

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И УНИЧТОЖЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ.

В.В. Савчин, А.Л. Моссе

Институт тепло- и массообмена, Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь, mosse@itmo.by

Увеличивающиеся объемы накапливаемых отходов, в том числе радиоактивных и медико-биологических, содержащих радионуклиды, представляют серьезную опасность для человека и окружающей среды. Как правило, состав таких отходов весьма разнообразен и не поддается точной идентификации. Радиоактивные отходы (РАО) образуются, прежде всего, при эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) и ядерных установок, за счет применения радионуклидов в промышленности, медицине и научных исследованиях. А также при проведении дезактивации территорий, загрязненных в результате технологической деятельности и вследствие аварий, или образующихся при переработке природного сырья. В состав РАО могут входить: текстиль, бумага, древесина, строительные материалы, изделия из керамики, стекла, изделия из резины, полимерных материалов и пластмассы, металлы и другие отходы. Средний элементный состав РАО (% по массе): С - 50,5; Н - 50,5; О - 31,0; N - 2,5; S - 0,2.

Медико-биологические отходы (МБО) в большинстве случаев содержат токсичные вещества и вредные биологические формы (вирусы, микробы, штаммы, прионы), типичный фазовый состав: 50-60 % по объему составляют жидкости, 20-40 % - твердые вещества, 10-20 % - газы [1]. Содержание неорганических веществ составляет примерно 50 %, средняя теплотворная способность около 4000 ккал/кг. Следует отметить, что санитарно-гигиенические исследования типичных МБО, выполненные в различных странах, показывают, что их опасность для человека и окружающей среды значительно выше, чем у большинства химических отходов.

Для утилизации таких отходов необходимо использовать специальные технологии [2-5]. Исследования, проводимые в индустриально развитых странах, направлены на разработку новых технологий и оборудования для эффективной переработки РАО и МБО. Работы по переработке РАО и МБО плазменными методами выполняют ряд зарубежных организаций и фирм. Известны работы организаций США: Агентство по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency – EPA); Айдакская национальная техническая лаборатория – INEL (Комплекс по переработке и удалению радиоактивных отходов – RWMC, Айдахо); Plasma Energy Corporation. (Северная Каролина); Westinghouse; Plasma Technology Inc; Alliant Thechsystems; Integrated Environmental Technologies, LLC (PEM – Plasma Enhanced Melter). Фирма IET поставила свое оборудование следующим компаниям: Allied Technology Group, Inc.'s (ATG) (Richland, WA), где используется система для сжигания опасных и радиоактивных отходов G200 PEM™; Asia Pacific Environmental Technology's (APET) Hawaii Medical Vitrification (HMV) (Honolulu, HI) - используется установка для переработки медико-биологических отходов G100 PEM™; Global Plasma in Taiwan (Тайпей, Тайвань) - установлена плазменная система G100 для переработки медицинских отходов. К числу наиболее известных и успешных компаний, работающих в сфере переработки РАО и МБО, также следует отнести: «NUKEM» и «SIEMENS» (Германия); «Europlasma»,

«Lohrplasma» и «APIT SA» (Франция); «Mitsubishi Heavy Industries» и «Prometron Technic Corporation» (Япония).

Даже простой перечень организаций и компаний убеждает, что одним из наиболее перспективных направлений решения этой проблемы является применение плазменных методов. При этом основными достоинствами метода являются достаточно высокая производительность при малых габаритах оборудования, возможность создания желательной газовой атмосферы, возможность совместной переработки различных видов РАО и МБО без их предварительной сортировки, возможность получения высокотемпературных форм остаточных отходов, обладающих исключительной химической и радиационной устойчивостью и механической прочностью. Высокие температуры процесса (1500-2000 °С) обеспечивают большую глубину переработки исходных отходов и эффективное уменьшение их объема. Из высокотемпературных форм стабилизированных остаточных отходов наибольший интерес представляют искусственные камни – синтетические аналоги горных пород, являющиеся стабильными в течение длительных геологических периодов. Данная технология утилизации РАО и МБО может быть реализована только в плазменных печах [6-8].

