

Управление процессом плазменной переработки твердых органических отходов

Петров С.В., Д.Т.Н., Бондаренко С.Г., К.Т.Н.,
Дидык Е.Г., инж, Дидык А.А.

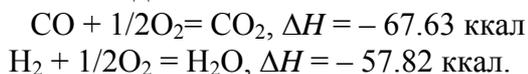
Плазменная переработка твердых органических отходов - новый экологически чистый процесс конвертирования (газификации) отходов, в том числе опасных и вредных, в ликвидный продукт - высококачественный горючий синтез газ. Традиционные процессы утилизации отходов исчерпали свои экологические и технологические возможности, а в связи с быстрым ростом накопления отходов ориентация на них ведет в тупик. Сегодня плазменная технология признана как передовая и находится на стадии активного развития для крупнотоннажной переработки отходов. В развитых странах в последние годы вводятся в эксплуатацию новые заводы с плазменной переработкой отходов. Все они базируются на близкой идеологической основе – используются мощные воздушные плазмотроны (сотни киловатт – мегаватты) с добавкой водяного пара. Качественный скачок в процессе переработки отходов ожидается при переходе на чистую водяную плазму. Сегодня отсутствуют какие-либо технические средства, кроме плазмотронов, позволяющие разогреть большие количества водяного пара до плазменного состояния. А уровень развития плазмотронной техники позволяет утверждать, что мощные электродуговые генераторы водяной плазмы, устойчиво и надежно работающие в течение длительного времени, выходят из лабораторий и в ближайшем будущем могут занять свое место в промышленности.

Плазма является уникальным источником химико-термической обработки материалов благодаря интенсификации плазмохимических превращений высокой концентрацией энергии в единице объема, радиационными, акустическими и электромагнитными воздействиями. Пароплазменный процесс, нацеленный на получение из органических отходов высококачественного синтез газа, изначально имеет смысл практической реализации в качестве крупнотоннажного производства. Исходя из этого уровень необходимых мощностей плазменных установок составит от сотен киловатт до мегаватт.

Основные технологические и конструктивные особенности пароплазменных установок для переработки твердых органических отходов можно сформулировать следующим образом.. Плазменная технология, как альтернатива любым способам сжигания, заключается в переводе (разложении) сложных молекул всех веществ в очень простые в условиях экстремально высоких температур и при отсутствии свободного кислорода. В настоящее время разрабатывается новый, исключаяющий горение технологический процесс, основанный на использовании для высокотемпературной газификации указанных отходов водяного пара с высокими термодинамическими параметрами (температурой более 1000°C). При пароплазменной конверсии органических материалаов водяной пар является одновременно теплоносителем и реагентом. Выполненные оценки показывают, что для обработки (плазменной газификации) 1кг медицинских отходов (ориентировочный состав - 60% целлюлозы + 30% пластмасс + 10% жидкости) потребуется около 1 кВт-час электроэнергии, которая расходуется на диссоциацию этих веществ с получением синтезгаза (CO + H₂) в количестве 1,1 - 1,4 м³ из одного килограмма отходов. При этом происходят реакции конверсии:

- целлюлозы $C_6H_{10}O_5 + \text{тепло} \Rightarrow CH_4 + 2CO + 3H_2O + 3C \Rightarrow nCO + mH_2$
- полиэтилена $CH_2-CH_2-]n + H_2O + \text{тепло} \Rightarrow x CH_4 + y H_2 + zCO \Rightarrow nCO + m H_2$

При сгорании синтез-газа выделяется тепло:



С общей энергией $\Delta H = -125.45$ ккал. на один грамм-моль. Это соответствует 2800 ккал/нм³, что эквивалентно $3,26$ кВт-час электроэнергии. То есть, в результате конверсии 1 кг медицинских отходов, рассмотренного выше состава, образуется энергоноситель, обеспечивающий $3,59 - 4,56$ кВт-час в пересчете на электроэнергию. При использовании образующегося в процессе переработки синтез-газа для питания плазменной установки от дизель-генератора с к.п.д. на уровне 30% обеспечивается практически нулевой энергетический баланс процесса, когда необходимая для осуществления процесса энергия полностью обеспечивается за счет сгорания полученного синтез-газа, т.е. установка может работать в автономном режиме.

