

УДК 53.06:09,67.08

sergej.anahov@rsvpu.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОЙ ИНСИНЕРАЦИИ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ УТИЛИЗАЦИИ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОТХОДОВ****MODELING OF THE PLASMA INCINERATION TECHNOLOGY OF  
WASTE UTILIZATION AND NEUTRALIZATION**

*Анахов С.В., кандидат физико-математических наук, доцент,  
Российский государственный профессионально-  
педагогический университет, Екатеринбург,  
Пыкин Ю.А., доктор технических наук, профессор,  
Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург,  
Матушкин А.В., кандидат технических наук,  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

*Anakhov S.V.,  
Russian State Vocational-Professional University, Yekaterinburg,  
Pykin Yu.A.,  
Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg,  
Matushkin A.V.,  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg*

Исследованы процессы плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обезвреживания отходов. Отмечены основные достоинства технологий, основанных на высокотемпературном плазменном воздействии на материалы, а также основные направления их применения в стратегиях управления отходами. За счет высоких температур плазменной струи (до 20 тыс. К), быстроты процесса, малого влияния атмосферного кислорода возникают необходимые условия для обезвреживания практически любых токсичных, а при определенных условиях и радиоактивных газов. Представлена обобщенная классификация плазмотронов по функциональным и конструктивным признакам, специфичным для применения в экологических технологиях. Отмечено, что оценка эффективности обезвреживания токсичных газов с применением плазмотронов подобного типа является многопараметрической задачей, так как помимо конструктивных следует учитывать газодинамические и теплоэнергетические параметры технологии. Методами математического моделирования определены газодинамические параметры воздушно-плазменного потока в камере смешения плазмотрона для экологических технологий. Определены характерные температуры, скорости и времена нагрева утилизируемого газа в различных областях камеры смешения. Обозначены направления дальнейших исследований и разработок, необходимых для создания технологии плазменной инсинерации с максимальной эффективностью обеззараживания. Рассмотрены также вопросы внедрения плазменной инсинерации на отдельных стадиях технологий высокотемпературной утилизации и обезвреживания отходов.

*Ключевые слова:* экологическая безопасность, утилизация отходов, обезвреживание, обеззараживание, инсинерация, плазмотрон.

The processes of the plasma incineration in technology of waste utilization and waste disposal are investigated. The main advantages of technologies based on high-temperature plasma impact on materials, as well as the main directions of their application in waste management strategies are noted. Due to the high temperatures of the plasma jet (up to 20 thousand K), the speed of the process, the small influence of atmospheric oxygen, the necessary conditions for the neutralization of almost any toxic, and under certain conditions, radioactive gases arise. A generalized classification of plasma torches according to the functional and design features specific to application in environmental technologies is presented. It is noted that the evaluation of the efficiency of toxic gases neutralization with the use of this type plasmatrons is a multiparameter problem, since in addition to the design should take into account the gas-dynamic and thermal power parameters of the technology.

The gas-dynamic parameters of the air-plasma flow in the plasma torch mixing chamber for ecology technologies are determined by methods of mathematical modeling. The characteristic temperatures, velocities and heating times of the utilized gas in different areas of the mixing chamber are determined. The directions of further research and development necessary to create a technology of plasma incineration with maximum efficiency of disinfection are outlined. The issues of plasma incineration introduction at certain stages of technologies of high-temperature waste utilization and disposal are also considered.

*Keywords:* ecological safety, waste recycling, waste treatment, decontamination, incineration, plasmatron.

Переработка и обезвреживание отходов – одна из приоритетных экологических проблем, стоящих не только перед российским обществом, но и человечеством, в целом. За последние годы было получено немало эффективных технологических решений, улучшающих экологическую обстановку окружающей среды. Одним из таких решений является применение в проектах экологической направленности электроплазменной техники, использующей генератор низкотемпературной плазмы – плазматрон [1]. В плазматроне при температурах плазменной струи в несколько тысяч градусов возникает высокоэнергетичный эффект воздействия на вещества, позволяющий подвергнуть их глубокому разложению, – плазменная инсинерация («сжигание») [2]. Однако использование плазменных технологий в производствах по переработке отходов должно быть обосновано с учетом критериев качества получаемого результата, эффективности и безопасности процесса [3, 4], а, следовательно, связано с изучением условий и разработкой методов управления риском для обеспе-

чения безопасности при технологических процессах, утилизации, нейтрализации, складировании и регенерации отходов деятельности предприятий. Внедрение технологий плазменной инсинерации должно, с учетом вышесказанного, опираться на системный подход, включающий в себя не только решение проблемы безопасности самой технологии (включая пожарную), но и её применение в целях повышения экологической и промышленной безопасности в сфере взаимодействия человека и среды его обитания.

Основным достоинством плазменных термических технологий (по сравнению с физико-химическими и биологическими) является возможность перерабатывать практически любые отходы – твердые, растворимые, жидкие и газообразные. При этом, в зависимости от вида и степени токсичности отходов применение плазматронов возможно как на стадии высокотемпературной обработки и обезвреживания самих отходов (после предварительной их подготовки для получения необходимых для высокотемпературной переработки характеристик),

так и на стадии обязательной в настоящее время многоступенчатой очистки образующихся при переработке газов. В связи с существенными энергетическими затратами внедрение плазменных технологий представляется наиболее целесообразным для решения локальных, но важных задач санитарно-эпидемиологическим и экологическим требованиям – уничтожение инфицированных отходов, кремация трупов животных, обезвреживание супертоксиантов (полихлорированных дибензодиоксидов, дибензофуранов, бифенилов, отравляющих веществ, тяжелых металлов и их со-

единений и т. д.). Следует при этом сослаться на мировую практику, в которой сложилось мнение об исключительности применения плазменных методов для обезвреживания токсичных веществ I и II класса опасности [5], а при определенных условиях и радиоактивных газов.

К настоящему времени разработано большое количество плазмотронов и схем применения в технологиях обезвреживания отходов (экотехнологиях). На рис. 1 представлена их обобщенная классификация по функциональным и конструктивным признакам, специфичным для применения в экотехнологиях [6].