Начало технологических исследований и разработок специального оборудования для реализации плазменного метода переработки было положено в Институте тепло- и массообмена НАНБ. Затем эти работы в силу своей специфики были продолжены совместно ИТМО и МосНПО «Радон», в том числе и на производственной базе МосНПО «Радон» (Сергиев-Посад, Россия), где в настоящее время функционируют пилотная установка «Пиролиз» и опытно-промышленная установка «Плутон». Одним из практических результатов этой работы было совместная (ИТМО и МосНПО «Радон») разработка и создание в Японии на базе фирмы Prometron Technic Corp. плазменной шахтной печи для переработки медицинских отходов, в том числе содержащих радионуклиды, которая получила дальнейшее использование в муниципальном госпитале г. Токио.

Работы по созданию печи сжигания с плазменным нагревом, применительно к радиоактивным отходам, образующимся непосредственно на АЭС, впервые были начаты во Всероссийском проектно и научно-исследовательском институте комплексной энергетической технологии (ВНИПИЭТ, С.-Петербург, Россия). Разработка плазменных горелочных устройств (ПГУ), с использованием электродуговых плазмотронов типа ПДС-3 и их модификаций, а также методов расчета и оптимизации режимов работы плазменной двухкамерной печи, были выполнены сотрудниками ГНУ ИТМО НАНБ, имеющими достаточно большой опыт в области разработки и исследований плазмотронов и плазменных шахтных печей, а также оборудования для очистки отходящих газов и систем энергообеспечения работы плазмотронов.

Двухкамерная плазменная печь. Печь сжигания РАО (по данным АЭС) представляет собой двухкамерную печь, схема устройства которой показано на рис. 1. При выборе схемы и конструкции печи сжигания РАО за прототип была принята печь, работающая на газовых или топливных горелках. Эта печь была рассчитана на использование топливных горелок, суммарная мощность которых составляет 300 кВт. В разработанной печи в качестве нагревательных элементов вместо горелок используются электродуговые плазмотроны, суммарная подведенная мощность которых составляет только 100 кВт. Изнутри камера сжигания печи и камера

дожигания - футерованы шамотным и диновым кирпичом. Объем камеры сжигания составляет $2,0 \text{ м}^3$, объем камеры дожигания – $0,6 \text{ м}^3$. Стартовый разогрев печи осуществляется до температуры $800 \text{ }^\circ\text{C}$, после чего в камеру сжигания печи подаются отходы. Производительность по перерабатываемому сырью – 75 кг/ч .

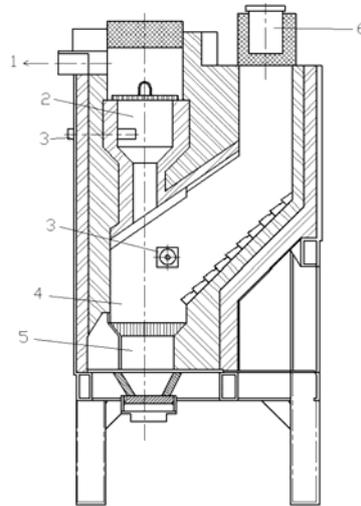


Рис. 1. Схема двухкамерной плазменной печи. 1 – выход в систему газоочистки, 2 – камера дожигания, 3 – плазматрон, 4 – камера сжигания, 5 – устройство выгрузки шлаков, 6 – шлюзовая камера загрузки.

Процесс работы печи начинается с ее нагрева, который осуществляется с помощью двух плазменных горелочных устройств, установленных в камере сжигания. Горелочное устройство представляет собой электродуговой плазматрон типа ПДС-3, установленный в специальном корпусе – фурме, которая охлаждается холодным воздухом расходом $30,0 \text{ м}^3/\text{час}$.

В соответствии с выбранной технологической схемой печи, процесс переработки отходов происходит в две стадии: первичное сжигание отходов в камере сжигания печи и последующее дожигание образующихся продуктов в камере дожигания, где должны обеспечиваться все экологические параметры горения, что при прямом сжигании в первичной камере сжигания печи выполнить невозможно. Дожигание на второй ступени должно обеспечиваться работой дополнительного - третьего плазматрона, установленного в камере дожигания, ось сопла которого смещена по отношению к оси камеры дожигания.

