. С целью определения пригодности жидкой фракции микроволнового пиролиза медицинских отходов для использования в качестве печного топлива проводили соответствующий анализ. Результаты этого анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты анализа жидкой фракции продуктов микроволнового пиролиза медицинских отходов

Наименование показателя	Единица измерения	Результат испытаний
Теплота сгорания	кДж/кг	40780
	ккал/кг	9740
Вода	%	Отсутствует
Плотность	г/см ³	0,8390
Содержание серы	%	0,02

Из представленных в табл. 4 результатов анализа следует, что в процессе микроволнового пиролиза медицинских отходов, проведенного на экспериментальном образце комплекса оборудования, получено ценное жидкое топливо (побочный продукт при пиролизе), по своим свойствам соответствующее печному топливу. По теплоте сгорания данное топливо не уступает широко используемым видам мазута марок 40 и 100. Однако полученное в результате микроволнового пиролиза топливо имеет меньшую плотность (для мазута — 0,96 г/см³), что упрощает его хозяйственное использование.

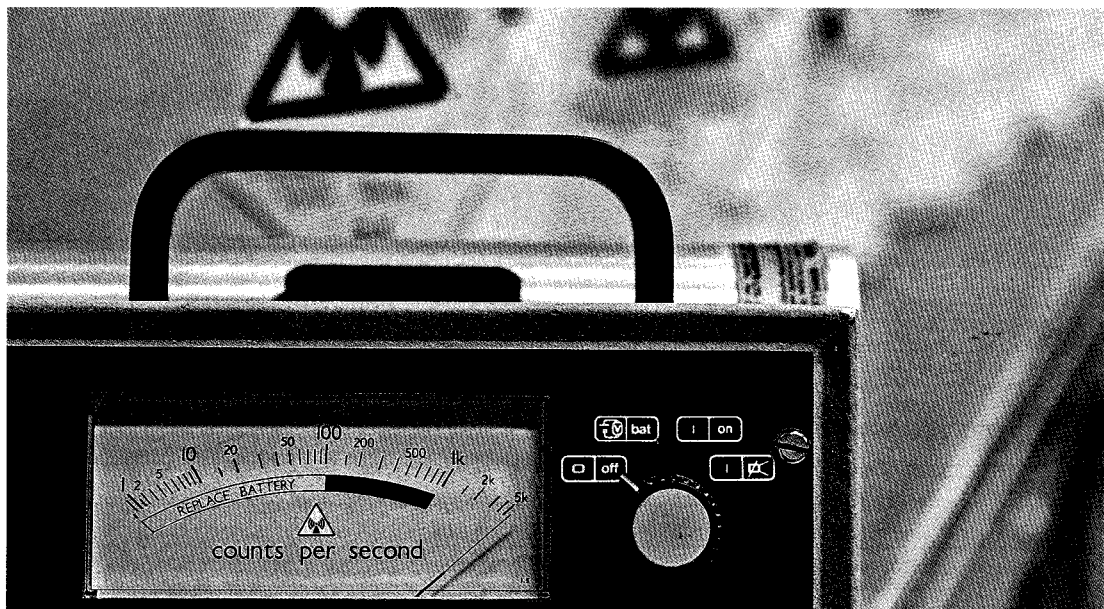
Разрабатываемое оборудование и технологию обезвреживания можно использовать для широкого спектра органических отходов.

Отсутствие воды в полученном топливе положительно скажется на увеличении срока службы котельного оборудования. Очень низкое содержание серы (в мазуте допускается 0,5 %) существенно повышает экологическую безопасность его использования.

Далее проводился сбор и отбор проб образующейся пиролитической золы для определения степени и класса опасности. В соответствии с Инструкцией о порядке установления степени опасности отходов производства и класса опасности опасных отходов производства⁷ установление степени опасности отходов производства и класса опасности опасных отходов производства необходимо для установления и предотвращения вредного воздействия опасных отходов на окружающую среду, здоровье граждан, имущество и для организации безопасного обращения с опасными отходами (хранения, захоронения, использования, обезвреживания и транспортировки). Установление степени опасности отходов производства и класса опасности опасных отходов производства осуществляется на основании перечня опасных для окружающей среды, здоровья граждан, имущества свойств отходов, необходимых для установления степени опасности отходов

⁶ ГОСТ 10585-99 «Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия».