### ПЛАЗМОТРОНЫ ДЛЯ ЭКОТЕХНОЛОГИЙ

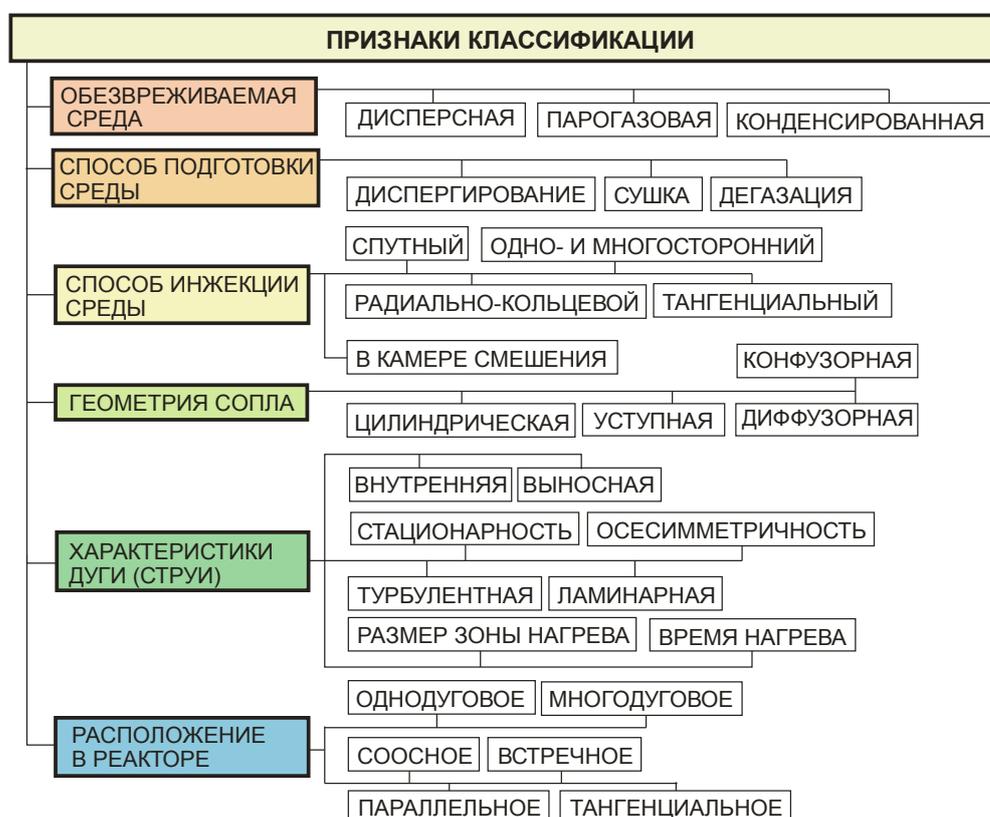


Рисунок 1. Функциональные и конструктивные признаки классификации плазмотронов для экотехнологий

С учетом фазового состава подлежащих обезвреживанию и утилизации отходов большая часть применяемых в экотехнологиях плазмотронов предназначена для переработки дисперсных и парогазовых сред, когда отходы обезвреживаются путем непосредственного введения

в плазменную дугу (струю). Специфика обезвреживания токсичных материалов и принципы проектирования плазмотронов для этих целей рассмотрена авторами ранее [4]. С учетом данных принципов разработана и запатентована полезная модель плазмотрона [7], кото-

рый может применяться для обезвреживания токсичных парогазовых потоков

различного состава и фазового состояния (рис. 2 и 3).

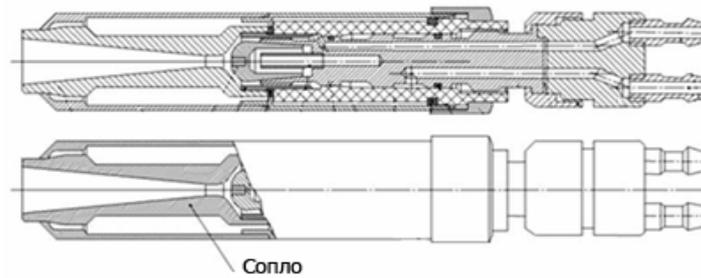


Рисунок 2. Плазматрон для нагрева материалов (конструктивная схема)



Рисунок 3. Плазматрон для обезвреживания опасных отходов

Особенностью конструкции данного плазматрона является наличие сопла, выполняющего также функцию камеры смешения (КС) основного потока плазмообразующего газа (ПОГ) и обезвреживаемого вторичного потока. Предварительно закрученный с помощью системы газовихревой стабилизации ПОГ в КС нагревается плазменной дугой и взаимодействует с потоком тангенциально подаваемой токсичной парогазовой смеси. Как известно, из-за неравномерного распределения скоростей потока вторичного холодного газа при взаимодействии с высокоскоростной плазменной струей возникает сильная турбулентность, приво-

дящая к интенсивному перемешиванию потоков. Для интенсификации теплообмена вторичного потока с дугой и плазменным потоком КС имеет конфузорный участок, сопряженный с сопловой камерой плазматрона, когда за счет сложной траектории движения потоков, совершающих одновременно вращательное и поступательное движение, увеличивается время нахождения молекул токсичного вещества в плазменном потоке. Патрубки для подачи вторичного потока могут находиться на сменной части плазматрона, либо быть вынесенным за его пределы и располагаться под срезом сопла под любым углом к оси плазменной струи.

Оценка эффективности обезвреживания токсичных газов с применением плазмотрона подобного типа является многопараметрической задачей, так как помимо конструктивных следует учитывать газодинамические и теплоэнергетические параметры технологии. С учетом вышесказанного, была поставлена задача методами математического моделирования определить газодинамические параметры

потоков в КС с различным конструктивным исполнением зоны нагрева и охлаждения утилизируемого газа с целью последующей оценки термокинетических процессов обезвреживания токсичных отходов, содержащихся во вторичном газовом потоке, а также выработки рекомендаций по совершенствованию конструкции плазмотрона и технологической схемы обезвреживания.

