

## **Перспективные схемы установок для плазменной утилизации деталей летательных аппаратов из композиционных материалов**

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

Применительно к задачам утилизации деталей ЛА из композиционных материалов летательных аппаратов проанализированы схемы конструкций оборудования для плазменной утилизации. С учетом этих требований предложена схема перспективной установки для плазменной утилизации деталей летательных аппаратов из композиционных материалов, которая включает в себя печь с магнитогидродинамическим перемешиванием, а в качестве нагревательного элемента – плазмотрон комбинированного типа с полым катодом. В составе установки предложено использовать двухступенчатую систему газоочистки на основе жидкостно-газового эжектора и эмульсионного фильтра.

**Ключевые слова:** плазмотрон, полый катод, термоэмиссия, газоочистка, отравление, газодинамические характеристики, вихревое течение.

### **Введение**

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. Особенно быстро этот процесс происходит в области техники военного назначения, когда появление нового поколения самолетов или вертолетов приводит к необходимости быстрого обновления парка таких машин. Техника гражданского назначения обычно используется до выработки летного ресурса. В любом случае наступает момент, когда самолет или вертолет использовать либо нерационально, либо просто опасно. Такую технику необходимо утилизировать.

Технологии утилизации металлических летательных аппаратов достаточно хорошо отработаны на протяжении десятилетий. Однако в последнее время все большее применение в конструкции ЛА находят различного рода композиционные материалы. Традиционные технологии утилизации для них неприменимы, а использование различного рода методов сжигания отходов могут приводить к образованию крайне токсичных веществ [1]. Одним из перспективных направлений в области создания экологически безопасных технологий утилизации конструкций ЛА из КМ является применение плазменных технологий. Однако и сегодня использование плазменных технологий сталкивается с проблемами обеспечения надежности работы плазменных генераторов.

Поэтому целью настоящей работы является анализ существующих и определение перспективных схем плазменных технологий утилизации конструкций ЛА из КМ.

### **Анализ существующих плазменных технологий**

На сегодняшний день существует ряд известных технологий плазменной утилизации промышленных отходов, представленных фирмами Mintek (ЮАР), Retech (США), Westinghouse, разработки ИЭС НАН Украины.

Общими преимуществами применяемых технологий являются:

- Возможность переработки без их предварительной классификации и дробления отходов.
- Возможность переработки отходов с большим содержанием неорганических компонентов.
- Образование чистого шлака, пригодного для использования в производстве строительных материалов.
- Отсутствие вредных выбросов.
- Существенная автономия метода вследствие того, что энергопитание плазмотрона может быть обеспечено собственной электростанцией, утилизирующей теплотворную способность пиролизного газа.
- Плазменные технологии могут применяться для переработки любого вида отходов в любой форме без потери эффективности. Эта особенность исключает необходимость дополнительной обработки или хранения образующихся в ходе переработки материалов.

Процесс плазменной утилизации композиционных конструкций ЛА специфичен, поэтому накладывает определенные требования при создании соответствующей плазменной технологии [1], в частности:

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

Проанализируем существующие технологии плазменной переработки относительно заявленных выше требований.

Наиболее ранние применения плазменных технологий для переработки промышленных отходов относятся к области переработки металлургических шлаков [2,3]. Рассмотрим особенности такого рода технологий на примере одного из мировых лидеров в данной области - фирма Mintek (ЮАР).

Для плазменной переработки металлургических шлаков фирма с конца 70-х годов использует электропечи постоянного тока с перенесенными плазменными дугами. В качестве катода используется полый графитированный электрод с центральной подачей плазмообразующего газа, в качестве анода – ванна жидкого металла (рис. 1). Содержимое печи (расплав) является частью электрической цепи. Особенностью применяемого источника питания является высокое значение напряжения (1200 В). Это продиктовано высоким сопротивлением шлака.

Описанные плазменно-дуговые печи используются в ряде разработанных фирмой Mintek плазменных процессов по переработке металлургических шлаков названных Enviroplas [3,4,5].

При плавке обеспечивают перемешивание расплава в печи с целью устранения местного перегрева в зоне привязки дуги и равномерного протекания реакций в расплаве. Для этого используется продувка расплава азотом, что неизбежно приводит к снижению температуры расплава и снижает КПД установки.