Схема процесса пароплазменной переработки отходов приведена на Рис.1, а технологическая схема пароплазменной установки на Рис.2.



Рис.1 Схема процесса пароплазменной переработки отходов

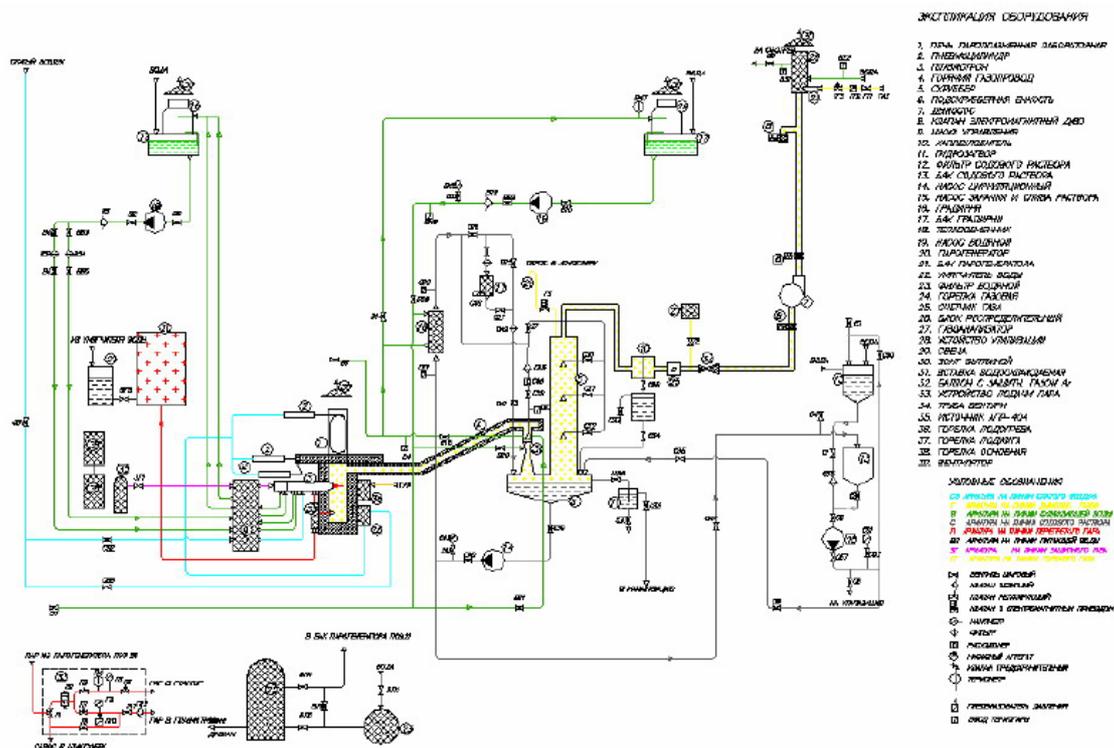


Рис.2. Технологическая схема пароплазменной установки

Требования к пароплазменной установке для переработки органических отходов заключаются в обеспечении:

1. постоянного заданного температурного режима плазменной печи;
2. необходимого давления газов;
3. заданных скоростей удаления газов и летучих компонентов;
4. согласованной работы плазматрона, системы удаления газов, подачи отходов, системы очистки;
5. Возможности точно и гибко управлять дозированием энергии;
6. возможности с высокой степенью повторяемости и стабильности осуществлять процесс газификации при цикличной подаче отходов с обеспечением равномерного расхода синтез газа.