⁷ Утверждена постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Министерства здравоохранения Республики Беларусь и Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 17 января 2008 г. № 3/13/2.



производства и класса опасности опасных отходов производства. Отбор проб отходов производства и определение опасных свойств отходов производятся по методикам, допущенным к применению в соответствии с законодательством об обеспечении единства измерений.

Целью проводимого анализа являлось исследование экологической токсичности золы, образующейся при обезвреживании фармацевтических отходов (подгруппа Б3) и цитостатических фармацевтических препаратов (подгруппа Б6) с применением комплекса оборудования, использующего современные микроволновые технологии высокотемпературного нагрева и стерилизации.

В качестве опытных образцов использовали золу, образующуюся в результате термического микроволнового пиролиза медицинских отходов при температуре около 600 °С. В качестве медицинских отходов использовали образцы отходов, полученные из онкологических больниц. Отходы включали стеклянные и пластмассовые флаконы, использованные системы переливания, шприцы, перевязочный материал и т.д.

Исследования проводили в соответствии со следующими техническими нормативными правовыми актами:

- Инструкция № 2.1.7.11-12-42-2004 «Определение токсичности отходов, содержащих органические вещества»⁸;
- Инструкция 2.1.7.11-12-3-2004 «Определение токсичности металлосодержащих отходов»⁹;
- Инструкция № 20-0102 «Инструкция по гигиенической оценке химических веществ, многокомпонентных смесей и полимерных материалов на *Tetrahymena pyriformis*»¹⁰.

⁸ Утверждена постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 31 декабря 2004 г. № 164.

⁹ Утверждена постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 25 февраля 2004 г. № 27.

¹⁰ Утверждена постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 11 июля 2002 г.



Результаты исследования экологической токсичности на инфузориях *Tetrahymena pyriformis* W представлены в табл. 5.

Таблица 5. Исследование на тест-объекте *Tetrahymena pyriformis* W экологической токсичности пиролизной золы, полученной при обезвреживании медицинских отходов.

Показатель токсичности	Результат	Класс токсичности
1. Образец № 1		
ЕД ₅₀ , мг/мл, лог. фаза	72,5±1,32	–
ЕД ₅₀ , мг/мл, стац. фаза	105,1±1,00	–
К _{кумулятивная}	1,45	4-й класс
МНД, мг/мл	10	4-й класс
ЛД ₅₀ /МНД	1,94×10 ¹	4-й класс
2. Образец № 2		
ЕД ₅₀ , мг/мл, лог. фаза	81,7±0,33	–
ЕД ₅₀ , мг/мл, стац. фаза	151,1±1,00	–
К _{кумулятивная}	1,85	4-й класс
МНД, мг/мл	10	4-й класс
ЛД ₅₀ /МНД	2,25×10 ¹	4-й класс

Вывод: по результатам изучения в хроническом эксперименте представленные образцы отходов относятся к 4-му классу токсичности (вещества малотоксичные).

За время проведения эксперимента по изучению мутагенной активности в микроядерном тесте гибель животных в группах опытной серии не отмечена; уровень клеток с микроядрами у животных опытной серии не превышает контрольные значения.

Следовательно, на основании результатов цитогенетического теста на объекте *L. Stagnalis* изученные образцы отходов цитостатических фармацевтических препаратов группы Б3 и Б6 не вызвали генотоксического эффекта в клетках в мантийной жидкости моллюсков.

При изучении фитотоксических свойств исследуемых образцов отходов установлено, что экстракт образца 1 ингибирует прорастание семян огурцов на 28,9% и не ингибирует прорастание семян редиса и овса, а экстракт образца 2 не ингибирует прорастание семян редиса, огурцов и овса.

В тесте на развитие корешков отмечено, что экстракт образца 2 ингибирует развитие корешков проростков огурцов на 35,0% и не ингибирует развитие корешков проростков редиса и овса, а экстракт образца 2 не ингибирует развитие корешков проростков огурцов, овса и редиса.