Использование данной установки перспективно для крупнотоннажной переработки отходов, оборудование является громоздким. В составе оборудования используется многоступенчатая система газоочистки на основе жидкостных скрубберов, что приводит к большому расходу воды и требует наличия дополнительных систем для ее очистки. Исходя из вышеизложенных требований для плазменной утилизации объектов из КМ, данная схема им не удовлетворяет.

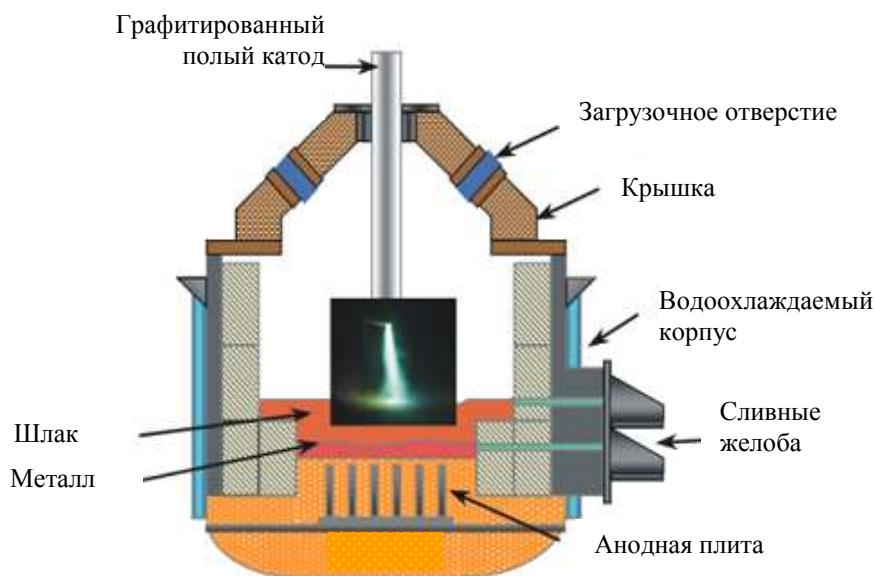


Рис. 1. Схема плазменно-дуговой печи фирмы Mintek

Американская компания Westinghouse в настоящее время ведет большое число исследований в области переработки опасных отходов. При этом возникает не только проблема их полной утилизации, но и проблема транспортировки этих отходов к местам переработки. Чтобы решить эти две проблемы одновременно, фирма разработала плазменную систему внутри передвижного модуля [9]. Внутри стандартного грузового трейлера была смонтирована плазменная система вместе со всеми сопутствующими ей устройствами – источником тока, системой водообеспечения, системой управления процессом и т. д. (рис. 2)

Новейшая плазменная система, расположенная внутри трейлера позволяет перерабатывать химические отходы с производительностью около 4 литров за минуту, с эффективностью разложения вредных компонентов 99,99999% [9].

В данной установке используются плазменные горелки пассивного типа с низким КПД нагрева. Их применение обеспечивает переработку жидких отходов, однако для задач утилизации элементов конструкции ЛА такая схема потребует значительных энергозатрат.

Фирмой Retech (США) разработано оборудование для плазменной утилизации опасных отходов (рис. 3). В качестве источника плазмы использована водоохлаждаемая плазменная горелка комбинированного типа [8,9]. 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 гораздо большим КПД.