На сегодняшний день в мире отсутствуют стандартные плазменные системы повышенной (сотни киловатт – мегаватты) мощности для генерирования паровой плазмы. Задача осложняется тем, что в плазмохимических установках для переработки отходов плазматрон должен одинаково эффективно работать на воздухе, смеси воздуха с водяным паром и чистом водяном пару. Плюс общие требования к такого рода технологическим плазматронам: высокий ресурс работы, простота обслуживания, ремонтпригодность, устойчивость работы и воспроизводимость всех параметров.

Среди множества схемных решений плазматронов пожалуй наиболее подходящим для данной технологии является плазматрон линейной схемы с вихревой газовой стабилизацией электрической дуги и полыми медными электродами (Рис.3а) или вольфрамовым термокатодом (Рис.3б).

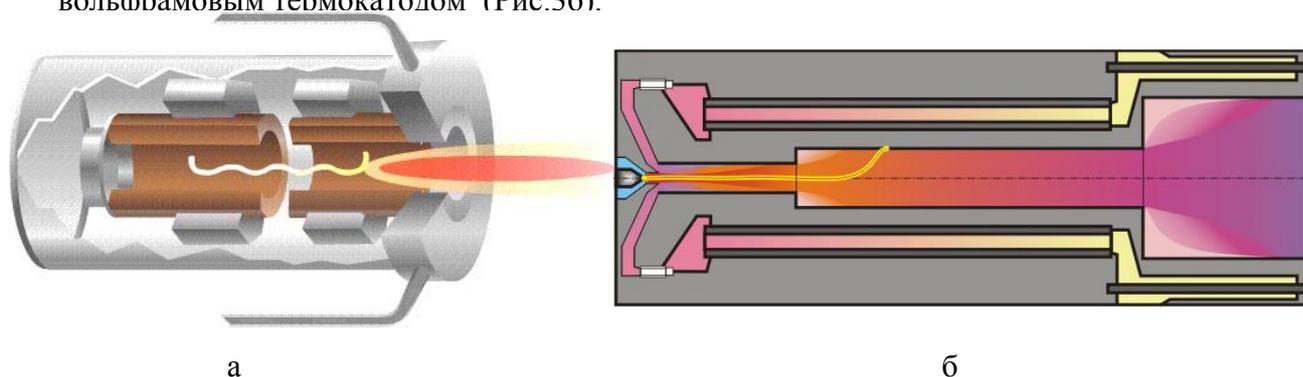


Рис.3. Плазматрон с полыми медными электродами (а), вольфрамовым термокатодом (б)

Исходя из изложенного, средства реализации управляющих алгоритмов для каждой плазменной установки могут отличаться, но есть общий алгоритм функционирования как отдельных систем, так и технологической установки в целом. Главной является система источника электропитания – плазматрон. Источник электропитания должен обеспечивать устойчивое горение электрической дуги, поддержание и регулирование электрических режимов плазматрона в заданных пределах, переход из одной точки фазового пространства в другую по заданной траектории. Электрическая дуга, как элемент электрической цепи питающей системы, отличается существенно неоднородными условиями по длине дугового столба. Её горение сопровождается многообразием сложных взаимосвязанных физических явлений, электромагнитных, тепловых, газодинамических, химических и др. Электрическая дуга, как элемент электрической цепи, характеризуется прежде всего взаимосвязью тока и напряжения, т.е. статическими и динамическими характеристиками. Статические характеристики точно описываются полиномиальной моделью и для плазматронов Рис. 3 а,б имеют вид (Рис.4а,б)

