

# СВЧ-ЭНЕРГИЯ

НА СТРАЖЕ ЭКОЛОГИИ

В книге "Руководство по бесплатному путешествию по Галактике" Д.Адамс определил современный подход к проблемам окружающей среды как "область задач кого-то другого". Очень удобный подход, поскольку превращает проблемы экологии в как бы "несуществующие". И он не чужд нашей промышленности, в том числе и оборонной. Вопросы токсичности боевых и отравляющих веществ, переработки отходов, избыточного энергопотребления и прочие обсуждаются с середины 90-х годов. Но мало что делается. Все озабочены состоянием среды обитания, будущим детей, все понимают, что нужно что-то предпринять. Но по-прежнему это проблема кого-то другого. Поэтому несомненный интерес представляют работы, направленные на реальное решение экологических проблем не кем-нибудь, а нами самими. Такие, как представленный здесь специалистами ОАО "Тантал" (Саратов) экологически безопасный метод разрушения структур фосфорорганических отравляющих веществ (ФОВ) и детоксикации хлорсодержащих ядохимикатов с помощью СВЧ-энергии и остекловывания их твердых остатков после термического воздействия на реакционную массу, полученную при химической деструкции ФОВ.

Предложенный метод предусматривает воздействие СВЧ-энергии на помещенное в реактор отравляющее окружающую среду вещество (экоотоксикант) (рис. 1). Для возврата в реактор вещества, успевшего при нагревании в нем испариться до момента разложения, в установке предусмотрен теплообменник. Сбор сконденсированных жидких продуктов разложения осуществляется в сборнике отходов. Газообразные продукты разложения после очистки на фильтре выбрасываются в атмосферу.

Режимы работы и отладка схемы лабораторной установки были отработаны в ходе разложения трибутилфосфата (ТБФ), широко применяемого при производстве различных фосфорорганических ядохимикатов для сельского хозяйства. ТБФ, несмотря на свою малую токсичность, имеет функциональные группы, близкие к отравляющим веществам. По своим физическим свойствам он также близок ФОВ. Поэтому ТБФ и используется в качестве имитатора



Я.Старец, А.Кочергин,  
Г.Гундобин, Л.Рассудова

при отработке различных технологических процессов. Молекулярный вес ТБФ равен 266,3, точка кипения – 289°C, плотность и вязкость при 25°C – 0,976 г/см<sup>3</sup> и 3,1 сантипуаз, соответственно.

В реактор с 0,5 кг ТБФ подавалась СВЧ-энергия, и процесс разложения контролировался по температуре вещества в реакторе. Для определения полноты деструкции и состава продуктов разложения проводился хроматографический анализ проб, взятых из ре-

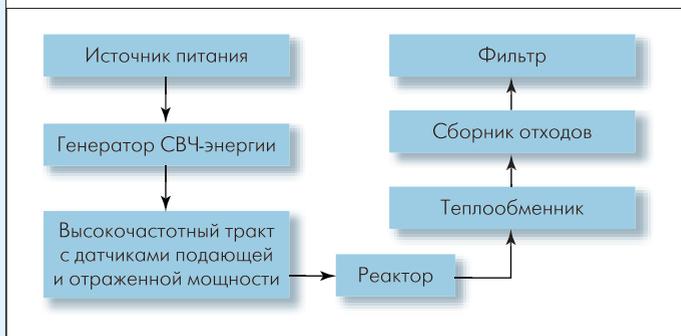


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки

## Представляем авторов статьи

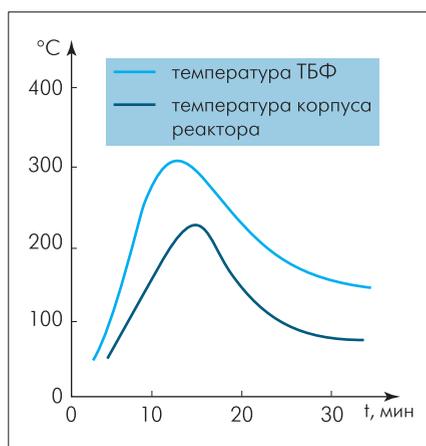
**СТАРЕЦ Яков Александрович.** Доктор технических наук, академик военных наук. Закончил Московский энергетический институт. Более 50 лет возглавлял Саратовское ОКБ "Тантал". Лауреат Государственной премии. Автор более 100 научных публикаций и изобретений в области электроники СВЧ.