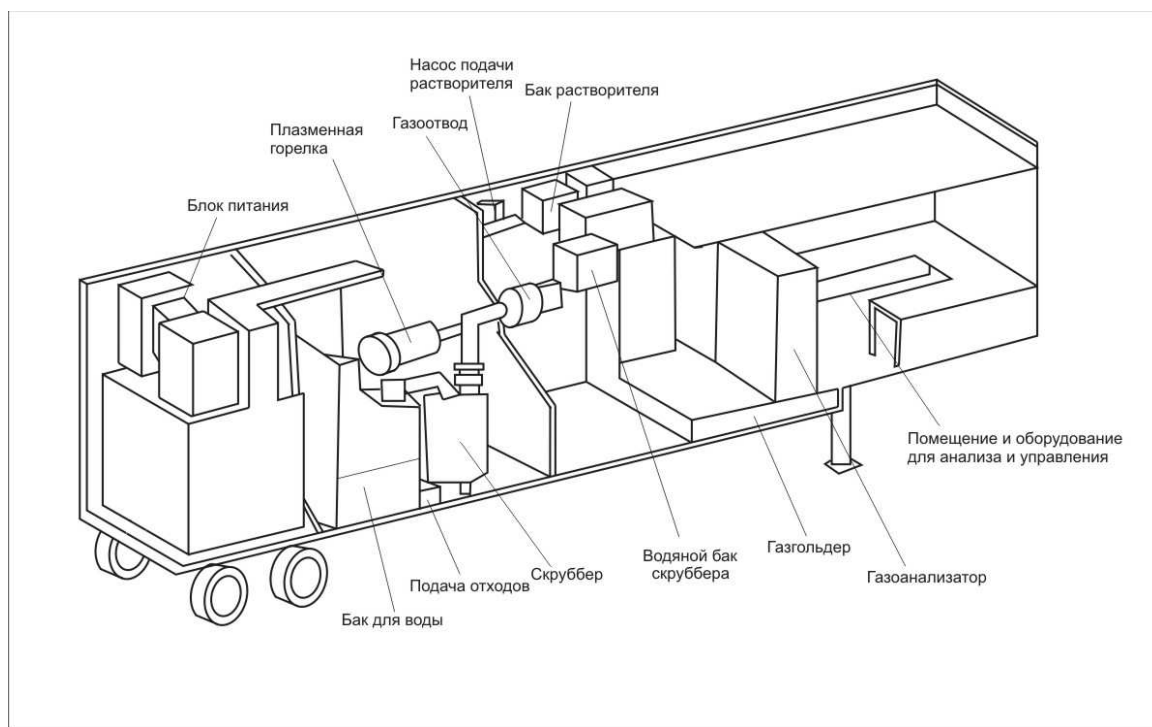


Рис. 2. Плазменная система передвижного модуля компании Westinghouse

Для исключения перегрева расплава в месте привязки печь выполнена в виде центрифуги. Корпус печи раскручивается с высокой скоростью, а горелка имеет возможность поворота на шарнирах. Такое решение, безусловно, является оригинальным, но вряд ли может быть работоспособным из-за своей сложности. В работе [9] приведены данные испытаний установки. 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. Такого рода проблемы свойственны всем существующим плазменным горелкам с охлаждаемыми электродами и соплом.

Таким образом, применительно к рассматриваемым задачам плазменные установки фирмы Retech имеет ряд существенных недостатков. В первую очередь – низкую надежность пламенных горелок, что не позволяет их использовать для переработки опасных отходов, к которым могут относиться отходы деталей ЛА из КМ [1]. Печь имеет сложную конструкцию — выполнена в виде центрифуги и раскручивается с высокой скоростью, что существенно уменьшает надежность всего оборудования в целом.

Одна из наиболее успешных попыток создания конструкций плазменных горелок комбинированной схемы была сделана исследователями ИЭС НАН Украины. В ходе совершенствования металлургического плазменного оборудования ими были созданы опытно-промышленные образцы сильноточных плазмотронов с плазменным катодом. На их базе были созданы плазменные нагревательные комплексы мощностью до 6 МВт, которые эксплуатировались в составе оборудования для вакуумно-дугового переплава и внепечной обработки стали [12]. Однако, несмотря на резкое повышение ресурса основного электрода, ресурс вспомогательного стержневого катода не превышал 200 часов.