При эксплуатации плазменных печей различных конструкций, в том числе и приведенной выше двухкамерной плазменной печи, возникают вопросы подбора режимов работы плазменных горелочных устройств как при выведении печи на рабочие параметры (нагрев печи до рабочей температуры 800°C), так и работы ее в стационарном режиме переработки отходов. При сжигании РАО продукты не полного сгорания из камеры сжигания поступают в камеру дожигания, где, не смотря на дополнительный подвод тепла плазменной струей третьего плазматрона, не всегда возможно обеспечить необходимый оптимальный режим процесса дожигания. Если отходящие дымовые газы (ОДГ), содержат большое количество сажи и смолистых веществ, и поступают в систему очистки отходящих газов, последняя, не может обеспечить необходимые технологические и экологические параметры работы установки.

С целью оптимизации работы печи сжигания РАО комплекса по переработке ТРО выполнен анализ результатов двухлетней эксплуатации установки, разработана методика расчета режимов работы плазменной печи, и выполнены тепловой и газодинамический расчет вариантов работы печи. Расчет выполнен для двух камер печи: для камеры сжигания в режиме разогрева печи, и при подаче и сжигании реальных отходов; для камеры дожигания продуктов образующихся при сжигании отходов [8,9]. Тепловой и газодинамический расчет термохимического плазменного сжигания ОДГ в печи выполнялся с помощью модели движения, теплопереноса и термохимических превращений, адаптированной к геометрии и температурному режиму. Реальные условия теплообмена в плазменных печах не укладываются в классические схемы конвективного теплообмена (движение газов в канале, внешнее обтекание тел потоком и др.), поэтому для расчетов целесообразно пользоваться опытными данными, полученными непосредственно для условий теплообмена в высокотемпературных теплотехнологических устройствах.

Тепловой расчет камеры сжигания печи выполнен для следующих режимов работы:

а – нагрев камеры сжигания осуществляется двумя плазмотронами, каждый соответственно мощностью 50, 100 и 150 кВт. В каждую фурму ПГУ для охлаждения плазмотрона подается воздух с расходом $30 \text{ м}^3/\text{ч}$;

б – нагрев камеры сжигания осуществляется двумя плазмотронами, каждый соответственно мощностью 50, 100 и 150 кВт. В камеру сжигания подается воздух для охлаждения всех технологических устройств (фурм плазмотронов, глазков и датчиков печи) с суммарным расходом $170 \text{ м}^3/\text{ч}$;

в – нагрев камеры сжигания осуществляется двумя плазмотронами, каждый соответственно мощностью 50, 100 и 150 кВт. В камеру сжигания подается воздух для охлаждения всех технологических устройств (фурм плазмотронов, глазков и датчиков печи) и воздух для сжигания через колосники пода печи с суммарным расходом $470 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Результаты выполненных расчетов показали, что режимы (б) и (в) не обеспечивают тепловых параметров работы печи на стадии ее разогрева и сжигания отходов. В результате выполненного расчета также установлено, что для нагрева камеры сжигания печи и вывода ее на рабочий режим необходимо использовать два плазмотрона мощностью 150 кВт каждый (суммарная мощность 300 кВт), а дополнительный воздух для охлаждения технологических узлов и деталей подавать только в фурмы горелочных устройств. При этих условиях для нагрева печи до 800 -900 °С потребуется примерно 7-10 часов, что технологически приемлемо.

В реальных условиях работы двухкамерной печи при нагреве ее двумя плазменными горелочными устройствами (ПГУ) суммарной мощностью 100 кВт, с расходом плазмообразующего газа $30 \text{ м}^3/\text{час}$ и суммарным объемом дополнительно подаваемого воздуха до $170 \text{ м}^3/\text{час}$, за 7-8 часов работы удавалось нагреть камеру сжигания печи до температуры 300-400 °С, после чего начинали подавать РАО и температура в камере сжигания поднималась до 800-900 °С. Эти результаты достаточно хорошо коррелируются с данными, полученными в расчетах, которые показывают, что обеспечить предварительный нагрев печи до температуры 800°С двумя плазменными горелочными устройствами суммарной мощностью 100 кВт в технологический обоснованный период времени практически невозможно. Обеспечить вывод печи на

необходимый тепловой режим работы возможно только за счет подачи в камеру сжигания отходов, что практически было реализовано.

Результаты расчетов, в виде зависимости температуры в объеме печи от времени ее нагрева, при различной мощности ПГУ и времени разогрева печи от суммарной мощности плазмотронов при различных расходах плазмообразующего газа показаны на рис. 3 и 4.

