

## **Перспективы создания плазменных генераторов для утилизации конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Рассмотрены возможности применения плазменных технологий для утилизации элементов конструкций ЛА из композиционных материалов. С учетом особенностей объектов утилизации сформулированы требования к плазменным генераторам для этих целей. В качестве наиболее перспективных для применения обоснован выбор комбинированных плазмотронов с неохлаждаемыми коаксиальными электродами. Сформулированы задачи по выбору режимов газодинамической защиты термоэмиссионных полых катодов плазмотронов для утилизации конструкций ЛА из КМ.

**Ключевые слова:** утилизация конструкций ЛА, композиционные материалы, плазмотрон, полый катод, математическое моделирование, газодинамическая защита.

### **Введение**

Разработка и создание новых летательных аппаратов (ЛА) требует постоянного совершенствования, как в области аэродинамики, так и в области конструкции и технологии. Одной из основных тенденций развития авиационно-космической отрасли является все более широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ). Создание новых технологий на основе этих материалов открывает дорогу к совершенствованию ЛА.

Примером существенного повышения эксплуатационных свойств, а также улучшения несущей способности могут служить самолеты Boeing-787 и Airbus A380. Применение композиционных материалов позволило сократить расход топлива на 20 % по сравнению с эксплуатируемыми аналогами, количество вредных выбросов — на 20 %, затраты в расчете на пассажиромиллю сокращены на 10 %, прогнозируемый размер экономии затрат на техобслуживании — 30 %.

Жизненный цикл любого изделия состоит из трех этапов: производства, эксплуатации и утилизации. На каждом из них образуются отходы, состоящие как из металлов, так и из неметаллов. Однако если для металлических отходов технологии их повторного использования отработаны достаточно хорошо, задача создания эффективных и экологически безопасных технологий утилизации конструкций ЛА из композиционных материалов до настоящего времени не решена.

Так, например, в ракетостроении основная проблема утилизации конструктивных элементов из КМ связана с тем, что на утилизируемых конструкциях могут присутствовать остатки высокотоксичных ракетных топлив и продуктов их сгорания [1], что требует разработки специальных технологий, исключающих их попадание в окружающую среду.

Традиционные методы сжигания отходов для ее решения неприменимы, так как при таком способе утилизации КМ образуются крайне токсичные вещества. Одним из перспективных направлений в данной проблеме является применение плазменных технологий. Однако до настоящего времени использование

плазменных технологий для утилизации высокотоксичных веществ сталкивается с проблемами обеспечения надежности работы плазменных генераторов.

Поэтому целью настоящей работы является анализ современного состояния развития плазменных технологий утилизации конструкций ЛА из КМ, выработка требований и определение на их основе наиболее перспективных схем плазменных генераторов, предназначенных для использования в таких установках.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Активно развивающиеся отрасли промышленности, к которым относится авиапромышленность, базируются на принципах ускоренного обновления выпускаемой продукции и не только за счет ее модернизации, но и в результате разработки принципиально новых конструктивных решений, внедрения новых материалов и технологий. Существенное отличие боевой и гражданской авиации состоит в том, что военная техника морально устаревает значительно быстрее, чем гражданская. Не выработав свой летный ресурс, военный самолет или вертолет становится непригодным для выполнения боевых задач. Во время боевых действий авиационная техника использовалась до момента ее уничтожения. Гражданский самолет обычно используется до момента выработки его летного ресурса. В любом случае наступает момент, когда самолет или вертолет (гражданский или военный) использовать либо нерационально, либо просто опасно. Такую технику необходимо утилизировать.

Вопрос об утилизации композиционных материалов возникает уже на этапе производства изделия, так как всегда образуются обрезки, остатки связующего и армирующего материала непригодного для производства. Просто накапливать эти материалы и хранить не имеет смысла, необходимо их переработать, т.е. утилизировать. Вследствие специфичности КМ, методы их переработки весьма разнообразны, но вначале рассмотрим классификацию данных материалов.

Все конструкционные полимерные материалы, применяемые в изделиях АКТ можно разделить на две группы:

- термопласты (или термопластичные), как правило, это декоративные элементы (отделка салонов самолетов и т.п.);
- реактопласты (или терморреактивные) – силовые и конструктивные элементы.