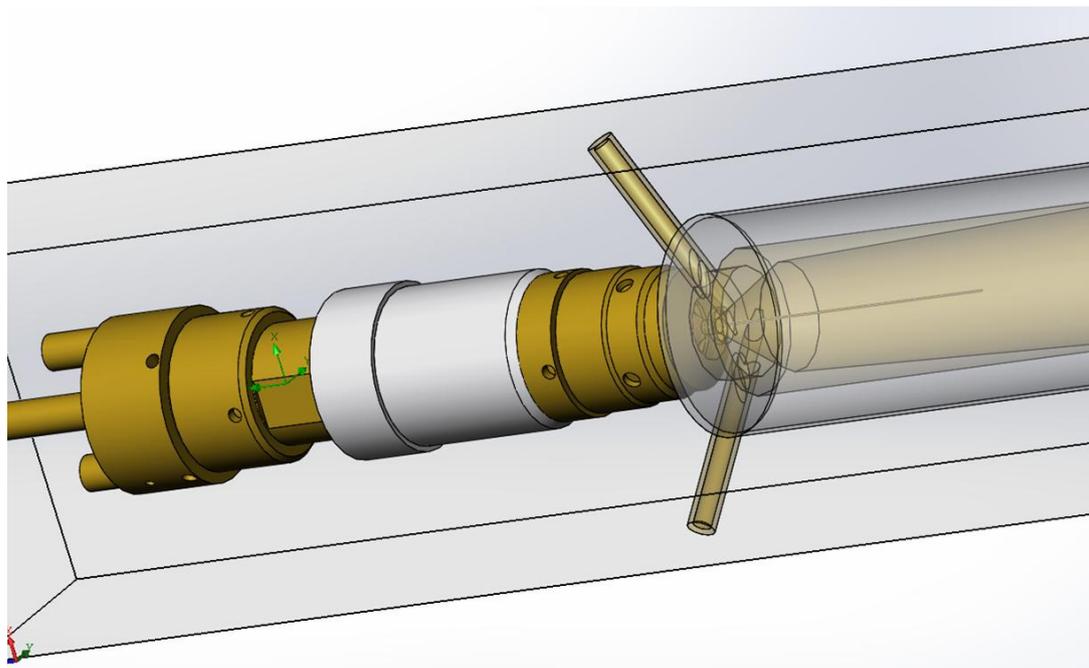


Рисунок 4. Расчетная модель плазмотрона для экотехнологий

Расчет газодинамических параметров потоков проводился в приложении FlowWorks программной среды SolidWorks. Расчетная модель плазмотрона представлена на рис.4. Расчеты проводились для воздушно-плазменной среды при характерном для эффективной газодинамической стабилизации дугового плазмотрона массовом расходе основного потока ПОГ 0,011 кг/с и диаметре входного отверстия в КС 4 мм. Вторичный поток утилизируемого газа подавался по 2-м осесимметрично расположенным патруб-

кам под углом  $60^\circ$ , обеспечивающим ввод утилизируемого газа по касательной в плазменную струю, с массовым расходом 0,005 кг/с на каждую трубку. Расчет температур в КС проводился по нескольким прямолинейным траекториям (линиям) различной удаленности от оси камеры (рис. 5) при характерной для воздушно-плазменной дуги (струи) длине в 90 мм и температуре в 7000 К. Геометрия КС: длина не менее 150 мм, угол раскрытия начальной части –  $20^\circ$ , раскрытие на остальной длине для конфузорной КС –  $5^\circ$ .

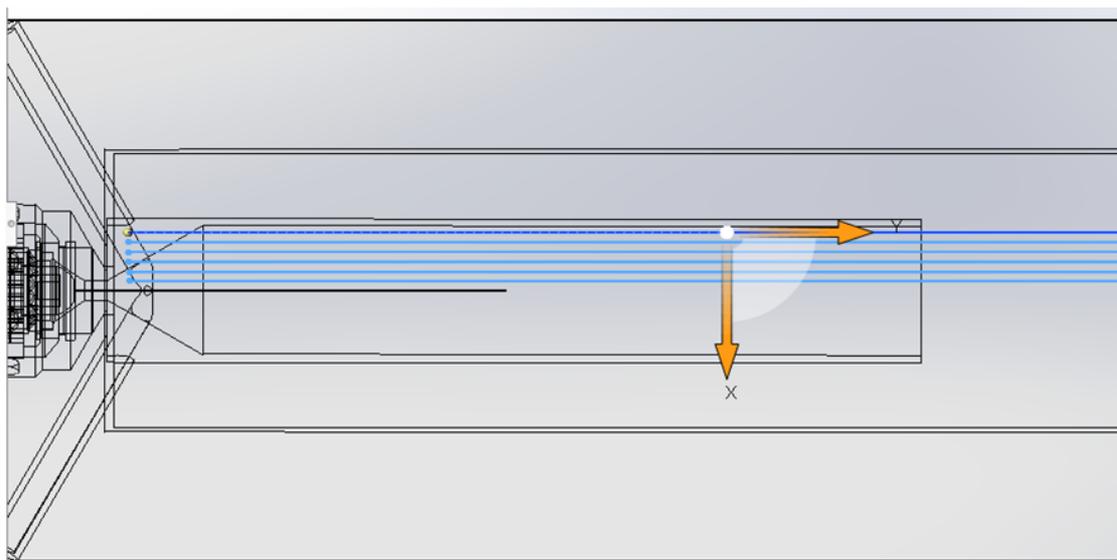


Рисунок 5. Траектории расчета скоростей и температур в камере смешения плазмотрона