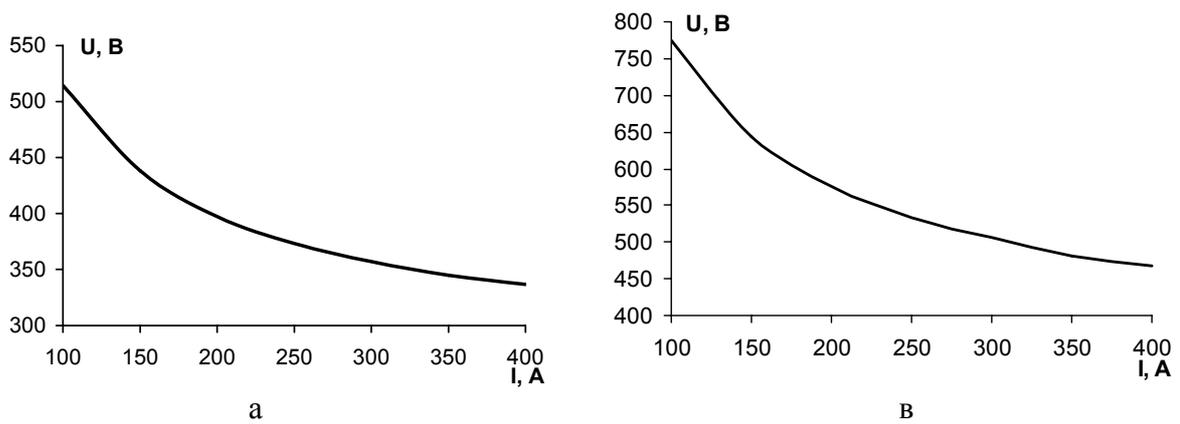


Рис.4. Зависимость напряжения на дуге от тока при расходе воздуха (а) 5 г/сек, пара (б) 5г/сек.

Динамические вольт-амперные характеристики электрической дуги важны для анализа устойчивости и переходных процессов в питающей системе. При больших скоростях изменения тока тепловое состояние дуги может не успевать изменяться соответственно, поэтому напряжение и проводимость зависят от скорости изменения тока. Здесь необходим учет инерционных свойств дуги. Постоянная времени дуги в приведенных плазмотронах находится в пределах $0,5 - 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек, а учет инерционности необходим при скорости изменения тока более 10 А/сек.

Переходные процессы в системе «источник – дуга» в отличие от линейного активного сопротивления чрезвычайно динамичны. Возмущающие воздействия могут быть внешними, такими как колебания напряжения в сети, так и внутренними, вызванными пульсациями схемы выпрямления (300 Гц), газодинамической и электродинамической неустойчивостями. Пульсирующий характер питающего напряжения является недостатком, однако при наличии достаточной индуктивности сглаживающего фильтра считается, что все выводы, построенные для статической вольт-амперной характеристики источника, построенные для действующих (или средних) значений тока и напряжения применимы для динамической характеристики. Это оправдано для малых возмущений.. При определенных условиях система электрическая дуга источник входят в электрогазодинамический резонанс. Когда совпадает частота колебательного контура LC источника с собственной частотой пульсации приэлектродных участков дуги, обусловленных шунтированием. Для данного случая эта частота равнялась 10 кГц.