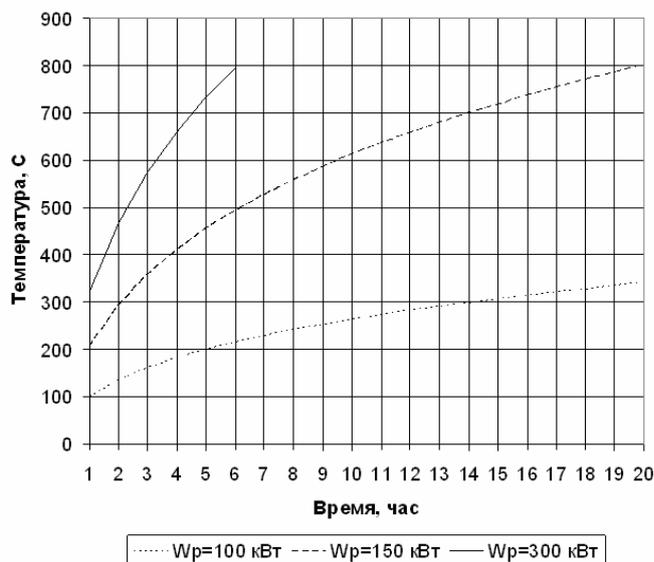


Рис. 3. Динамика нагрева печи

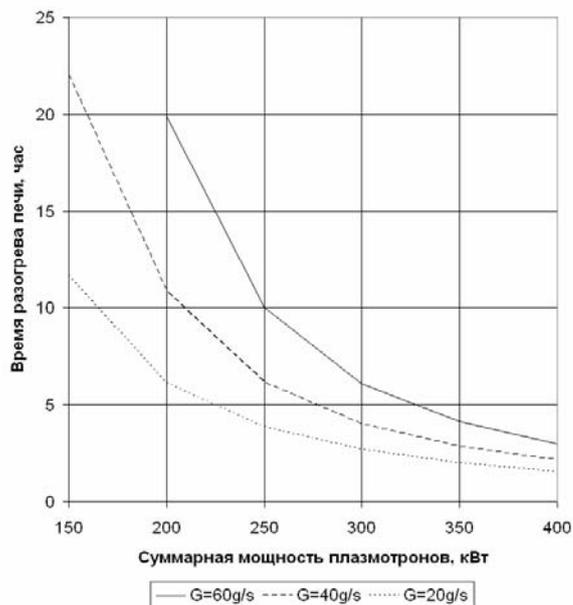


Рис. 4. Зависимость времени нагрева печи от мощности плазмотронов

По результатам выполненных расчетов были сделаны следующие рекомендации:

1. Для организации нормального и технологически обоснованного режима нагрева печи в течении 7-10 часов, на камеру сжигания печи следует установить два плазмотрона суммарной мощностью 300 кВт. Один из плазмотронов должен обеспечивать мощность 50 кВт, другой 250 кВт. Это обусловлено тем, что при выходе печи на режим сжигания отходов и поступлении дополнительного количества тепла от их сгорания, плазмотрон большей мощности можно отключить, чтобы избежать перегрева печи и снизить расход электроэнергии. При падении температуры печи ниже требуемой по технологии сжигания или в зависимости от состава отходов, можно в кратковременном режиме включать второй плазмотрон мощностью 50 кВт.
2. Для обеспечения необходимого технологического режима следует увеличить мощность плазмотрона, работающего на камеру дожигания до 150 кВт.

Шахтная плазменная печь. На основании выполненного анализа результатов работы двух вариантов технологических установок по переработке РАО среднего и низкого уровня активности, с учетом опыта сотрудников ГНУ ИТМО НАН Беларуси в разработке и создании аналогичных устройств, предложено новое техническое решение реализации процесса, которое на данном этапе представляется наиболее технически и экономически целесообразным. Твердые пакетированные или кусковые отходы перерабатываются в шахтной колосниковой печи в режиме пиролиза (с недостатком воздуха). Одновременно в печи могут перерабатываться горючие ЖРО (масла,

суспензии и др.). Образующиеся дымовые газы подвергают глубокому деструктивному разложению в камере дожигания специальной конструкции.

Разработанная в ГНУ ИТМО НАН Беларуси плазменная шахтная печь для термической переработки токсичных и радиоактивных отходов, схема которой показана на рис. 4, реализует наиболее надежный и эффективный метод переработки различных несортированных токсичных и радиоактивных твердых отходов, при котором горючая часть отходов сжигается, а их твердые остатки собираются в специальные емкости для последующего цементирования.