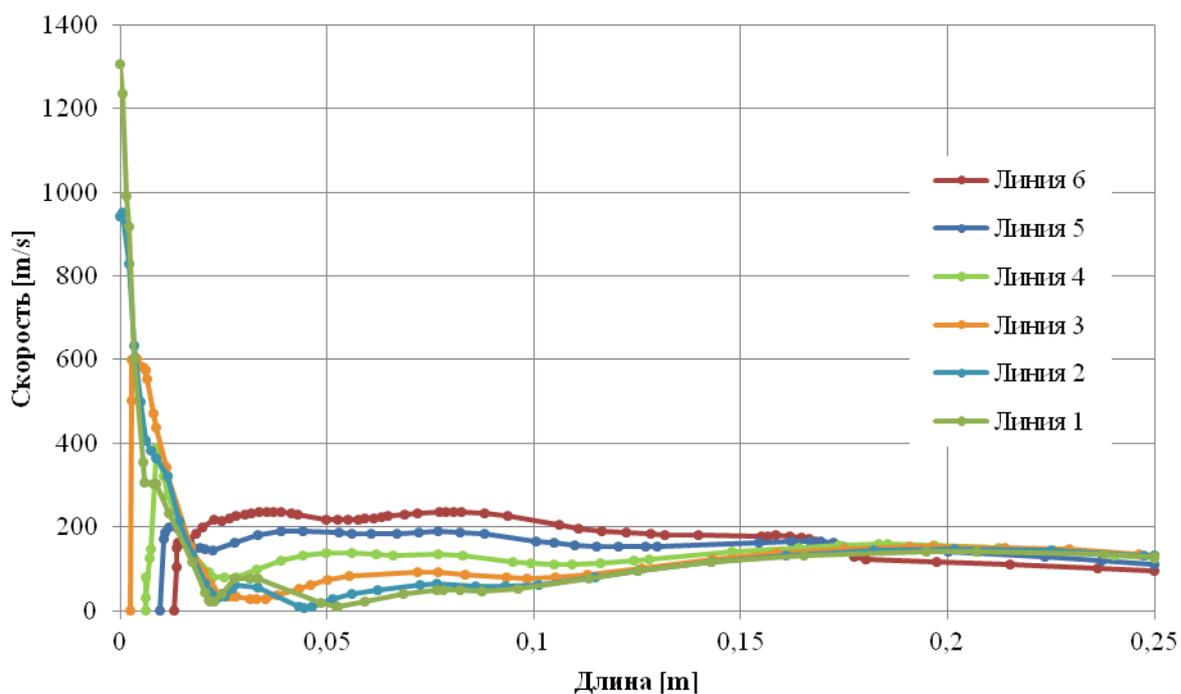


Рисунок 6. Расчет скоростей в камере смешения плазмотрона цилиндрического типа

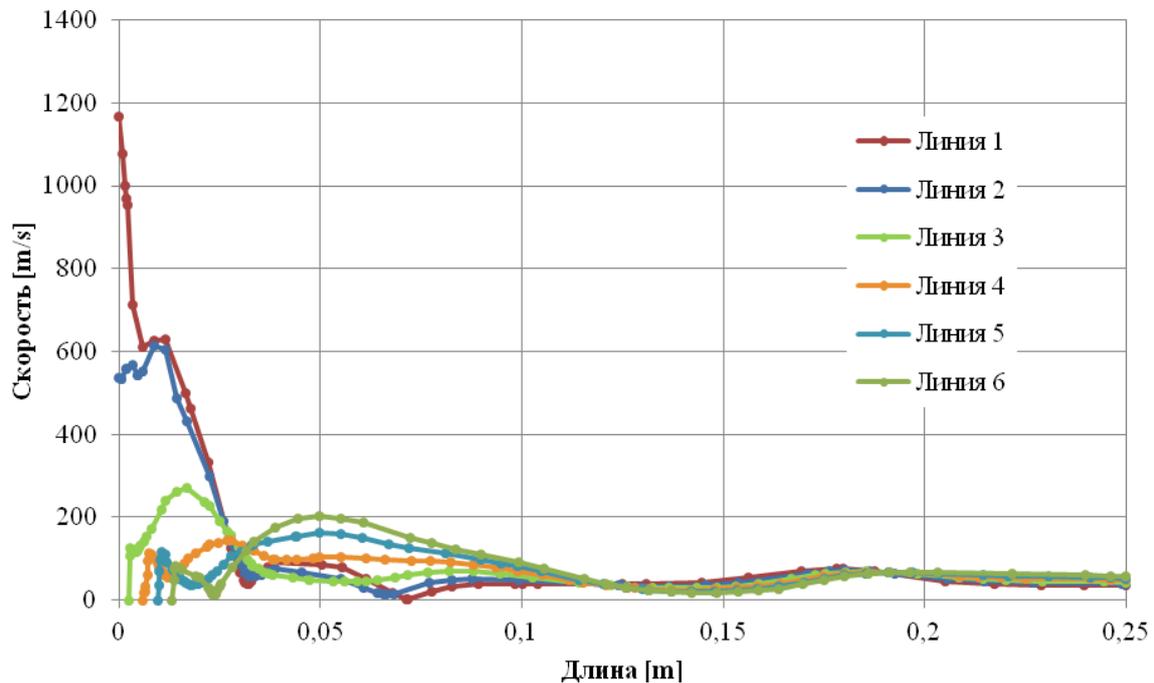


Рисунок 7. Расчет скоростей в камере смешения плазматрона конфузорного типа

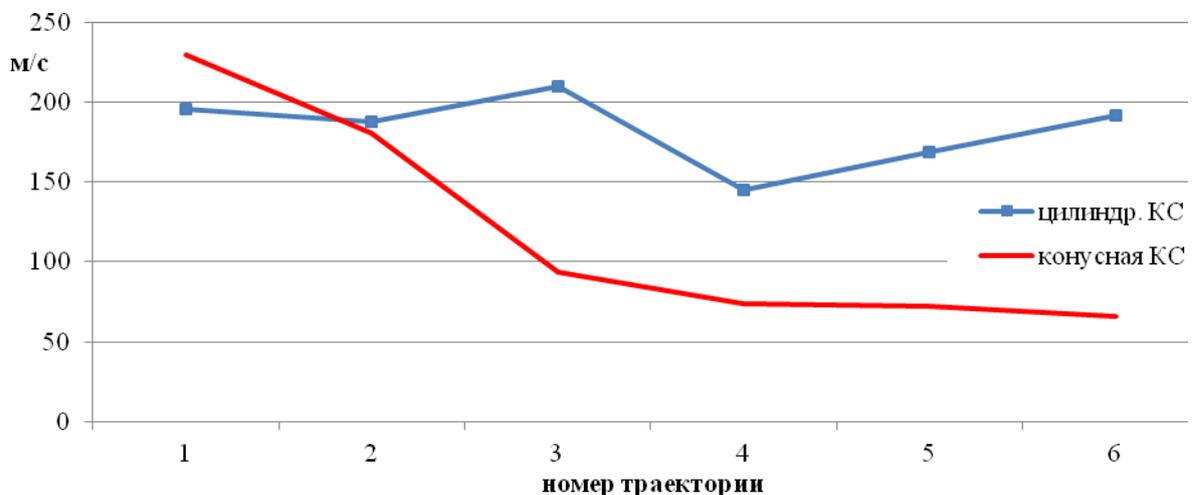


Рисунок 8. Средние скорости в плазматронах с цилиндрической и конфузорной КС

На рис. 6 и 7 представлены результаты расчетов скоростей газовых потоков в камерах смешения двух типов – цилиндрической (рис. 6) и с конфузорной (рис. 7). Расчеты выполнены вдоль траекторий по направлению оси  $Y$  (рис. 5). Нумерация линий – от оси КС. Видно, что наибольшие скорости (до значений порядка 1200 м/с) наблюдаются на начальном

участке плазменной струи длиной менее 1 см, где плазменный поток формируется преимущественно за счет основного потока ПОГ. На удалении более 2-х см от начала расчетной области в КС скорости стабилизируются и в областях смешения потоков составляют порядка 150-200 м/с в цилиндрической и 75-150 м/с в конфузорной КС. Оценка средних скоростей

потоков вдоль расчетных линий (рис. 8) показывает, что в цилиндрической камере смещения существенного изменения скоростей по мере удаления от оси КС не наблюдается, а при наличии конфузурности средние скорости по мере удаления от

оси уменьшаются в 2-3 раза, что, очевидно, связано как с изменением траекторий движения потоков, так и со снижением температуры потока на удалении от оси в КС конусного типа.