Основными полимерными матрицами, которые используют в технике при изготовлении полимерных композиционных материалов, являются эпоксидные, фенолформальдегидные, кремнийорганические смолы, полиэтилен, полипропилен, полистирол, фторопласты, органическое стекло, полиамиды, полиимиды, поливинилхлорид. В качестве армирующих элементов применяют высокопрочные органические волокна, углеродные волокна, керамические, борные и карбидные волокна [2].

Трудность вторичной переработки реактопластов в том, что они мало способны к деполимеризации, не плавятся и не растворяются в органических растворителях, однако содержат некоторое количество не сшитого олигомера, что позволяет использовать их в качестве реакционно-способных наполнителей. Изделия из реактопластов утилизуются путем разрушения, дробления и классификации полученных материалов.

Для утилизации изделий из термопластов применяют следующие методы:

- захоронение;
- фото- и биодеструкция (для водорастворимых полимеров); биодеструкция осуществляется введением компонента, распад которого осуществляется под действием ультрафиолетового излучения или определенной кислотной среды, процесс происходит после определенного времени; фотодеструкция достигается введением специальных фотоактиваторов.
- использование микроорганизмов, перерабатывающих полимеры.
- переработка;
- сжигание.

Основным технологическим приемом при подготовке термопластов к утилизации является измельчение. Измельчение определяет объемную плотность, сыпучесть и размеры частиц вторичного материала. Существуют технологии измельчения с применением криогенной техники. Если поступающие на переработку изделия загрязнены, то перед переработкой их приходится очищать следующими методами: сухое удаление пыли; стирка; обработка растворителями (они должны обязательно проходить регенерацию); растворение полимеров. После отмывки пластмассы сушат: в развешенном слое; интенсивным перемешиванием; вакуумированием.

Системы сжигания различаются в зависимости от того, сжигаются ли чистые отходы (только пластмассы), или их смеси (разработаны специальные виды печей для сжигания отходов: с подом, вращающиеся, с циркулирующим потоком, с псевдоожижением, с распылением, с огнеупорными насадками).

При сжигании соединений образовывается сложная смесь газов, органических паров и макрочастиц волокна. Эти продукты сгорания представляют опасность для здоровья человека. При дыхании разные волокна с диаметрами от 3 мкм до 80 мкм могут проникнуть глубоко в легкие. Время задержки волокна в легком прежде всего зависит от размеров волокна. Волокна, меньшие чем 15 мкм долго очищаются клеточной деятельностью легких, однако более длинные волокна могут привести к патологическим эффектам.

Весьма перспективна термическая переработка КМ методом пиролиза; продукты пиролиза могут служить энергетическим топливом, а также сырьем для органического синтеза. Пиролиз проводят в вертикальных цилиндрических печах (ретортных). Нагрев обеспечивают с помощью электрической дуги, токов высокой частоты или применением твердых теплоносителей — расплавов солей, продуктов пиролиза твердого топлива (полукокс) и др. Пиролиз ведут при 300–900 °С в зависимости от требуемого состава газообразных продуктов.

В процессе пиролиза углеродосодержащих материалов неизбежно образуются смолы - различные соединения углерода, водорода или азота. Смолы формируются при температурах от 200 до 1250° С. Они подразделяются на первичные и вторичные смолы (рис. 1). Первичные формируются начиная с температуры 200° С, разрушение же их происходит при температурах выше 800° С. Вторичные смолы образуются при температуре 550°С и разрушаются при температурах свыше 1250° С.

Таким образом продукты пиролиза КМ, происходящего при температурах до 900° С неизбежно должны содержать вторичные смолы. Многие из этих веществ являются особо опасными канцерогенными соединениями [1].

Кроме того утилизация углепластиков на основе хлорсодержащих смол или деталей твердотопливных ракет с остатками хлорсодержащих топлив связана с

образованием диоксинов [3], а ряда элементов ракет с ЖРД – с высокой токсичностью используемых компонентов ракетных топлив [4].