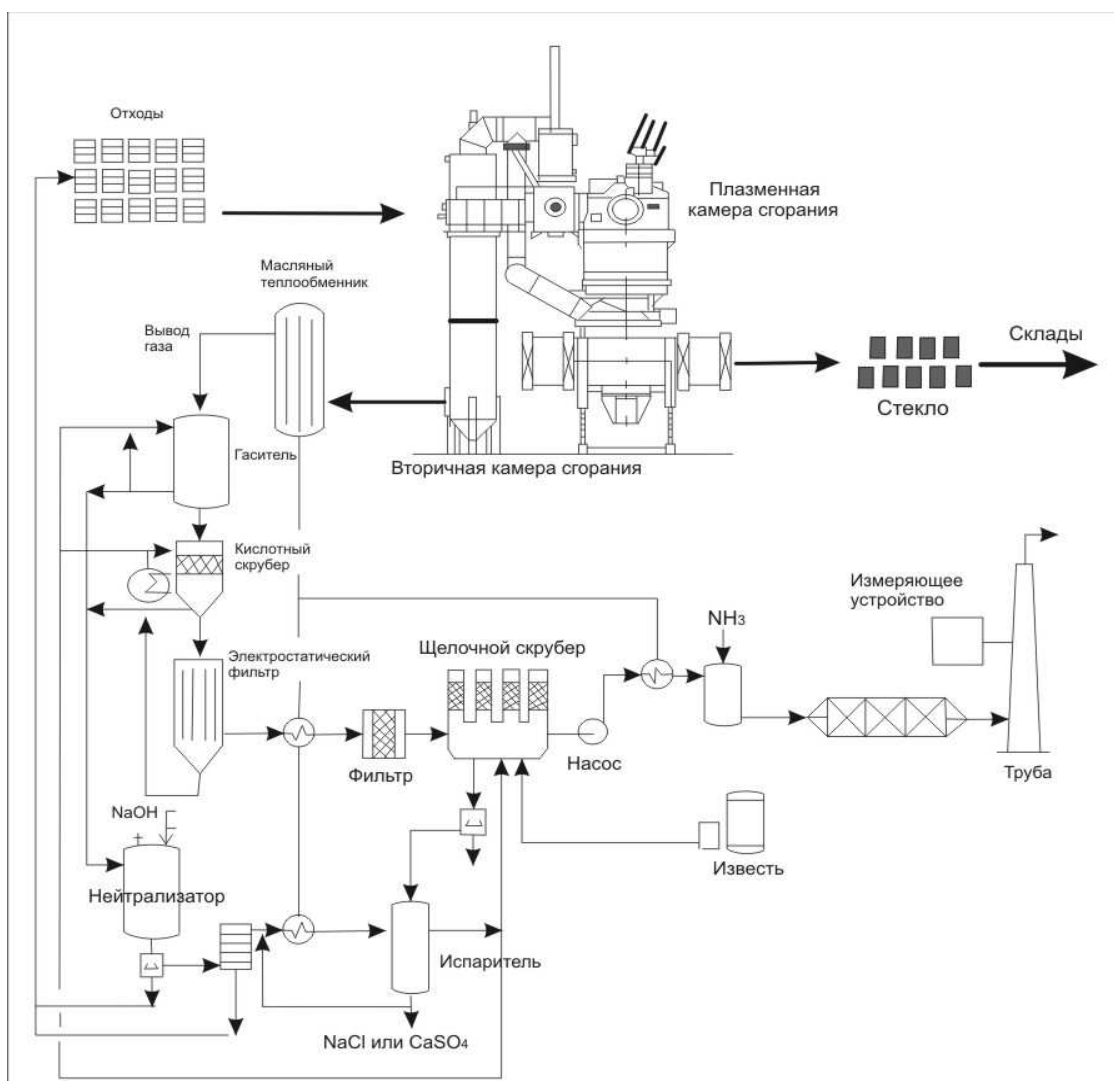


Рис. 3. Схема плазменной утилизации отходов фирмы Retech

Создание эффективных установок и технологий для плазменно-дуговой переработки на современном уровне развития техники является вполне решаемой задачей. Такая уверенность основана на том, что большинство оборудования из предлагаемой технологической цепочки уже создано и требует только интеграции.

### Определение перспективной схемы утилизации КМ

В качестве перспективы совершенствования технологий плазменной переработки может рассматриваться применение дуговых печей постоянного тока с магнитогидродинамическим перемешиванием расплава [12]. При создании печей за основу взята конструкция дуговой печи без водоохлаждаемых элементов под футеровкой подины. Уникальной особенностью таких печей, делающих их перспективными для использования при переработке шлаков, является применение магнитогидродинамического (МГД) перемешивания расплава. Эффект МГД перемешивания достигается за счет растекания тока от опорного пятна дуги к расположенным на периферии ванны подовым электродам (рис. 4).