На основании результатов санитарно-химических исследований определена токсичность образцов расчетным методом. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Следовательно, индекс опасности исследуемых образцов отходов составляет 0,0193 и 0,0901 соответственно, что позволяет отнести их к 5-му классу.

Особый интерес представляют результаты исследований, полученных на белых крысах. Для проведения токсикологических и санитарно-химических исследований использовали вытяжки из образцов отходов (1–2).



Таблица 6. Данные расчета индекса опасности для вредных веществ в отходах, индекс опасности образцов отходов

Название компонента отхода	Концентрация C_i , мг/кг		Коэффициенты для определения опасности компонентов отхода				Индекс опасности отдельного компонента отхода K_i	
	образец 1	образец 2	X_i	Z_i	$Ig W_i$	W_i	образец 1	образец 2
Свинец	2,60	2,86	1,46	1,61	1,52	33,1	0,00785	0,0864
Формальдегид	1,26	0,66	2,30	2,73	2,73	541,2	0,0023	0,0012
Фенол	0,06	0,29	2,00	2,33	2,33	215,44	0,0002	0,0013
Дибутилфталат	1,95	0,27	2,00	2,33	2,33	215,44	0,0090	0,0012

При однократном внутрижелудочном введении белым крысам вытяжек из образцов отходов в объеме 3 мл/ 200 г гибель животных не отмечена. Клиническая картина интоксикации в первые 1–2 часа после введения характеризуется вялостью, снижением мышечного тонуса, взъерошенностью шерстного покрова, которые исчезают в течение 3–4 часов. В последующие 14 дней наблюдения поведение подопытных животных не отличалось от поведения контрольных, которые в эквивалентных количествах получали дистиллированную воду.


LD_{50} для белых крыс при однократном внутрижелудочном введении образцов составляет более 5000 мг/кг, что позволяет отнести исследуемые образцы к 4-му классу опасности (вещества малоопасные).

LD_{50} при однократном нанесении образцов на кожу белых крыс составляет более 2500 мг/кг, что позволяет отнести исследуемые образцы к 4-му классу опасности (вещества малоопасные).

Кумулятивные свойства изучены методом Ю.С.Кагана и В.В.Станкевича в условиях 30-суточного (по 5 раз в неделю) дозамонотонного введения вытяжек в желудок белых крыс (по 7 особей в группе) в дозе 1500 мг/кг, контрольные животные получали дистиллированную воду в эквивалентных количествах. Исследуемые образцы отходов не обладают кумулятивными свойствами, $K_{кум.} > 5$ (по смертельным эффектам).

В результате эксперимента у изучаемых препаратов установлено наличие тенденции к проявлению слабой сенсibiliзирующей способности.

На основании проведенных исследований и с учетом принципа интегральной оценки установлено, что изученные образцы отходов обезвреживания цитостатических фармацевтических препаратов группы Б6 и отходов обезвреживания фармацевтических препаратов группы Б3 относятся к 4-му классу токсичности (вещества малотоксичные)¹¹.

Не вызывает сомнений, что разрабатываемое оборудование и технологию обезвреживания можно использовать для широкого спектра органических отходов, поэтому авторы готовы к сотрудничеству в данной области. 

¹¹ Ильюкова И.И., Голубев В.П., Благовещенская Т.С., Карпович В.А. Исследование экологической токсичности золы, образующейся при микроволновом пиролизном обезвреживании медицинских отходов. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Технологические тенденции повышения промышленной экологической безопасности, охраны окружающей среды, рациональной и эффективной жизнедеятельности человека», 2013 г., том 2, с. 39–42.; Токсикологическая оценка отходов, образовавшихся при проведении испытаний комплекса оборудования для обезвреживания фармацевтических и цитостатических отходов, с. 206–211 (соавторы — Юркевич Е.С., Ильюкова И.И., Войтович А.М., Гомолко Т.Н., Деменкова Т.В., Красная С.Д., Карпович В.А., Голубев В.П.) Здоровье и окружающая среда: сб. науч. трудов / М-во здравоохран. Респ. Беларусь. Науч.-практ. центр гигиены; гл. ред. С.И. Сычик. — Минск: РНМБ, 2014. — Т. 1, вып. 24. — 300 с.