Печь может нагреваться как плазменными, так и плазмо-топливными горелками, которые обеспечивают температуру плавления неорганической части отходов до 1700 °С. В качестве плазменных горелочных устройств применяются электродуговые плазмотроны постоянного или переменного тока с водяным охлаждением электродов и газо-вихревой стабилизацией дуги. При необходимости топливная горелка модернизируется, и в качестве топлива могут сжигаться горючие органические отходы, содержащие различного рода вредные примеси - например, отработанные масла или токсичные растворители лаков и красок. Таким образом, печь позволяет совмещать переработку жидких и твердых отходов одновременно, а также снижать расход электрической энергии за счет использования тепла сжигаемых отходов. При использовании специального легкоплавкого состава шихты температура процесса может быть понижена до 1000 – 1100 °С, что позволяет остекловывать тугоплавкие оксиды различных металлов.

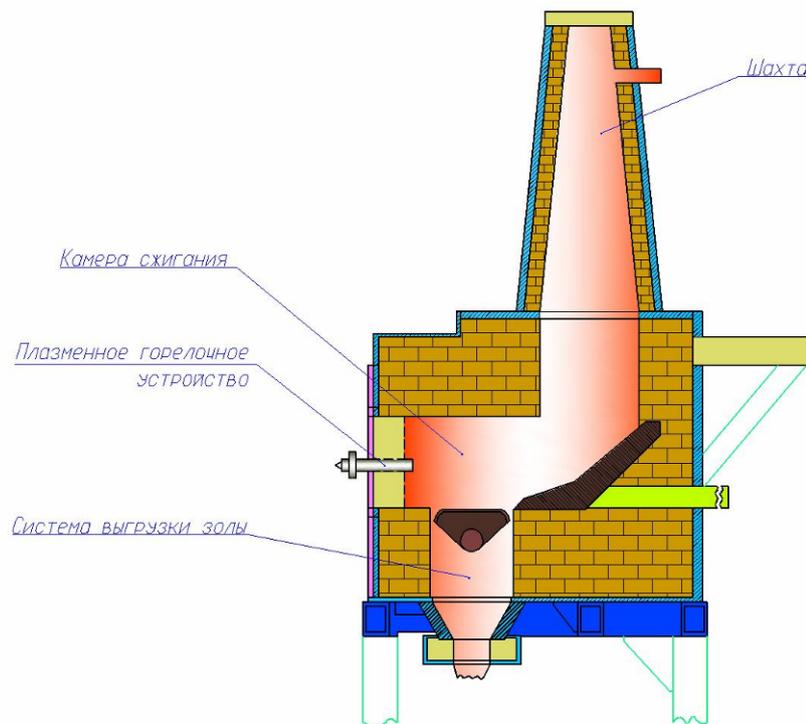


Рис. 4. Плазменная шахтная печь

Шахтный процесс переработки позволяет реализовать режим противотока в процессе нагревания и термической обработки отходов, охлаждение и фильтрацию отходящих газов непосредственно в самом слое загрузки, для чего в состав шихты можно

поочередно добавлять и засыпать органический фильтрующий материал на основе мелких древесных опилок. Этот материал в значительной степени поглощает токсичные и радиоактивные аэрозоли, после чего по ходу процесса подвергается термической переработке и стеклованию вместе с отходами. Дополнительным фактором такого поглощения является охлаждение отходящих газов до температуры гарантированной конденсации летучих радионуклидов и токсинов в слое в верхней части шахты, где их температура может снижаться до 700-850 °С. Отходящие газы дожигаются в циклонной плазمو-вихревой камере дожигания, которая для этого также оборудована плазмотроном. В зависимости от вида и токсичности отходов температура дожигания газов может быть доведена до 1300-1700 °С, что гарантирует их полное термическое обезвреживание. При переработке только радиоактивных отходов дожигание производится при температуре до 1000-1100 °С в расчете только на летучие продукты термического разложения отходов и фильтрующего материала. При этом объем отходящих газов в печи в сравнении с обычным сжиганием сокращается в 3-4 раза, что способствует их равномерной и эффективной фильтрации. Помимо камеры дожигания печь комплектуется системой электротехнического оборудования для электропитания и поджига плазмотронов. Система газоочистки и другие системы разрабатываются (или комплектуются) и поставляются отдельно в зависимости от вида и категории токсичности отходов.