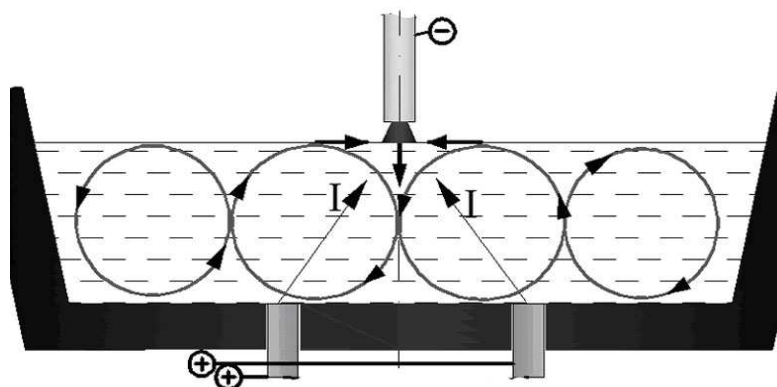


Рис. 4. Схема работы печи с магнитогидродинамическим перемешиванием расплава

Взаимодействие горизонтальной и вертикальных составляющих тока с развиваемым электромагнитным полем вызывает торoidalное перемешивание расплава в вертикальном сечении и вращательное движение в горизонтальном. Система управления током дуги удерживает постоянную форму перемешивания, регулирует его интенсивность, устраняет вихревые потоки расплава над подовыми электродами.

МГД перемешивание и управление расплавлением шихты предотвращает локальный перегрев металла практически без снижения температуры расплава. Возможность управления составом атмосферы и высокая температура печных газов препятствует образованию окислов азота, цианидов, диоксинов, фуранов.

Вторым ключевым решением, позволяющим обеспечить соблюдение требований по безопасности переработки, для перспективной установки по плазменной утилизации может являться применение в качестве нагревателя высокоресурсного плазмотрона с полым термокатодом. Разработанные в последние годы в Национальном аэрокосмическом университете ХАИ плазмотроны имеют ресурс до 3000 часов [12]. Для этих катодов основным фактором, определяющим их работоспособность, является отравление эмиттера, вызванное химическим взаимодействием с кислородосодержащими газами. Обеспечение работоспособности таких катодов может быть обеспечено за счет правильного выбора параметров газодинамической защиты потоком инертного газа.

Схема комбинированного катодного узла плазмотрона, предназначенного для нагрева материалов электрической дугой, изображена на рис. 5, б [187]. Вспо-

Вспомогательный ВЧ плазмотрон 1 подает поток плазмы через осевое отверстие основного электрода 2. Основной электрод является неохлаждаемым и выполнен в виде concentрических корпусных деталей, между которыми расположен эмиттер 3. В качестве материала эмиттера могут быть использованы упомянутые ранее составы. Эмиттер может представлять собой плотно упакованные стержни 4 из эмиссионного материала (рис. 5, а). В этом случае подача газа должна осуществляться как через осевое отверстие, так и в зазор между коаксиальными гильзами. В этом случае основной электрод будет представлять собой многополостной катод.

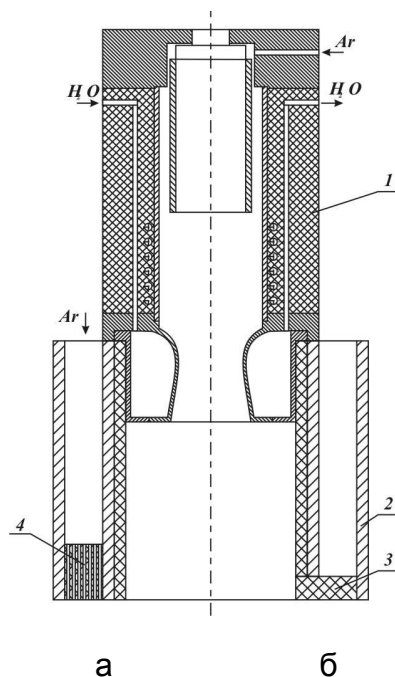


Рис. 5. Схема комбинированного катодного узла

Еще одной проблемой является необходимость создания эффективных и компактных систем газоочистки (ГО). На сегодняшний день в системах газоочистки установок для плазменной утилизации используются жидкостные скрубберы, а также комбинации жидкостных скрубберов и электростатических фильтров. Жидкостные скрубберы имеют большие размеры, используют большое количество воды, что не позволяет применять их в мобильных системах. Система с комбинацией жидкостных скрубберов и электростатических фильтров имеет высокую стоимость и обладает малой надежностью. Решением этого недостатка может являться применение двухступенчатой очистки [11], где на первой ступени применяется жидкостно-газовый эжектор (ЖГЭ), а на второй ступени использовать эмульсионную отчистку, что позволяет уменьшить расход воды в 10 раз и увеличить степень очистки в 1,5 – 2 раза.