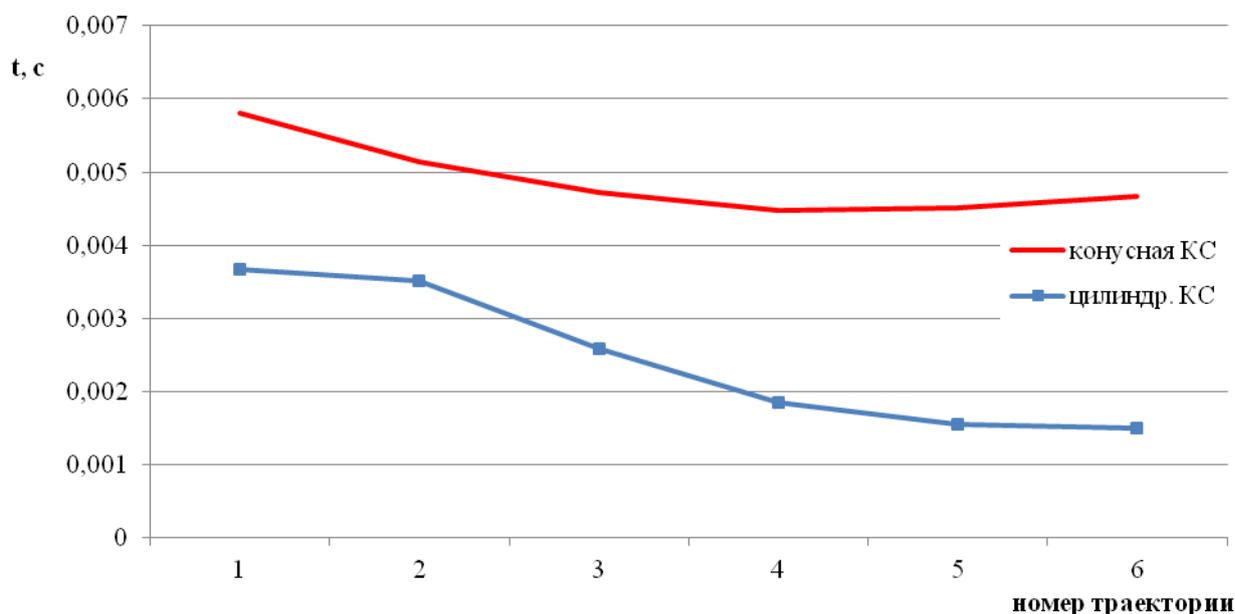


Рисунок 9. Времена нагрева в плазматронах с цилиндрической и конфузорной КС

Результаты расчета скоростей потока позволяют при заданных размерах плазматрона оценить время пребывания утилизируемого газа в камере смешения. Представленные на рис. 9 результаты свидетельствуют о характерных временах нагрева менее 0,01 с вдоль выбранных линейных траекторий. В связи с тем, что действительная траектория движения вторичного потока представляет собой в КС сложную геометрическую линию, реальное время нагрева должно быть выше. При аппроксимации траектории винтовой линией оценки времени нагрева дают его примерно двукратное увеличение для наиболее удалённых от оси областей перемещения, которое, однако, остаётся в диапазоне оценки до 0,01 с. Следует также заметить, что увеличение времени нагрева в областях с несколько меньшей температурой (вблизи стенок КС) способствует повышению эффективности обезвреживания. Такой же вывод можно

сделать и при сравнении влияния двух типов КС на время нагрева. При конфузорном типе КС время нагрева увеличивается в 1,5-3 раза в зависимости от траектории, причем наибольшее увеличение происходит вблизи стенок КС.

Как уже было отмечено, основным преимуществом технологии плазменной инсинерации является достижение высоких температур энергетического воздействия на продукт утилизации, обеспечивающих минимальное время термокинетического распада молекул токсичных веществ. Для оценки эффективности термокинетических процессов помимо скоростей и времён нагрева были определены температуры газовых потоков в КС. Результаты расчетов температур представлены на рис. 10 и 11 (для плазматрона с цилиндрической КС) и на рис. 12 и 13 (для плазматрона с конфузорной КС). Анализ данных результатов свидетельствует о существенном изменении темпера-

тур в объеме КС. При характерной для данного типа плазматрона длине плазменной струи в пределах 0,1 м и температуре 7000 К возникает значительный градиент температур (от 2000 до 6000 К) в радиальном направлении от оси КС с существенным снижением (от 1500 до 2500 К) в оставшейся за пределами плазменной струи области цилиндрической камеры смешения. Для плазматрона с конфузорной КС наблюдается более эффективный нагрев в области плазменной струи (от 2500 до 6500 К) с минимизацией радиального температурного градиента в области КС вне плазменной струи. При этом в плазматроне с цилиндрической КС фактически отсутствует осевой градиент температуры за пределами плазменной струи, в отличие от плазматрона с конфузорной КС, в котором наблюдается снижение температуры примерно на 1000 К к выходу из КС. Данные выводы подтверждаются и графиками средних температур вдоль расчетных ли-

ний в КС различного типа (рис.14). Результаты, представленные на рис. 13 позволяют сделать необходимую для термокинетических расчетов оценку средних температур нагрева за время пребывания потока вторичного утилизируемого газа в камере смешения. Эти температуры составляют 3500-4500 К в областях, близких к оси КС и около 2500 К для более удаленных от оси областей. Для приближенной оценки эффективности плазменной инсинерации можно принять среднюю температуру нагрева в КС плазматрона для экотехнологий порядка 3000 К. Последний результат свидетельствует о существенных преимуществах плазменного метода по сравнению с известными технологиями пиролизного либо колосникового сжигания отходов, при которых максимальные температуры, как правило, составляют менее 1000 К и не обеспечивают эффективной деструкции вышеупомянутых супертоксиантов.