Выделяют три режима работы печи [9]: режим нагрева и вывода печи на рабочие параметры; поддержание рабочих параметров печи при отсутствии загрузки отходов (режим холостого хода); сжигание отходов.

Считается, что печь разогрета и готова к началу загрузки отходов при достижении на внутренней поверхности футеровки камеры сжигания температуры 800° С. Для определения готовности печи к работе, разработана методика расчета динамики нагрева печи.

На рис. 5 представлены расчетные данные и результаты эксперимента по нагреву печи. Из приведенного графиков видно, что время нагрева печи до рабочей температуры составляет 30-35 мин. Пик на графиках объясняется наличием 2 кг отходов (текстиль) в камере сжигания в момент включения плазмотронов.

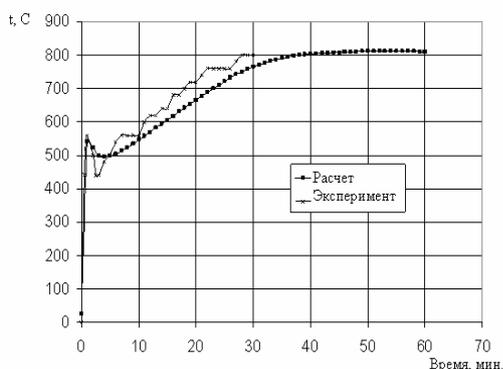


Рис. 5. Динамика нагрева плазменной печи

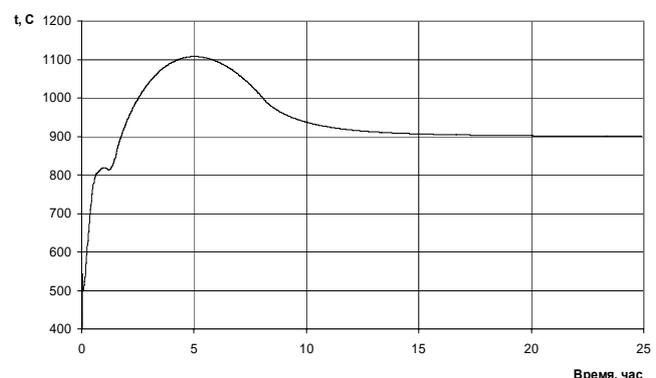


Рис. 6. Вывод печи в режим холостого хода

На рис. 6 представлены результаты расчета вывода печи на режим холостого хода, после чего необходимо уменьшить мощность плазмотрона до 25 кВт, а расход

плазмообразующего газа – до 3,2 г/с. При этом температура в печи поддерживается на уровне 900 °С, и печь в любой момент готова к загрузке отходов.

В настоящее время продолжаются работы по разработке и исследованию плазменной шахтной печи для утилизации РАО низкого и среднего уровня активности, образующихся при эксплуатации АЭС. Согласно разработанной технологической схеме загрузка отходов в печь должна производиться в пакетированном или кусковом виде из бункера через загрузочный шлюз. В камере сжигания печи происходит пиролиз и частичное сжигание органической части отходов под воздействием электродуговых плазмотронов постоянного (переменного) тока при температуре не ниже 900 °С. Геометрия профиля шахты по высоте печи исключает фактор сводообразования и зависания слоя загрузки. Дожигание пирогаза осуществляется при температуре не ниже 1100 °С в циклонной камере дожигания, в которую дополнительно подается воздух. Для поддержания необходимой высокой температуры в камеру дожигания устанавливается плазмотрон постоянного тока. Такая температура является верхним пределом безопасности по фактору образования диоксинов. При этом циклонное завихрение должно обеспечивать не менее 2 секунд времени экспозиции газового потока в камере. Общий коэффициент избытка воздуха в камере дожигания должен составлять не менее 1,5, величина которого включает возможный избыток воздуха в камере дожигания, зависит от калорийности самого пирогаза и уточняется опытным путем.

Кроме того, дожигание дымовых газов в камере дожигания с плазменным нагревом позволяет включать в состав сжигаемых отходов те из них, которые содержат галогенорганические вещества на основе хлора, фтора и брома, являющиеся токсичными и особо опасные своими вторичными токсичными образованиями диоксинов при низкотемпературном сжигании. В этом случае тепловая мощность камеры дожигания обеспечивает достижение температуры более 2000 °С, что гарантирует быстрое и полное термическое разложение любых токсичных веществ в составе газов.