Аэрозольно-эмульсионные фильтры имеют существенные преимущества перед другими способами фильтрации дымовых и промышленных газов от твердых и газообразных примесей. Их особенностью является интенсификация массообменных процессов за счет увеличения площади межфазного взаимодействия и наличия вихревых течений на макро- и микромасштабном уровне. Взаимодействие между фазами происходит в аэрозольном и

эмульсионном слое, где размер дисперсной фазы имеет порядок десятка микрон, что обеспечивает большую поверхность контакта между фазами. Аэрозольная ступень представляет собой узел, в котором в очищаемый газ инжектируется поглощающая жидкость в виде аэрозоля (рис. 6). Далее аэрозоль улавливается в сепараторе, совмещенном с входной частью эмульсионной ступени. Оставшиеся жидкие частицы улавливаются эмульсионной ступенью. В эмульсионной ступени фильтрующие элементы - циклонные трубы, оснащенные сверху узлом подачи жидкости, а снизу - заверителем, через который проходит очищаемый газ. Очистка загрязненных газов осуществляется в эмульсионном слое, образующемся в средней части трубы на диафрагме, стабилизирующей положение этого слоя. Течение в трубе вихревое, характеризующееся наличием обратных токов. Применение ЖГЭ позволяет отказаться от дымососов. Габариты очистных установок с ЖГЭ существенно меньше, чем с вентиляторами.

Использование двухступенчатой ГО позволяет выполнить совмещение функций предварительной очистки, а также закалки при плазменной переработке, что позволит избежать возникновения токсичных отходов.

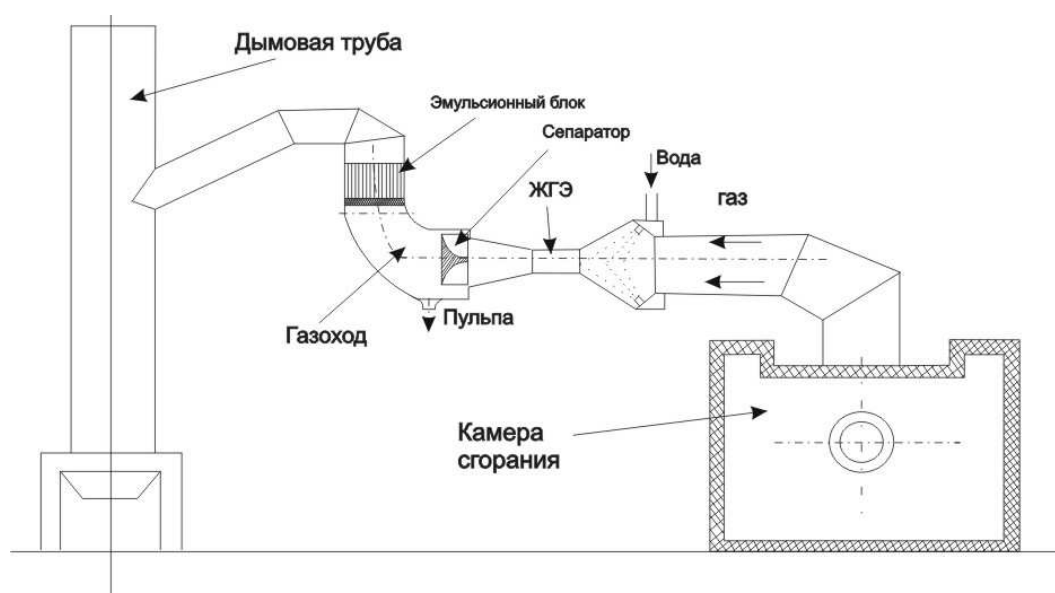


Рис. 6. Схема перспективной установки для плазменной утилизации композиционных материалов летательных аппаратов

### Заключение

1. Применительно к задачам утилизации деталей ЛА из композиционных материалов летательных аппаратов проанализированы схемы конструкций оборудования и показаны недостатки имеющихся схем. Показано, что установке для плазменной утилизации перспективным является применение плазмотронов комбинированного действия.