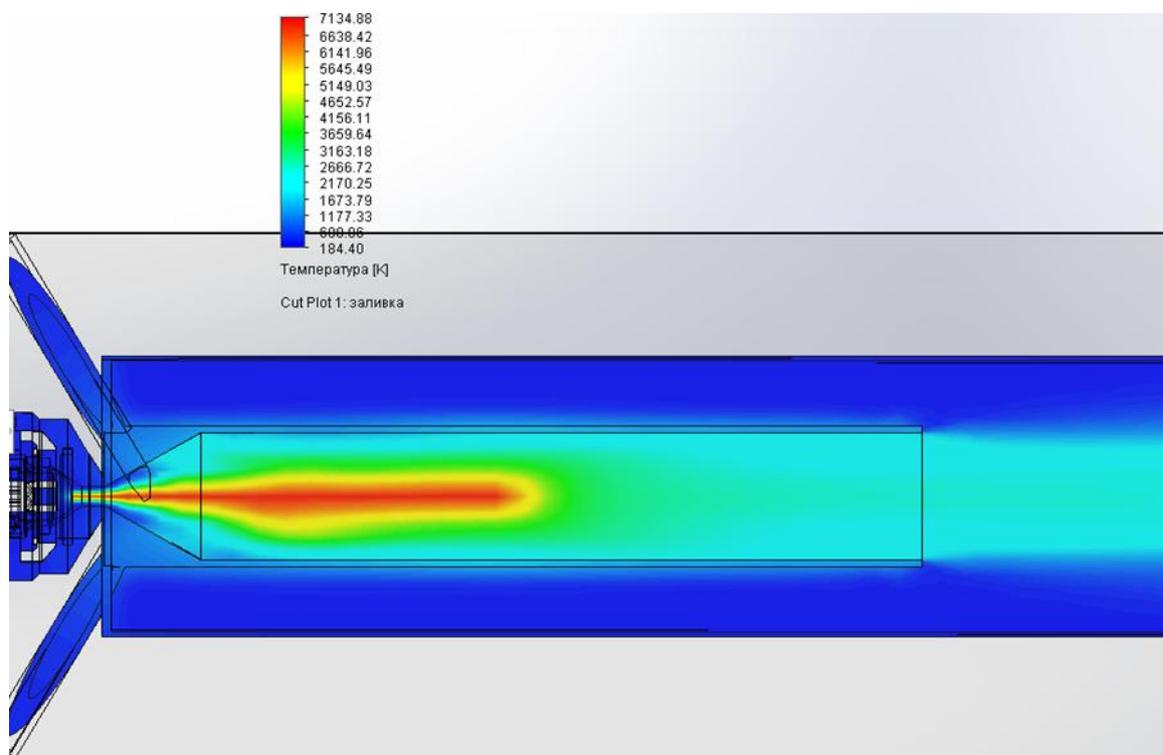


Рисунок 10. Распределение температур в плазматроне с цилиндрической КС

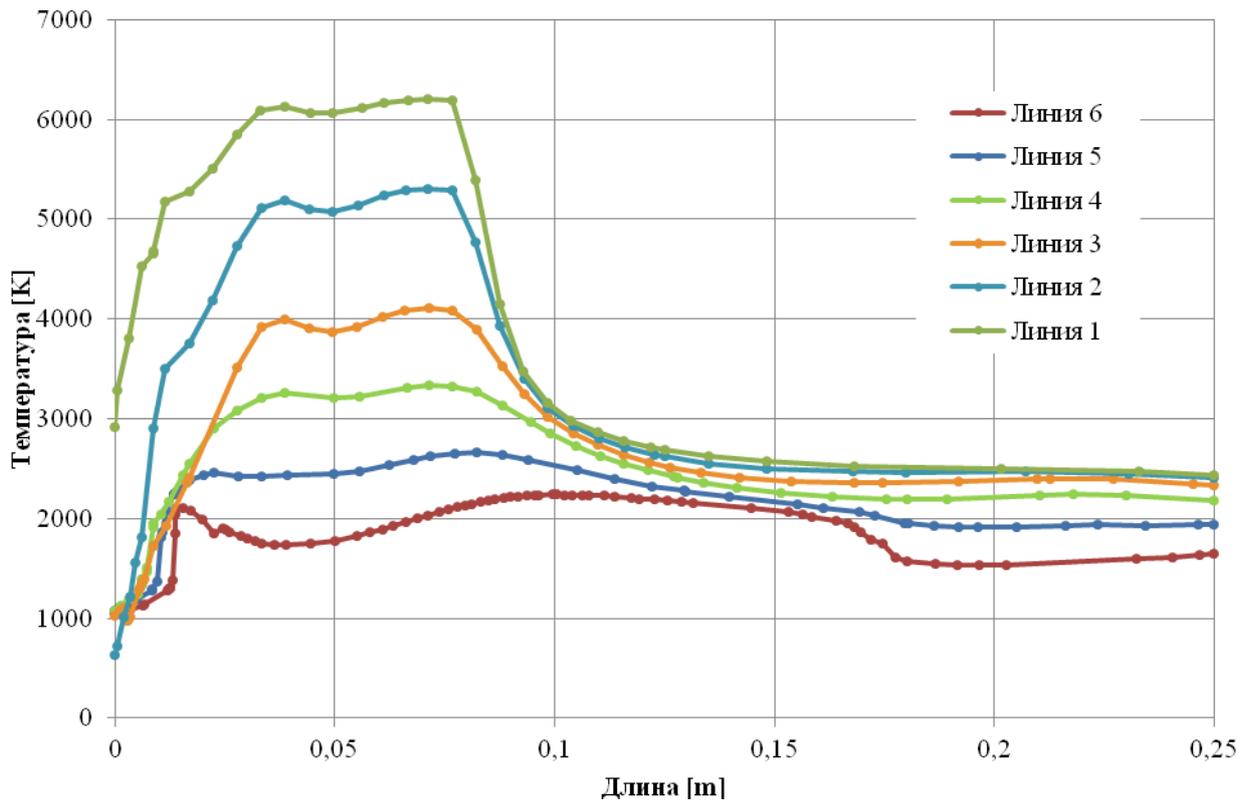


Рисунок 11. Распределение температур по траекториям в плазмотроне с цилиндрической КС