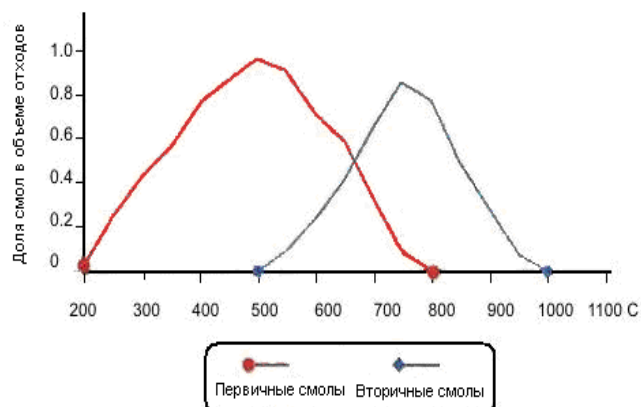


Рис. 1. Образование и разрушение смол при пиролизе

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующие методы переработки композиционных материалов характеризуются большим объемом подготовительных работ, образованием разнообразных особо токсичных соединений, которые представляют опасность для здоровья человека. Поэтому задача экологически чистой утилизации КМ является весьма актуальной.

Плазменные технологии позволяют существенно увеличить температуру пиролиза, вследствие чего эффективность переработки возрастет. Применение мощных плазмотронов также позволит сократить объемы подготовительных работ, так как в данном случае не требуется слишком мелкое дробление. Результатом такого высокотемпературного пиролиза будет являться синтез-газ, пригодный для дальнейшего применения и твердый остаток, так же пригодный для дальнейшего использования в качестве строительного материала.

Несмотря на такие преимущества плазменные, технологии имеют ограниченное применение. В качестве основных причин можно выделить недостаточный уровень ресурса и надежности разработанного к настоящему времени промышленного плазменного оборудования.

Плазменная утилизация объектов авиационно-космической техники имеет определенную специфику. Для технологий плазменной газификации муниципальных отходов, угля и биомассы характерны объемы переработки порядка десятков и сотен тонн материала в сутки. Это позволяет создавать стационарные производства, работающие в непрерывном режиме. Большие объемы переработки делают целесообразным совмещение процессов газификации и производства энергии из выработанного газа. Установки для очистки отходящих газов и воды, образующейся в ходе процесса, не имеют определяющих ограничений по размерам.

При плазменной переработке узлов ЛА из КМ ситуация иная. Объем переработки таких материалов может составлять величину порядка 0,1...1 т/сутки. Причем такая переработка носит аperiодический характер, что делает невозможной использование продуктов газификации для выработки электроэнергии. Кроме того, возможное наличие на объектах переработки высокотоксичных веществ может вызывать серьезные осложнения при перевозке утилизируемых изделий. Поэтому для этих случаев целесообразным является применение мобильных установок для плазменной утилизации. Это требует

создания высокоэффективных систем для плазменной газификации с высоким КПД теплопередачи и компактных систем газоочистки.

Исходя из изложенного выше, можно сформулировать требования к оборудованию плазменной утилизации деталей ЛА из КМ:

1. Нулевая эмиссия – исключение попадания опасных веществ в атмосферу.
2. Замкнутый цикл переработки.
3. Высокая надежность всех элементов оборудования.
4. Возможность реализации в мобильных установках.
5. Высокий КПД теплопередачи, компактность систем газификации и газоочистки.

С учетом сформулированных требований проанализируем возможности применения плазмотронов известных схем для задач утилизации элементов конструкций ЛА из КМ.

### **Возможности применения плазмотронов различных схем в задачах утилизации КМ**

Основой стабилизации и управления плазмой в плазмотронах являются газовые струи и потоки, сформированные особым образом. Поэтому способ газовой стабилизации - важный признак классификации плазмотронов.

На рис. 2 представлена классификационная схема плазмотронов атмосферного давления, на которой указаны основные признаки классификации, основные типы разрядных камер, способы стабилизации плазмы, фиксации длины дуги, уменьшения эрозии электродов и т.д.

ВЧ и СВЧ плазмотроны в наибольшей степени соответствуют требованиям обеспечения заданного состава атмосферы, однако при их использовании возникают трудности обеспечения необходимых скоростей истечения. Источник электропитания ВЧ-плазмотронов представляет собой высокочастотный генератор, в котором происходит преобразование тока промышленной частоты в ток высокой частоты, используемый для питания индуктора плазмотрона. Источники питания таких плазмотронов дорогостоящи и недостаточно надежны.