2. Предложена и обоснована схема перспективной установки для плазменной утилизации композиционных материалов летательных аппаратов, которая включает в себя печь с МГД перемешиванием, в качестве нагревателя – плазмотрон с полым катодом, а также двухступенчатую систему газоочистки на основе газожидкостных эжекторов и эмульсионных фильтров.



### Список литературы

1. Гарин В.О. Перспективы создания плазменных генераторов для утилизации конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Харьков. – 2010. – №46. – с. 99-109.
2. Jones R.T., Barcza N.A., Curr T.R. Plasma Developments in Africa, Second International Plasma Symposium: World progress in plasma applications, Organized by the EPRI- (Electric Power Research Institute) CMP (Center for Materials Production), 9–11 February 1993, Palo Alto, California., [www.mintek.co.za/Pyromet/Plasma/Plasma.htm](http://www.mintek.co.za/Pyro-met/Plasma/Plasma.htm).
3. Jones R.T., Hayman D.A., Denton G.M. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology, International Symposium on Challenges of Process Intensification, 35th Annual Conference of Metallurgists, CIM, Montreal, Canada, 24-29 August 1996, pp. 451–466.
4. Jones R.T., Deneys A.C. Using a Direct- Current Arc Furnace to recover cobalt from slags. JOM, The Minerals, Metals, and Materials Society, vol. 50, no. 10, October 1998, pp. 57–61.
5. Jones R.T., Denton G.M., Reynolds Q.G., Parker J.A.L., Van Tonder G.J.J. Recovery of cobalt from slag in a DC arc furnace at Chambishi, Zambia, SAIMM Journal, vol. 102, No. 1, January / February 2002, pp. 5–9.
6. Тухватулин З.А. Экологические и экономические аспекты проблемы строительства объектов утилизации. – Вотинск, 2001. – 23 с.
7. Планковский С.И. Современное состояние и перспективы создания мощных высокоресурсных плазменных генераторов / С.И. Планковский, В.С. Кривцов // Технологические системы: УкрНИИАТ, Киев. – 2004. – №1. – с. 11-15.
8. 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.
9. 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.
10. 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)
11. Карпов А. А. Исследование характеристик жидкостно-газового эжектора в составе аэрозольно-эмульсионного фильтра / А. А. Карпов, В. Г. Селиванов // Математическое моделирование 2002 г. - №8. – с. 23-27.
12. Планковский С.И. Научные основы создания высокоресурсных термоэмиссионных катодных узлов оборудования для плазменной обработки материалов: Дис. Д-рф техн. наук: 05.07.02 Планковский Сергей Игоревич. – Харьков, 2009. – 333 с.

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

Поступила в редакцию 03.06.10

## **Перспективні схеми установок для плазмової утилізації деталей літальних апаратів з композиційних матеріалів**

Стосовно завдань утилізації деталей літальних апаратів з композиційних матеріалів ЛА проаналізовано схеми конструкцій устаткування для плазмової утилізації. З урахуванням цих вимог запропоновано схему перспективної установки для плазмової утилізації деталей літальних апаратів з композиційних матеріалів, яка включає піч з магнітогідродинамічним перемішуванням, а як нагрівальний елемент – плазмотрон комбінованого типу з порожнистим катодом. У складі установки запропоновано використовувати двоступінчасту систему на основі рідинно-газового ежектора й емульсивного фільтру.

**Ключові слова:** плазмотрон, порожнистий катод, термоемісія, газоочищення, отруєння, газодинамічні характеристики, вихрова течія.

## **Perspective charts of settings for plasma utilization details of aircrafts from composition materials**

As it applies to the tasks of utilization details of aircraft from composition materials of aircrafts the charts of constructions equipment are analysed for plasma utilization. With the account of these requirements is offer the chart of perspective fluidizer plasma utilization for details of aircrafts from composition materials, which plugs in itself stove with magnet-hydrodynamic interfusion, and as a heater element – plazmotron of the combined type with a hollow cathode. In composition setting it is suggested to use the two-stage system of gas-cleaning on the basis of liquid-gas ejector and emulsive filter.

**Keyword:** Plasmotron, hollow cathode, thermionic emission, gas-cleaning, poisoning, gas-dynamic behavior, vortex flow.