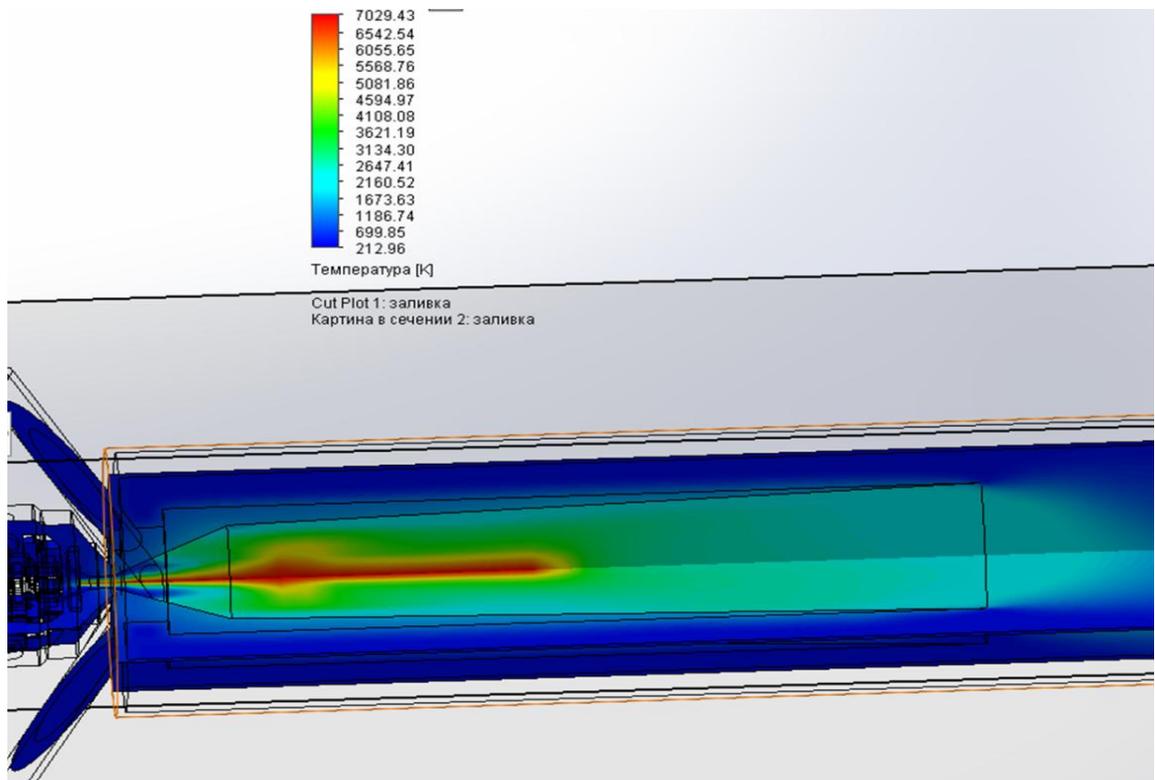


Рисунок 12. Распределение температур в плазмотроне с конфузорной КС

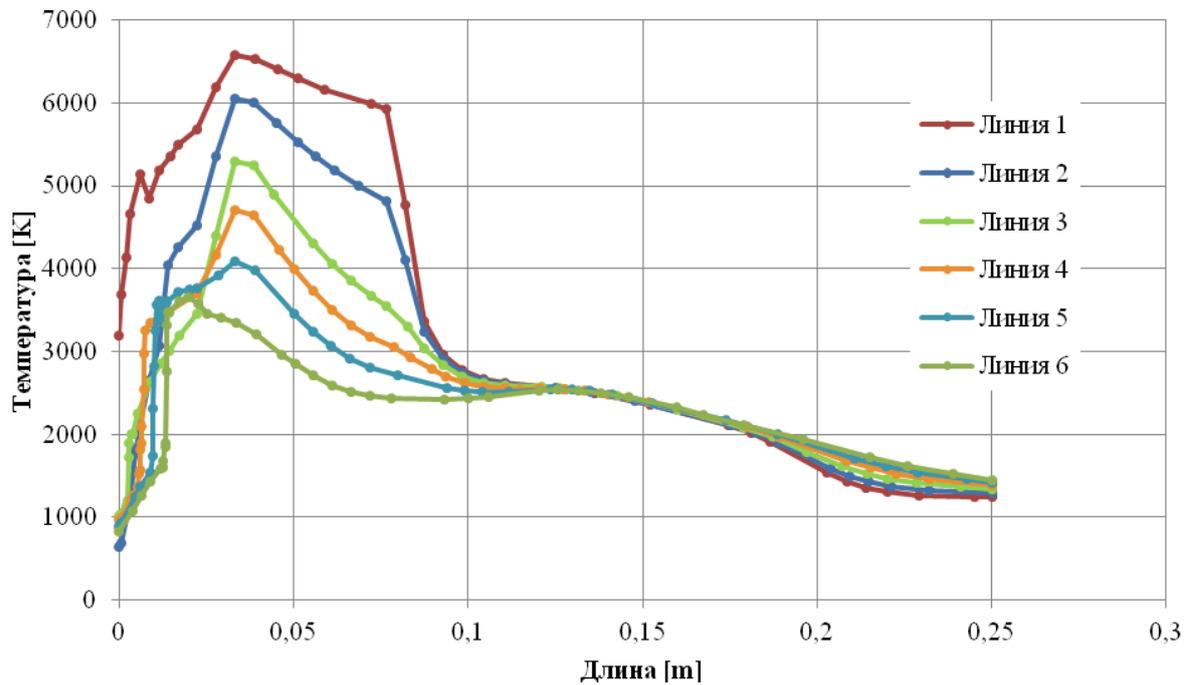


Рисунок 13. Распределение температур по траекториям в плазматорне с конфузорной КС