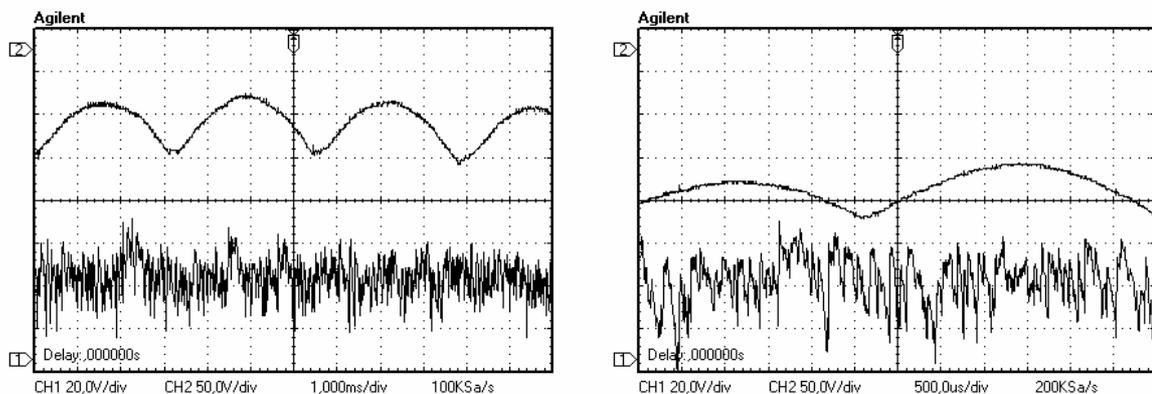


Рис.5 Типичные осциллограммы тока и напряжения плазмотрона (Рис.3б).

Принципиально иная ситуация возникает в динамике плазмотрона (Рис.3а).

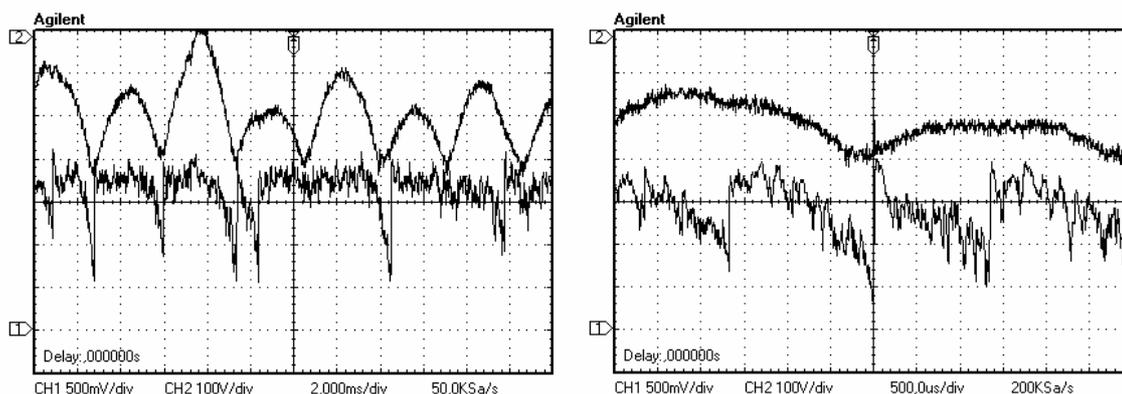


Рис.6 Типичные осциллограммы тока и напряжения плазмотрона (Рис.3а).

Здесь отчетливо видно, что плазмотрон с полыми медными электродами работает в условиях постоянных переходных процессов и дуга в нем менее стабильна. При более подробном изучении процессов шунтирования в таком плазмотроне было обнаружено новое явление генерирования затухающих гармонических колебаний с частотой порядка 1 МГц после шунтирования дуги (Рис.7а,б)