Плазменный нагрев на основе превращения энергии высокой частоты при современных сравнительно малых мощностях и низких коэффициентах полезного действия высокочастотных генераторов ограничивается по существу лишь применением для специальных лабораторных исследований, когда низкий коэффициент полезного действия передачи тепловой энергии не имеет решающего значения.

В электродуговых плазмотронах с охлаждаемыми электродами использованы практически все способы уменьшения эрозии электродов: раскрутка дуги совместным действием электромагнитных и аэродинамических сил, управлением осевым положением дуги [5]. Несмотря на это, их основным недостатком по-прежнему остается недостаточная надежность, связанная с трудно прогнозируемым прожиганием электродов дугой, что является для рассматриваемой задачи является недопустимым.

Так, например, плазмотроны Westinghouse разработаны в середине 80-х годов и успешно и достаточно широко применяются в металлургии, переработке отходов, химической промышленности, энергетике. Компания Westinghouse также занимается созданием мобильного комплекса для переработки отходов. Было предложено разместить плазменную систему внутри передвижного модуля, что с

успехом было проведено специалистами компании Westinghouse. Внутри стандартного грузового трейлера была смонтирована плазменная система вместе со всеми сопутствующими ей устройствами – источником тока, системой водообеспечения, системой управления процессом и т. д.

Новейшая плазменная система, расположенная внутри трейлера позволяет перерабатывать химические отходы с производительностью около 4 литров за минуту, с эффективностью разложения вредных компонентов 99,99999%. Предложенный мобильный комплекс обладает большим рядом преимуществ, но может перерабатывать только жидкие отходы производства.

С точки зрения обеспечения максимального КПД передачи энергии для плазменной утилизации КМ необходимо использовать плазмотроны комбинированного действия, где на начальном этапе для расплава шлака будет использоваться электродуговой плазмотрон со скрытой дугой постоянного тока, а на втором этапе утилизации плазмотрон с вынесенной дугой, где дуга будет замыкаться на расплаве.

