

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 90, № 5
Vol. 90, No. 5

СЕНТЯБРЬ–ОКТЯБРЬ
SEPTEMBER–OCTOBER

2017

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2017. ТОМ 90, № 5 (СЕНТЯБРЬ–ОКТАБРЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Цирлин А. М. Идеальная теплообменная система 1089

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Гималтдинов И. К., Ситдикова Л. Ф., Дмитриев В. Л., Левина Т. М., Хабеев Н. С., Song Wanqing. Отражение звуковых волн от пористого материала в случае наклонного падения 1098

Шагапов В. Ш., Нагаева З. М. Гармонические волны давления в трещинах, находящихся в нефтяных и газовых пластах 1109

Архипов В. А., Усанина А. С. Гравитационное осаждение совокупности твердых сферических частиц в режиме частично продуваемого облака 1118

Овчинников В. А., Якимов А. С. Численное исследование процесса теплообмена системы транспирационного охлаждения при влиянии малых энергетических возмущений 1126

Ахмадиев Ф. Г., Гиззятов Р. Ф., Назипов И. Т. Гидрогазодинамика и кинетика разделения дисперсных сред на ситовых классификаторах 1135

Карпович И. Н. Кинетика капиллярного впитывания в неоднородном электрическом поле 1146

Печенегов Ю. Я., Мракин А. Н. Влияние стефановского потока на теплообмен в системе "газ–твердая частица" при термохимической конверсии твердого топлива 1152

Bodykov D. U., Abdikarimov M. S., Seitzhanova M. A., Nazhipkyzy M., Mansurov Z. A., Kabdoldina A. O., and Ualiyev Zh. R. Processing of Oil Sludge with the Use of the Electrohydraulic Effect 1155

НАНОСТРУКТУРЫ

Гринчук П. С., Abuhimd N. M., Фисенко С. П., Ходыко Ю. А. Рост нанослоев карбида кремния при контакте пористого углерода с расплавленным кремнием 1162

Кравчук А. В., Авраменко А. А. Применение метода Монте-Карло к решению задачи теплообмена в наножидкостях 1167

Даулбаев Ч. Б., Дмитриев Т. П., Султанов Ф. Р., Мансуров З. А., Алиев Е. Т. Получение трехмерных наноразмерных объектов на установке "3D-принтер + электроспиннинг" 1175

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Митрофанова О. В. О структурном подобии устойчивых форм спирально-вихревого движения 1179

Дмитриев С. М., Варенцов А. В., Доронков Д. В., Легчанов М. А., Сорокин В. Д., Хробостов А. Е. Особенности конвективных турбулентных течений за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС-Квадрат реактора PWR 1193

Волков К. Н., Денисихин С. В., Емельянов В. Н., Тетерина И. В. Обтекание поворотного утолщенного сопла потоком продуктов сгорания, содержащим частицы конденсированной фазы 1200

Шагапов В. Ш., Чиглинцева А. С., Белова С. В. К теории процесса образования газогидрата в замкнутом теплоизолированном объеме, опрессованном метаном 1208

Уразов Р. Р., Чиглинцев И. А., Насыров А. А. Образование склеротических отложений гидрата в трубе для отбора газа из купола-сепаратора 1223

Суров В. С. Дифракция ударной волны на клине в запыленном газе 1232

Das S., Patra R. R., Jana R. N., and Makinde O. D. Hall Effects on Unsteady MHD Reactive Flow through a Porous Channel with Convective Heating at the Arrhenius Reaction Rate 1240

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Мессерле В. Е., Моссэ А. Л., Никончук А. Н., Устименко А. Б., Баймулдин Р. В. Плазменная переработка модельных твердых бытовых отходов	1254
Храмцов П. П., Васецкий В. А., Махнач А. И., Грищенко В. М., Черник М. Ю., Дорошко М. В., Ших И. А. Исследование кратерообразования при высокоскоростном соударении металлических ударников с мишенями из полиметилметакрилата.....	1260
Гуцев С. А. Определение температуры ионов из вольт-амперных характеристик электролитов	1267

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Шаповалов В. М. О применимости модели Оствальда–де Виля для решения прикладных задач	1275
Погребняк А. В., Перкун И. В., Погребняк В. Г. Деградация растворов полимеров в гидродинамическом поле с продольным градиентом скорости.....	1282

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Чернышов А. Д., Попов В. М., Горяйнов В. В., Лешонков О. В. Исследование контактного термического сопротивления в конечном цилиндре с внутренним источником методом быстрых разложений и проблема согласования граничных условий	1288
Еремин А. В., Кудинов И. В., Довгялло А. И., Кудинов В. А. Теплообмен в жидкости с учетом диссипации энергии.....	1298
Круковский П. Г., Тадля О. Ю., Дейнеко А. И., Скляренко Д. И. Теплофизический анализ эффективности регулирования теплотребления здания.....	1307
Соловьев С. В. Исследование влияния джоулевой диссипации на теплообмен и магнитную гидродинамику жидкости в сферическом слое. Часть I.....	1316

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Бондарев О. Л., Страздовский В. В., Чернов Ю. В. Экспериментальное исследование теплофизических характеристик покрытия на основе полых стеклянных микросфер	1331
--	------

РАЗНОЕ

Le T. D. N., Хрущинский А. А., Кутень С. А. Моделирование эффекта выгорания материалов радиатора ионизационной камеры методом Монте-Карло	1339
--	------

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 01.09.2017. Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 29,88. Уч.-изд. л. 22,43. Тираж 90 экз. Заказ 159.