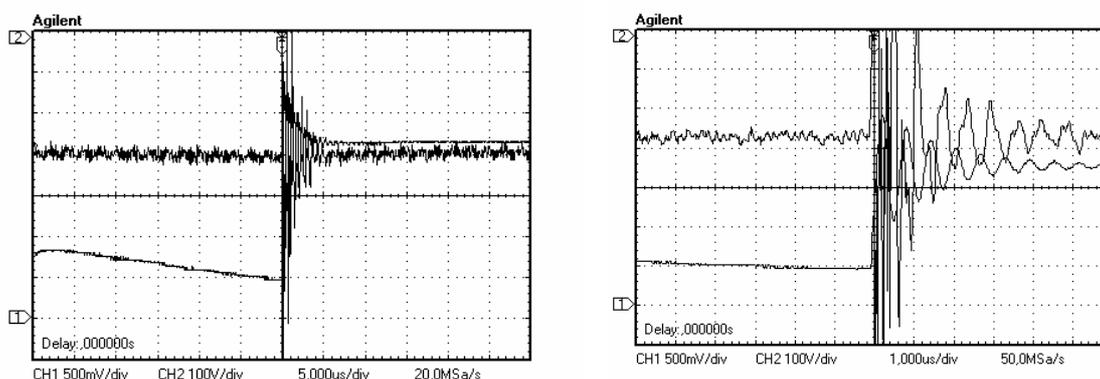


Рис.7. генерирование затухающих гармонических колебаний

Переход к режиму горения дуги (Рис.7) сопровождается удлинением начального участка плазменной струи в 1,5 – 2 раза и увеличением интенсивности излучения. Это свидетельствует о затягивании релаксационных процессов в плазме и наиболее вероятно связано с возникновением колебательной неравновесности. В работе [1] было показано, что энергия ультразвуковых акустических колебаний, вызванных в данном случае электромагнитными колебаниями в дуге, усиливается за счет обращения второй вязкости в неравновесном газе и может существенно влиять на параметры потока плазмы. Этот интересный феномен требует более глубокого изучения, вместе с тем его качественный учет в нагреве печи и материала, а также влиянии на плазмохимические реакции уместен в рамках данной работы.

В плазмотронах повышенной мощности за счет растягивания электрической дуги и интенсификации её охлаждения с переходом на пар напряжение на дуге повышается (Рис. 4) постоянная времени дуги снижается, поэтому возрастают требования к динамическим характеристикам источника. Эти характеристики определяются параметрами схемы управления, силового регулятора и фильтра. Требования к ним распространяются на широкий диапазон частот: низший (инерционность процессов в плазменной установке) определяется газодинамическими, химическими и тепловыми явлениями составляет доли Гц, верхний – процессами ионизации и де ионизации составляет несколько МГц. Работа плазмотрона в нестационарных и переходных режимах определяется алгоритмом работы

источника электропитания, поэтому в модели управления установкой пароплазменной переработки отходов дуга плазмотрона рассматривается как безинерционный элемент со статической нелинейной характеристикой (Рис.4).

Алгоритм управления пароплазменной переработкой органических отходов обеспечивает получение оптимальных значений следующих параметров процесса:

- температурный режим рабочего пространства печи при её разогреве и работе с циклической загрузкой отходов;
- давление, химический состав и скорость отходящих газов;
- очистка отходящих газов.

Эти параметры в той или иной степени зависят от целого ряда управляющих воздействий, которые в определенных пределах изменяются независимо друг от друга. Температурный режим рабочего пространства печи при её разогреве и работе – один из главных технологических параметров и обусловлен следующим. Натурные испытания подтвердили выводы термодинамического анализа [2] об уникальном свойстве водяного пара при высокой температуре – способность полностью извлекать углерод из всех твердых соединений с его переводом в газ (СО). При температуре паровой конверсии более 900 °С в системе отсутствует равновесный углерод. Поэтому вопрос полной газификации углерода из всех соединений определяется только кинетикой процесса. Среднемассовая температура газов всегда выше на 300 – 700 °С температуры стенки. Верхнее значение рабочей температуры стенки определяется стойкостью материала, нижнее значение – условиями газификации. На Рис.8 приведена расчетная диаграмма разогрева плазменной вихревой печи (Рис.9), она совпадает с точностью $\pm 5\%$ с реальными замерами.