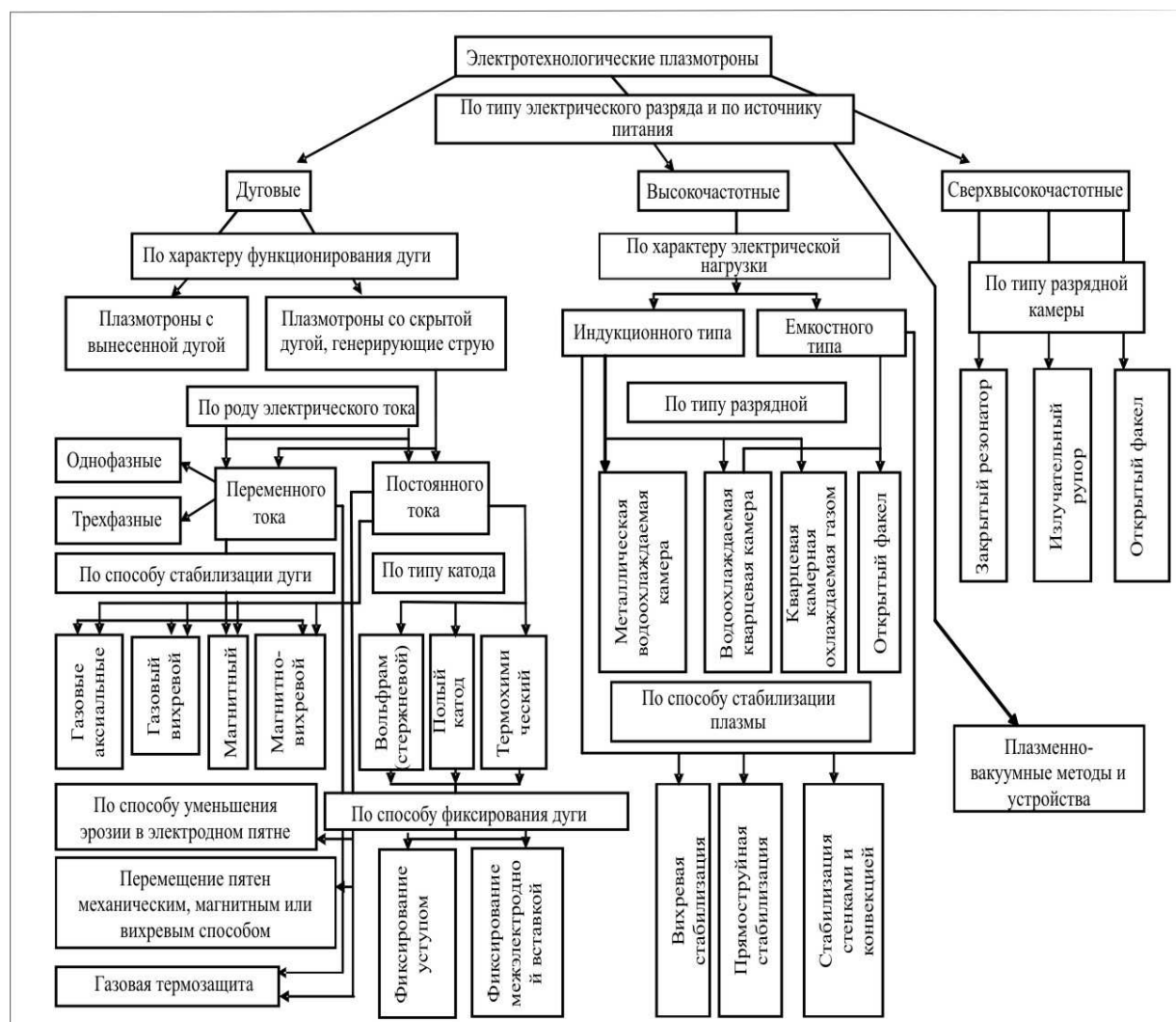


Рис. 2. Классификационная схема плазмотронов атмосферного давления

Фирмой Retech (США) разработано оборудование для плазменной утилизации опасных отходов. В качестве источника плазмы использована водоохлаждаемая плазменная горелка (рис. 3) комбинированного типа. Её особенностью является то, что она может работать как в пассивном (дуга горит между катодом 1 и соплом-анодом 2), так и в активном режиме (дуга горит между катодом и расплавом 3) [6, 7]. Такое решение обусловлено особенностью переработки шлаков, о которой уже было сказано выше – высоким сопротивлением, что требует применения источника питания с высоким рабочим напряжением.

При работе горелки в пассивном режиме происходит расплавление отходов в месте контакта с плазменной струей. Расплавленный шлак обладает достаточно хорошей электропроводностью. Поскольку дно печи имеет выступ напротив горелки, через довольно короткий промежуток времени расплав происходит замыкание цепи горелка–расплав–анодная плита. После этого горелка начинает работать в активном режиме, при котором нагрев материала происходит с большим КПД.

В работе [8] приведены данные испытаний установки фирмы при переработке загрязненной почвы, проведенных по заказу USEPA. В ходе испытаний установка несколько раз останавливалась из-за прожога сопла плазменной горелки паразитными дугами и попадания охлаждающей воды в печное пространство. Интервал времени между заменами горелок составлял от 60 до 100 часов, установка при этом останавливалась примерно на 3 часа.