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

© Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

УДК 502.174.1; 658.567; 621.039.6

В. Е. Мессерле^{1,2}, А. Л. Моссэ³, А. Н. Никончук³, А. Б. Устименко^{4,5}, Р. В. Баймуллин⁴**ПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА МОДЕЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Выполнено тестирование технологии переработки модельных твердых бытовых отходов. Разработана и создана опытная плазменная установка на основе плазменной камерной печи. Протестирована и подготовлена к коммерциализации технология переработки отходов.

Ключевые слова: плазменная переработка, плазменная камерная печь, бытовые отходы.

Проблема переработки и уничтожения твердых бытовых отходов (ТБО) различного происхождения, включая медико-биологические отходы (МБО), продолжает оставаться весьма актуальной. В последние годы в научно-технической литературе появилось большое количество материалов по использованию плазменных источников энергии (электродуговых генераторов плазмы) в установках высокотемпературной переработки отходов, содержащих органические и неорганические вещества (ТБО, промышленные и медицинские отходы). Актуальность этого направления подтверждается выходом в свет справочника по термическому обезвреживанию отходов [1].

Существует несколько вариантов реализации технологии высокотемпературной переработки и обезвреживания ТБО, промышленных и медицинских отходов с использованием плазменных источников энергии [1]:

- 1) плазмохимическая ликвидация супертоксикантов при высоких температурах непосредственно в плазменной среде;
- 2) воздействие на слой токсичных отходов плазменной струей или плазменным потоком, сформированным в многоструйной камере смешения;
- 3) термическое обезвреживание отходов в плотном фильтруемом слое с использованием плазменных источников энергии;
- 4) дожигание отходящих из печей газов с помощью плазменных источников энергии.

В работе [2] показано, что при переработке МБО из органической массы получается в основном синтез-газ с содержанием горючих компонентов 77.4–84.6%, а минеральная часть не содержит углерода и представлена в основном оксидом кальция (СаО). Рассчитанная по программе термодинамических расчетов TERRA степень газификации углерода при плазменной переработке МБО достигает 100% уже при температуре 1000–1250 К. Удельные затраты энергии на переработку МБО возрастают с ростом температуры процесса. При температуре переработки МБО $T = 1200\text{--}1600$ К удельные энергозатраты варьируются в диапазоне 0.7–1.2 (кВт · ч)/кг. При этом минимальные энергозатраты соответствуют максимальной доле воздуха в системе, что связано с компенсацией эндотермического эффекта переработки тепловыделением за счет реакции окисления углерода.

¹Институт проблем горения. Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172; ²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. 630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 1; ³Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: mosse@itmo.by; ⁴НИИ экспериментальной и теоретической физики. Казахстан, 050040, г. Алматы, ул. аль-Фараби, 71; ⁵НТО "Плазмотехника". Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Зверева, 22; э-почта: ust@physics.kz. Поступила 31.08.2016.

Экспериментальные исследования выполнялись с модельными ТБО, имеющими следующий химический состав: С (34.15 мас.%), Н (5.85 мас.%), О (6.29 мас.%), N (8.16 мас.%), S (0.94 мас.%), Cl (5.3 мас.%), H₂O (32.31 мас.%), Fe₂O₃ (3.0 мас.%), SiO₂ (2.0 мас.%), CaCO₃ (2.0 мас.%), в плазменной камерной печи высотой 0.33 м, длиной 0.22 м и шириной 0.22 м с толщиной футеровки 0.04 м [2]. Это устройство периодического действия, нагреваемое электродуговым плазмотроном типа PL-03/30, для питания которого требуется электрическая мощность до 35 кВт [2–6]. В состав технологической установки, кроме плазменной камерной печи, входят системы электроснабжения и запуска плазмотрона, системы газо- и водоснабжения плазмотрона и камеры сжигания печи. Установка снабжена системой отбора газообразных продуктов процесса для их последующего анализа.