**КОЧЕРГИН Александр Иванович.** Доктор технических наук. Закончил Воронежский технологический институт, инженер-механик химических производств. Специалист в области производства и уничтожения боевых отравляющих веществ. Автор более 80 научных публикаций и изобретений в области военной химии.

**ГУНДОБИН Герман Серафимович.** Кандидат технических наук. Закончил Саратовский государственный университет, инженер-радиофизик. Лауреат Государственной премии. Специалист в области разработок электронных СВЧ-приборов. Автор более 60 научных публикаций и изобретений в области электроники СВЧ.

**РАССУДОВА Лидия Владимировна.** Ведущий конструктор. Закончила Саратовский государственный университет, инженер-радиофизик. Ведущий специалист в области разработок электронных СВЧ-приборов. Автор более 10 научных работ и изобретений в области СВЧ-электронных приборов.

актора, теплообменника и сборника отходов. В ходе процесса варьировались падающая и отраженная мощности и одновременно фиксировалось изменение температуры во времени. Чувствительность методик и точность определения вещества находились в пределах 10–4%. Окончание процесса разложения устанавливалось по выходу кривой температуры на асимптотический участок.



**Рис.2. Энергетические параметры процесса**

Специфика применения СВЧ-энергии для разложения фосфорорганических экотоксикантов заключается в том, что энергия поглощается непосредственно во всем объеме помещенного в реактор экотоксиканта. Во время процесса стенки реактора нагреваются только от вещества, температура которого под воздействием СВЧ-энергии в течение первых 10 мин после включения СВЧ-генератора резко повышается до 300°C (рис.2). При этом испариться и осесть в теплообменнике успевает практически не более 1% вещества. По достижении температуры разложения происходит деструкция вещества с образованием газообразных и твердых продуктов, количество которых фактически равно его изначальному количеству, подлежащему уничтожению. Глубина разложения исходных веществ такова, что образующиеся продукты по степени экологической опасности сопоставимы с химическими веществами, используемыми в бытовой химии.

Процесс разложения всего объема (т.е. 0,5 кг) ТБФ длится около 30 мин. Анализ продуктов разложения, оставшихся в реакторе, теплообменнике, сборнике отходов и на фильтре, показал следующий материальный баланс процесса:

Вещество	Масса, кг	Содержание, %
Бутанол	0,053	10,6
Изобутан	0,076	15,2
Фосфорная кислота	0,019	3,9
Дибутиловый эфир	0,260	53,7
Продукты типа 2,5-диметилгексен	0,041	6,2
Непредельные углеводы	0,051	10
ТБФ	Следы	0,01–0,02
Всего	0,5	100

Важное достоинство метода — малое энергопотребление: для разложения 1 кг ТБФ достаточно 1,5–2,0 кВт·час. Испытания проводились при воздействии СВЧ-мощности ~120–150 Вт на частоте 2450 ГГц. Источник СВЧ-мощности — магнетронный генератор. Отработанные при разложении ТБФ режимы подачи СВЧ-энергии были использованы и для разложения хлорсодержащих экотоксикантов — протразина и фентиурама массой 15–30 г. Эти экотоксиканты — типичные представители применяемых в сельском хозяйстве пестицидов, накопленных в стране в огромном количестве, часто уже запрещенных к применению или с истекшим сроком хранения. Только в Саратовской области таких веществ около 1000 т.