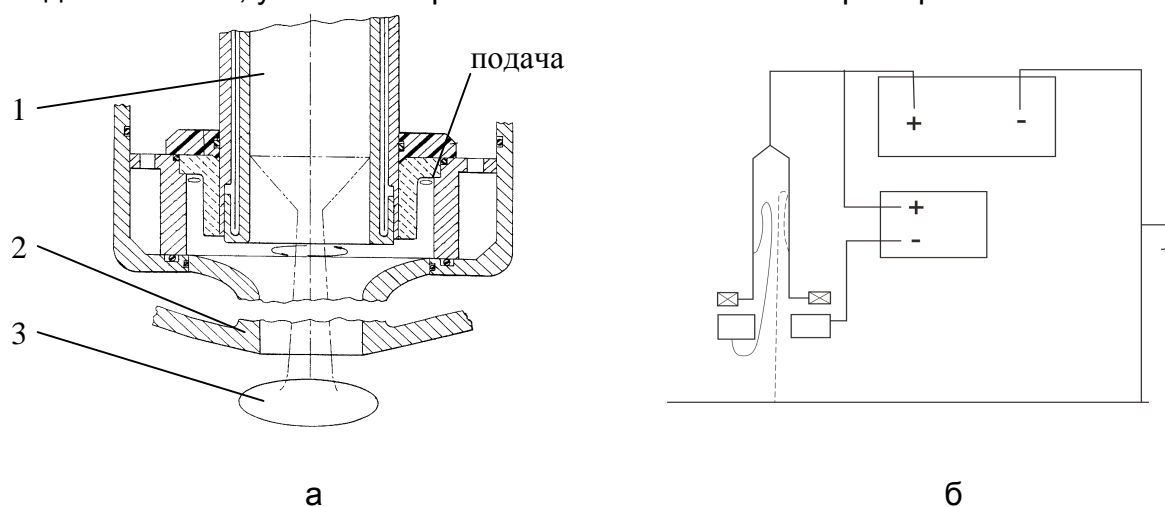


Рис. 3. Комбинированная плазменная горелка фирмы Retech:  
а – схема плазменной горелки; б – электрическая схема подключения

В ИЭС НАН Украины были созданы опытно - промышленные образцы сильноточных плазмотронов с плазменным катодом, созданы плазменные нагревательные комплексы мощностью до 6 МВт, которые эксплуатировались в составе оборудования для вакуумно-дугового переплава и внепечной обработки стали.

Плазмотрон ИЭС состоит из корпуса 1 с соплом, основного 2 и вспомогательного 3 электродов (рис. 4). Плазмообразующий газ подается в основной полый электрод и в зазор между полым электродом и соплом. Вспомогательная дуга постоянного тока горит между вспомогательным и основным электродами, а основная дуга – между основным электродом и

металлом. Недостатком базовой конструкции плазмотрона было то, что, несмотря на резкое повышение ресурса основного электрода, ресурс вспомогательного стержневого катода не превышал 200 часов.

Радикальное повышение ресурса возможно за счет замены стержневого катода на полый термоэмиссионный катод. Разработанные в последние годы в Национальном аэрокосмическом университете ХАИ плазмотроны имеют ресурс до 3000 часов [9]. Для этих катодов основным фактором, определяющим их работоспособность, является отравление эмиттера, вызванное химическим взаимодействием с кислородосодержащими газами.

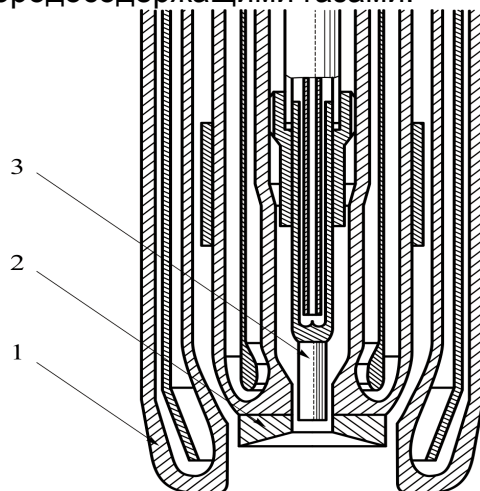


Рис. 4. Плазмотрон ИЭС НАН Украины

Обеспечение работоспособности таких катодов возможно за счет правильного выбора параметров газодинамической защиты потоком инертного газа. В работе [9] предложен метод выбора параметров газодинамической защиты полых термоэмиссионных катодов. Однако особенностью катодных узлов плазмотронов комбинированного типа является их работа вблизи экрана (поверхности расплава), что изменяет картину течения газов и может влиять на эффективность газодинамической защиты.

Еще одним фактором, оказывающим определяющее влияние на возможность образования паразитных дуг, является величина заглублиения катода в корпус катодного узла. Для ее уменьшения целесообразно применения секционированных катодных узлов с распределенной подачей защитного газа. Данные вопросы также не рассматривались в ранее выполненных работах.

Кроме того, выбор параметров газодинамической защиты по методике, приведенной в [9] предполагает использование результатов моделирования холодных продувок. В то же время, транспортные коэффициенты газов существенно зависят от температуры. Поэтому для обеспечения заданного уровня надежности работы плазмотронов необходимо разработать рекомендации по выбору параметров газодинамической защиты на основе уточненных моделей течения.

### Заключение

1. Сформулированы требования к плазмотронам для утилизации конструкций ЛА из КМ. С учетом этих требований проведен анализ возможности применения существующих плазмотронов различных схем. В качестве



перспективного варианта обоснован выбор электродуговых плазмотронов комбинированного типа с полым термокатодом.