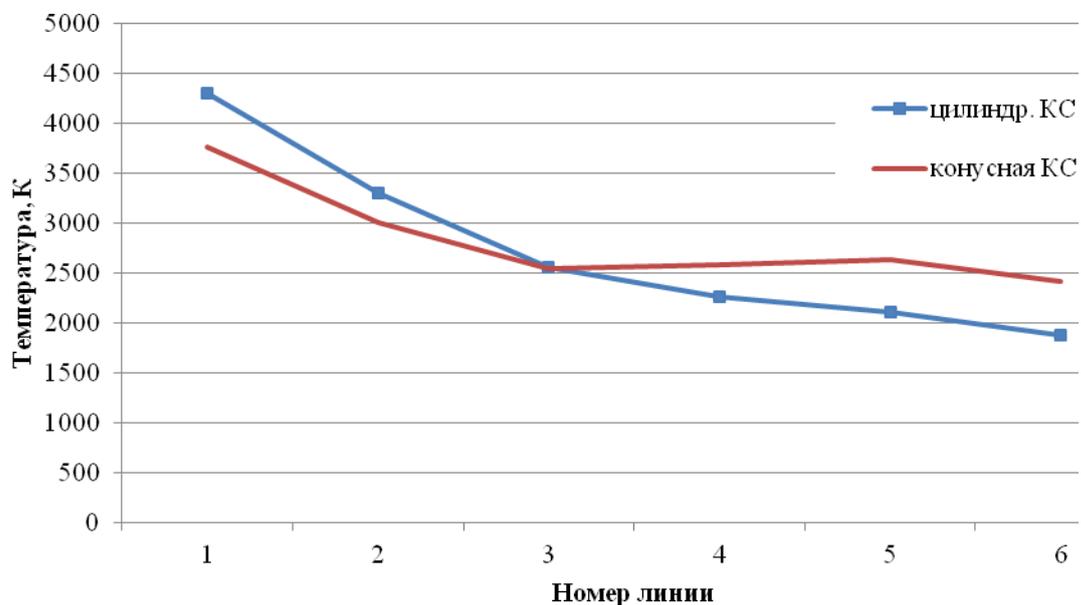


Рисунок 14. Средние температуры в плазматорнах с цилиндрической и конфузорной КС

Представленные результаты оценки газодинамических параметров технологии плазменной инсинерации позволя-

ют использовать их для расчета эффективности обезвреживания токсичных газов с применением заявленной конструк-

ции плазмотрона. При низкой эффективности обезвреживания технология может быть улучшена как конструктивно (за счет модификации размеров и геометрии КС), так и технологически (путем использования более высокоэнтальпийных газов или более мощных плазмотронов). Плазменное обезвреживание может осуществляться в окислительной или восстановительной среде с подачей воздуха, кислорода и других газов, за счет чего возникает возможность регулирования параметров среды с целью эффективного воздействия на конкретное утилизируемое вещество (диоксины, пестициды, гербициды и т. д.). Очевидно, что дополнительные исследования нужны в случае утилизации дисперсных материалов во вторичном потоке, а также конструирование и оценка эффективности системы

закалки (охлаждения), образующихся после плазменной деструкции продуктов распада. Одна из возможных технологических схем применения плазмотрона для экотехнологий (рис. 2 и 3) в реакторе для дожигания отходящих после термического обезвреживания газов представлена на рис. 15.

Потенциальными потребителями технологий плазменной инсинерации отходов являются учреждения и центры по переработке отходов, мусоросортировочные комплексы в крупных городах, структурные подразделения МЧС (министерства по чрезвычайным ситуациям) – в местах техногенных аварий, сельскохозяйственные и животноводческие комплексы – для захоронений инфицированной органики и т. д.

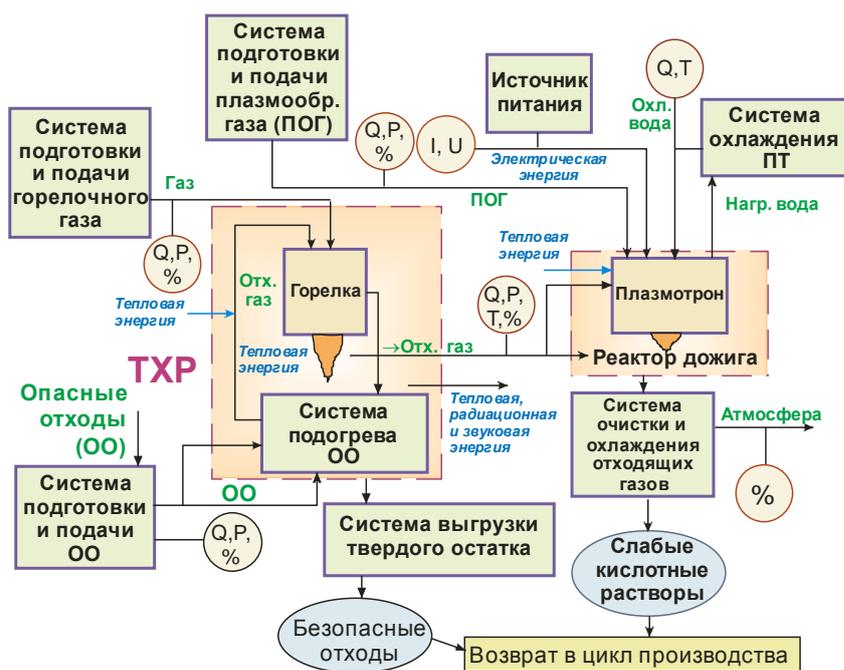


Рисунок 15. Материально-энергетическая схема обезвреживания опасных отходов с плазменным дожиганием отходящих газов (ПТ – плазмотрон, ИП – источник питания, датчики контроля:  $I$  – сила тока,  $U$  – напряжение,  $Q$  – расход,  $P$  – давление,  $T$  – температура, % – состав)

#### Литература

1. Чердниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 602 с.
2. Chernets I., Nirenberg G., Fridman A., Rabinovich A. Development of high-power plasma reformer and power supply for large scale applications// 20th International Symposium on Plasma Chemistry, July 24–29, 2011.

3. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Экологическое проектирование: стратегии и технологии. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 125 с.

4. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Шакуров С.А. Системные принципы в решении задач экологической безопасности с применением плазменных технологий // Экология и промышленность России. 2014. №1. С.4-9.

5. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. P.978.

6. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. 144 с.

7. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Шакуров С.А.. Патент РФ № 67909 на полезную модель «Плазмотрон» от 22.05.2007.

#### References

1. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. Plazmennye ehlektrotekhnologicheskie ustanovki (Plasma electrotechnological installations). Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011. 602 p.

2. Chernets I., Nirenberg G., Fridman A., Rabinovich A. Development of high-power plasma reformer and power supply for large scale applications// 20th International Symposium on Plasma Chemistry, July 24–29, 2011.

3. Anakhov S.V., Pykin Yu.A. Ekologicheskoe proektirovanie: strategii i tekhnologii (Ecological designing: strategy and technologies). Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 125 p.

4. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Shakurov S.A. Sistemnye principy v reshenii zadach ehkologicheskoy bezopasnosti s primeneniem plazmennyh tekhnologij (System principles in the decision of ecological safety problems with application of plasma technologies) // Ecology and the industry of Russia. 2014. №1. P.4-9.

5. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. P.978.

6. Anakhov S.V. Printsipy i metody proektirovaniya v ehlektroplazmennykh i svarochnykh tekhnologiyakh: uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ros. gos. prof.-ped. un-ta, 2014. 144 s.

7. Pykin YU.A., Anakhov S.V., SHakurov S.A. Patent RF №67909 na poleznuyu model' «Plazmotron» 22.05.2007.