Для предотвращения повторного образования диоксинов/фуранов на выходе газов из камеры дожигания должно производиться их резкое охлаждение (закалка) до температуры 200-250 °С, что является нижним безопасным пределом по данному фактору и обеспечивается путем соответствующего впрыска и испарения воды, или подачи холодного закалочного газа непосредственно в поток отходящих газов. Скорость охлаждения должна быть порядка 10 000 °С в секунду, чему должны соответствовать как скорость потока, так и протяженность участка закалки. Для закалки можно использовать скрубберную воду из градирни и системы газоочистки. Полная экологическая очистка газов должна достигаться применением ионно-обменного фильтра.

Выгрузка зольного остатка из печи осуществляется через поворотную колосниковую решетку в специальные контейнеры. Фиксация зольных остатков производится путем цементирования, технология которого реализована на АЭС.

Заключение. Для переработки и уничтожения токсичных отходов все более широкое распространение получают технологии с использованием термической плазмы. Для ее реализации настоящее время используется несколько типов плазменных печей: шахтная, двухкамерная и вращающаяся.

В ГНУ ИТМО НАНБ разработана, изготовлена и тестируется плазменная шахтная печь для переработки токсичных и радиоактивных отходов. В ходе эксплуатации печей возникает вопрос об оптимальных режимах работы. С этой целью разработана модель теплового расчета плазменных печей для переработки отходов, которая позволяет моделировать и оптимизировать параметры работы устройств. Это дает возможность обеспечить полную переработку отходов и предотвращения как химического, так и теплового загрязнения окружающей среды.

Литература

- [1] Моссэ А.Л., Савчин В.В. Анализ состава медико-биологических отходов. Сахаровские чтения 2005 года: экологические проблемы XXI века: Материалы 5-ой международ. науч. конф., 20-21 мая 2005 г., Минск, Республика Беларусь С.129-130.
- [2] Моссэ А.Л., Горбунов А.В., Савчин В.В. Электродуговые плазменные устройства для переработки и уничтожения токсичных отходов. IV Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (13-18 мая 2005 г., Иваново, Россия): Сборник трудов. С. 650-652
- [3] Zhdanok S.A., Mosse A.L., Gorbunov A.V., Sauchyn V.V. Thermal plasma based waste treatment. "The first central European symposium on plasma chemistry" May 28 – 31, 2006, Gdańsk, Poland.
- [4] Mosse A.L., Dmitriev S.A., Kniasev I.A., Stefanovsky S.V., Lifanov F.A. Some results of studies of radionuclei evaporation in processing of radioactive waste in plasma shaft furnace. Heat and Mass Transfer: models, theor.& exp. studies, ИНМТ, Минск, p.120-123, 1993.
- [5] Савчин В.В. Переработка медико-биологических отходов плазменными методами. Материалы международной научной конференции «Сахаровские чтения 2004 года: экологические проблемы XXI века», 21-22 мая 2004 г. С. 251-253
- [6] Mosse A.L., Gorbunov A.V., Sauchyn V.V. Plasma furnaces for toxic waste processing. Book of abstracts of HIGH TECHNOLOGY PLASMA PROCESSES (HTPP-9) St-Petersburg May 27 – June 4, 2006. P. 22.
- [7] Моссэ А.Л., Савчин В.В., Иванюкович В.А. Плазменные технологии для утилизации радиоактивных отходов. Сахаровские чтения 2006 года: экологические проблемы XXI века: Материалы 6-ой международ. науч. конф., 18-19 мая 2006 г., Минск, Республика Беларусь. С. 354-359.
- [8] Mosse A.L., Gorbunov A.V., Sauchyn V.V. Plasma furnaces for toxic waste processing. Journal of High Temperature Material Processes, An International Quarterly of High Technology Plasma Processes. Volume 11 issue 2 pp 205 – 218.
- [9] Моссэ А.Л., Савчин В.В. Моделирование параметров переработки радиоактивных отходов в шахтной плазменной печи. // Научно-технический рецензируемый журнал общественного объединения «Белорусская инженерная академия» Инженерный Вестник №1 (21)/3' 2006. С. 250-256.