2. Для выбора параметров режимов газодинамической защиты термокатодов в плазмотронах для утилизации конструкций ЛА из КМ сформулированы нерешенные задачи в области математического моделирования, к числу которых отнесены:

- учет влияния поверхности экрана на эффективность газодинамической защиты;
- разработка рекомендаций по выбору параметров газодинамической защиты для секционированных катодных узлов;
- учет влияния температурной зависимости транспортных коэффициентов на характеристики газовых потоков на рабочих режимах плазмотронов для утилизации конструкций ЛА из КМ.

### Список литературы

1. Основы промышленной технологии утилизации крупногабаритных твердотопливных зарядов / Л. В. Забелин, Р. В. Гафиятуллин, А. Н. Поник, В. Ю. Мелешко. – М. : ООО «Недра – Бизнес-центр», 2004. – 226 с.
2. Спеціальне матеріалознавство / Т.А. Манько., Л.Д. Кучма, С.І. Губенко та ін. – Д.: АРТ-ПРЕС, 2004. – 216 с.
3. Тухватулин З.А. Экологические и экономические аспекты проблемы строительства объектов утилизации / З.А. Тухватулин – Воткинск, 2001. – 23 с.
4. Зрелов В.Н. Жидкие ракетные топлива / В.Н. Зрелов, Е.П. Серегин. – М.: Химия, 1975. – 320 с.
5. Планковский С.И. Современное состояние и перспективы создания мощных высокоресурсных плазменных генераторов / С.И. Планковский, В.С. Кривцов // Технологические системы – К.: УкрНИИАТ. – 2004. – №1. – С. 11-15.
6. Lampson R. A., Haun R. E., Brooks R. S., Eschenbach R. C. Пат. 6313429 (США). Dual mode plasma arc torch for use with plasma arc treatment system and method of use thereof. Оpubл. 6.11.2001 г.
7. Zhu W., Eschenbach R. C., Lampson R. A., Sparkes J. R. Пат. 6452129 (США). Plasma torch preventing gas backflows into the torch. Оpubл. 17.09.2002 г.
8. Retech Inc., Plasma Centrifugal Furnace. Applications Analysis Report. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, June 1992, 50 p. [www.epa.gov/ordntrnt/ORD/SITE/reports/540a591007/540a591007.pdf](http://www.epa.gov/ordntrnt/ORD/SITE/reports/540a591007/540a591007.pdf)
9. Планковский С.И. Научные основы создания высокоресурсных термоэмиссионных катодных узлов оборудования для плазменной обработки материалов: дис. д-ра техн. наук: 05.07.02 Планковский Сергей Игоревич. – Х., 2009. – 333 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Н. Кобрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 04.06.10

## **Перспективи створення плазмових генераторів для утилізації конструкцій літальних апаратів з композиційних матеріалів**

Розглянуто можливості вживання плазмових технологій для утилізації елементів конструкцій ЛА з композиційних матеріалів. З врахуванням особливостей об'єктів утилізації сформульовано вимоги до плазмових генераторів для цих цілей. Як найбільш перспективні для вживання обґрунтовано вибір комбінованих плазмотронів з неохолоджуваними коаксіальними електродами. Сформульовано завдання з вибору режимів газодинамічного захисту термоемісійних порожнистих катодів плазмотронів для утилізації конструкцій ЛА з КМ.

**Ключові слова:** утилізація конструкцій ЛА, композиційні матеріали, плазмотрон, порожнистий катод, математичне моделювання, газодинамічний захист.

## **Prospects of creation plasma generators for utilization constructions of aircrafts from composition materials**

Possibilities of plasma application technologies are considered for utilization elements of constructions of aircraft from composition materials. Taking into account the features objects of utilization requirements are formulated to the plasma generators for these aims. As most perspective for application the choice of combined plazmotronov is grounded with the uncooled coaxial electrodes. Tasks are formulated on the choice of the modes of gas-dynamic defence of termoemission hollow plazmotron cathodes for utilization constructions of aircraft from KM.

**Keywords:** utilization constructions of aircraft, composit materials, plazmotron, hollow cathode, mathematical design, gas-dynamic defence.