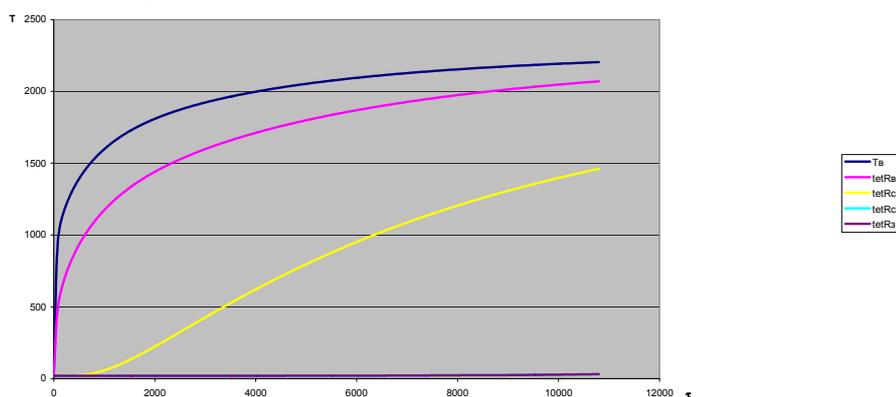


Рис.8. Диаграмма разогрева плазменной вихревой печи

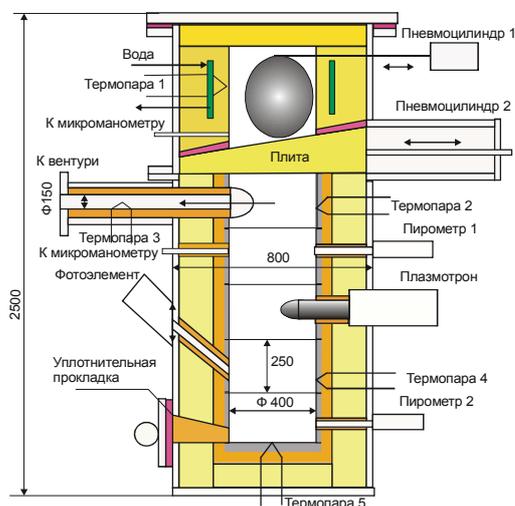


Рис.9. Плазменная вихревая печь

Функции управления:

1. Поддержание постоянного уровня температуры стенки печи. Управляющий сигнал от термопары (пирометра) – команда на источник электропитания плазмотрона: регулирование тока дуги (мощности плазменной струи) с учетом инерционности тепловых процессов.
2. Поддержание постоянного заданного разряжения в печи. Управляющий сигнал – перепад давления (атмосферное – печь) – команда на привод преобразователя частотно регулируемого асинхронного двигателя вентилятора.
3. Поддержание заданной степени конверсии отходов. Управляющий сигнал с газоанализатора – команда на электромагнитный клапан пара с учетом инерционности процесса.
4. Поддержание оптимальной скорости загрузки. Управляющий сигнал от газоанализаторов и термопары – команда на пневмопривода механизма загрузки.
5. Поддержание уровня жидкости в подскрубберной ёмкости и заданного значения концентрации исходного поглощающего раствора (принят 10 % раствор кальцинированной соды (Na_2CO_3) – команда от уровнемеров и датчика Ph на насос подкачки свежего раствора.

Для обеспечения управления и контроля параметров плазменнопаровой установки создан автоматизированный комплекс, что свелось к разработке и интеграции в силовую схему нескольких независимых систем.

1) Система приготовления газовых смесей и водяного пара – осуществляет управление массовым расходом газа и пара одновременно в нескольких технологических газовых линиях; мониторинг давлений в газовых линиях; отображение и архивацию данных о состоянии давлений и расходов газов; отслеживание и оповещение оператора о внештатных ситуациях в системе газосмещения.

2) Система пуска, остановки и контроля характеристик дугового разряда в плазмотроне – обеспечивает измерение тока и напряжения дугового разряда; отключение чувствительного оборудования при пуске плазмотрона мощным импульсным генератором; мониторинг срыва разряда и безопасное отключение установки; отображение и архивацию измеренных значений токов и напряжений.

3) Система подачи и дозировки материала – обеспечивает предустановку параметров пневмоприводов; определение расхода материала; сохранение установок и расчетного значения расхода в архиве результатов измерений.

4) Система управления вспомогательными технологическими устройствами – обеспечивает включение насосов, клапанов, вентиляторов; мониторинг и управление работой вентилятора высокого давления; подачу сигналов исполняющим насосам подкачки раствора скруббера.