Эксперименты показали полную идентичность динамики изменения температуры процесса кривой рис.2. Таким образом, предложенный метод воздействия СВЧ-энергией обеспечивает полное разложение фосфорорганических и хлорсодержащих экотоксикан-

тов. При этом он перспективен в экономическом плане, поскольку не приводит к увеличению реакционной массы, малоотходен и не требует больших энергозатрат.

Продуктами детоксикации ядохимикатов после воздействия СВЧ-энергии являются газовые отходы и твердый остаток. Помочь с решением проблемы избавления от твердого остатка вновь может воздействие СВЧ-энергией с целью его остекловывания. При СВЧ-облучении шихты стеклующейся массы с температурой стеклообразования 1075°C был получен твердый стеклообразный материал, схожий с глазурированной плиткой.

Таким образом, предложенный метод воздействия СВЧ-энергии на экотоксиканты экологически безопасен и весьма перспективен для разрушения большого спектра экотоксикантов и утилизации их твердых остатков методом остекловывания.

## Исследования "зеленой" технологии

дают положительные результаты

Группа исследователей Университета шт. Аризона разрабатывает экологически дружелюбные химические реагенты, пригодные для применения в полупроводниковом производстве и обеспечивающие малые энергозатраты при использовании. С учетом требуемых параметров окружающей среды исследователи сумели подобрать совершенно новые химические реагенты, которые позволили не только снизить неблагоприятные экологические эффекты, но и усовершенствовать технологию изготовления полупроводниковых приборов. В основе полученных решений — результаты изучения на молекулярном уровне свойств поверхности обрабатываемых полупроводниковых пластин. Эти исследования привели к разработке экологически "мягких" процессов обработки полупроводниковых пластин, позволили исключить выделение опасных продуктов химических реакций и отказаться от традиционных методов очистки пластин после обработки.

На основе данных изучения молекулярного взаимодействия химических реагентов и полупроводниковых пластин исследовательская группа предложила метод очистки в газовой среде, позволяющий не изымать пластины из рабочей камеры при проведении любых операций обработки. Разработанный процесс не только исключает загрязнение окружающей среды, но и позволяет сократить трудовые затраты и издержки при очистке, а также применять воду не самой высокой степени чистоты. В новом процессе используется "суперкритичный" диоксид углерода. Суперкритичная материя — вещество, находящееся в фазе, промежуточной между жидкой и твердой, — формируется в условиях сверхвысокого давления — до 70 кг/см<sup>2</sup> при температуре около 540°C. Такое псевдожидкое вещество характеризуется полным отсутствием поверхностного натяжения при взаимодействии с твердотельной поверхностью, что позволяет ему проникать в глубокие вытравленные окна на поверхности полупроводниковой пластины. Кроме того, благодаря очень низкой вязкости реагент способен растворить большое количество нежелательных "остатков" процесса обработки. Плотность псевдожидкости достаточна для растворения как жидких, так и твердотельных загрязняющих веществ. При снижении давления диоксид углерода вновь переходит в газовую фазу, а собранные им загрязняющие окружающую среду вещества осаждаются. По мнению исследователей, недорогой и нетоксичный процесс очистки в газовой среде весьма перспективен для применения в полупроводниковом производстве.

Сейчас исследовательская группа ищет новые химические композиции, пригодные для нанесения сверхтонких пленок нитридов металла, используемых в современной "медной" технологии для защиты пластин от проникновения в них атомов меди. Изучаются и другие материалы для формирования барьерных слоев, изолирующих затворы транзисторов СБИС.

Исследовательская группа Университета шт. Аризона входит в Технический исследовательский центр экологически дружелюбных процессов обработки полупроводниковых материалов. Финансовую поддержку центру оказывают Национальный научный фонд США и фирма Semiconductor Research. В программах центра участвуют представители Массачусетского технологического института, его Линкольнской лаборатории, Станфордского университета, Берклийского университета шт. Калифорния, Корнеллского университета, Университета шт. Мэриленд.

[www.eetimes.com/sbry/OEG20020520S0055](http://www.eetimes.com/sbry/OEG20020520S0055)