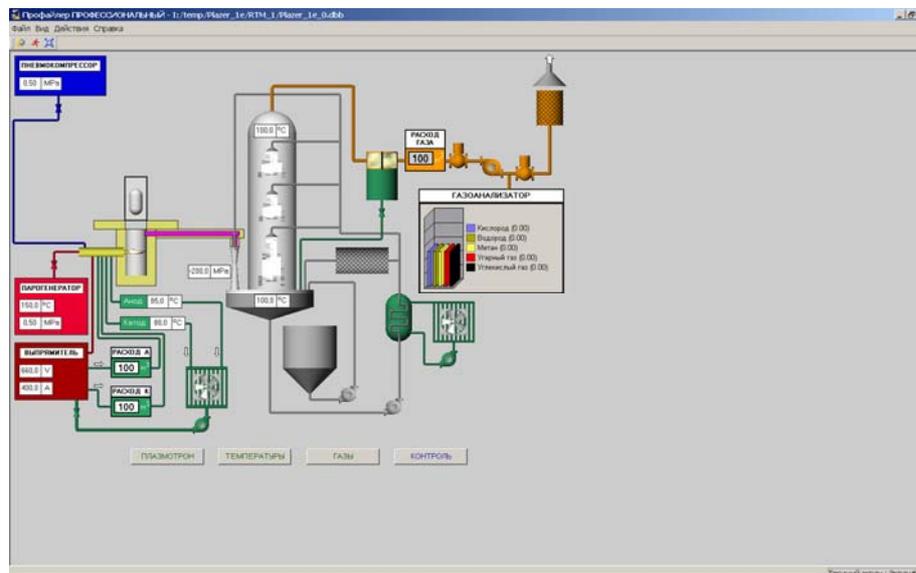
5) Система охлаждения – обеспечивает мониторинг расхода охлаждающей жидкости в нескольких каналах охлаждения; измерение температуры охлаждающей жидкости на входе и выходе каждого из каналов; отображение и архивацию результатов измерений температур и расходов жидкости; блокировку пуска плазмотрона в отсутствие циркуляции охлаждающей жидкости; отслеживание и оповещение оператора о внештатных ситуациях в системе охлаждения.

6) Система мониторинга температуры – обеспечивает каналы для измерения температуры в различных точках системы; отображение и архивацию результатов измерений температуры.

7) Система мониторинга разрежением в рабочем тракте, расходом и составом отходящих газов.

8) Система мониторинга за опасной концентрацией водорода и угарного газа в помещении, оповещение оператора о внештатных ситуациях и аварийное отключение.

С учетом высоких требований к частоте дискретизации по каждому из измерительных каналов (10 отсчетов в секунду), в качестве платформы для создания автоматизированного комплекса было выбрано 10. Рабочие окна интерфейса управляющей программы приведены на рис. 10.



Заключение.

В заключение можно отметить, что все поставленные в рамках проекта задачи были успешно решены, а эти решения воплощены в единой системе автоматизированного управления и сбора данных. При решении настоящей задачи отработаны методы управления температурой рабочего пространства печи, разрежением, расходами и давлениями синтез газа с возможностью получения смесей с высокой степенью точности пропорций CO/H₂. При использовании специфических датчиков создаются реальные предпосылки получения высококачественного синтез газа из органических отходов неизвестного содержания. Отработана задача высокоточного многоканального измерения температуры, разрежения, расходов с дружественной эргономичной системой градуировки.

На базе разработанных алгоритмов в дальнейшем могут быть построены автоматизированные системы для проведения измерений и управления различными технологическими и исследовательскими установками и стендами, включая оборудование предприятий химической, биологической и медицинской отраслей.

Литература

1. Петров С.В., Сааков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев: ТОПАС, 2000, - 220 с.
2. С.В. Петров, Г.С. Маринский, В.Н. Коржик, В.М. Мазунин Применение пароплазменного процесса для пиролиза органических, в том числе медицинских и других опасных отходов "Современная электрометаллургия" №2, 2006 г. с. 44 -50