Плазменная камерная печь предназначена для плазмохимической переработки токсичных МБО медицинских и фармацевтических предприятий. Масса загрузки отходов варьировалась от 5 до 7 кг в зависимости от их состава. Время полного цикла переработки отходов с учетом времени остывания печи составляло около 30 мин. Упакованные в пакеты или коробки отходы массой 5–7 кг помещались в камеру печи, после чего закрывался загрузочный люк. После включения плазмотрона под воздействием воздушного плазменного факела в камере достигалась среднemasсовая температура 1800 К, органическая часть материала отходов газифицировалась, а неорганическая часть отходов плавилась. Полученный синтез-газ через системы очистки и охлаждения непрерывно выводился из установки. Расплавленная минеральная часть отходов удалялась из печи после ее останова. Из-за недостатка кислорода в плазмообразующем газе (воздухе) в камере сжигания печи происходила лишь газификация отходов. Согласно технологической схеме процесса, образующаяся газовая смесь поступала из камеры сжигания в камеру дожигания, куда дополнительно подавался воздух для полного окисления отходящих газов. Для увеличения времени нахождения газовой смеси в камере дожигания при высокой температуре эта камера изготавливалась в виде циклонной топки с учетом того, что для полного разложения диоксинов необходимо выдерживать газ при температуре 1500 К в течение 2 с [7]. Изнутри камера футеровалась огнеупорным материалом для поддержания высокой температуры. Расход воздуха, подаваемого в камеру дожигания, составлял 0.2 кг/с.

По результатам экспериментальных исследований определены режимы работы плазменной камерной печи, выполнен анализ отходящих газов, получены образцы конденсированных продуктов, отобранных из камеры сжигания, и определен их химический состав. Газ на выходе из плазменной печи имел следующий состав: 73.4 об.% CO, 6.2 об.% H₂, 29.6 об.% N₂, 0.8 об.% S. Суммарная концентрация синтез-газа (CO + H₂) составляла 69.6%, что хорошо согласуется с данными расчета. Согласно расчету, выход синтез-газа при температуре 1800 К составляет 64.9%. Расхождение между экспериментом и расчетом не превысило 6.8%. В результате микрорентгеноспектрального анализа продуктов, полученных в экспериментах, установлено следующее содержание элементов в их образце, собранном в камере сжигания печи: Ca (54.6 мас.%), P (12.9 мас.%), O (32 мас.%). Эти элементы присутствуют в продуктах в виде оксидов CaO (76.4 мас.%) и P₂O₃ (22.9 мас.%). В исследованном образце также имелись следы Al, Si и K, содержание углерода в нем составляло 2.9 мас.%. Анализ конденсированных продуктов, собранных на фильтре после выхода из камеры сжигания печи, показал наличие в них следующих элементов: Ca (41.5 мас.%), P (14.1 мас.%), O (33 мас.%), Si (0.5 мас.%), K (1.5 мас.%), S (1.1 мас.%) и Fe (1.7 мас.%). Все элементы присутствовали в образце в виде оксидов CaO (67 мас.%), P₂O₃ (25 мас.%), SiO₂ (1 мас.%), K₂O (1.6 мас.%), SO₂ (1 мас.%) и Fe₂O₃ (2.5 мас.%). Эти результаты для наиболее стабильного нелетучего компонента в конденсированной фазе (CaO) коррелируют с данными расчетов: 71.61 мас.% CaO. Расхождение между экспериментом и расчетом по концентрации CaO не превысило 7%. Удельные энергозатраты на процесс переработки МБО в плазменной камерной печи по результатам экспериментов изменялись от 3.5 до 4.6 (кВт · ч)/кг.

Выполненные термодинамические расчеты плазменной газификации ТБО показали [8], что максимальный выход топливного газа достигается при температуре 1600 К. При воздушно-плазменной газификации ТБО может быть получен высококалорийный синтез-газ с выходом 82.4% (31.7% CO и 50.7% H₂), а при паро-плазменной газификации — с выходом 94.5% (33.6% CO и 60.9% H₂). Удельная теплота сгорания топливного газа, полученного при воздушной газификации, составила 3280 ккал/кг,

а при паровой — 3530 ккал/кг. При оптимальной температуре удельные энергозатраты на воздушную газификацию ТБО составили 1.92 (кВт · ч)/кг, а на паровую газификацию — 2.44 (кВт · ч)/кг.

В соответствии с программой совместных работ Института тепло- и массообмена НАНБ (ИТМО) с НИИ экспериментальной и теоретической физики экспериментальные исследования плазменной переработки ТБО проводились также на опытном стенде НТО "Плазмотехника", основными элементами которого являются высокоресурсный плазмотрон постоянного тока номинальной мощностью 70 кВт и реактор периодического действия производительностью по ТБО 30 кг/ч [8, 9]. В состав экспериментальной установки (рис. 1), кроме реактора с плазмотроном, входят системы электроснабжения и управления плазмотроном, системы газо- и водоснабжения реактора с плазмотроном и система очистки отходящих газов. Установка снабжена системой отбора газообразных и конденсированных продуктов, образующихся в процессе газификации органических отходов, для проведения их анализа. Плазменный реактор периодического действия, смонтированный на опытном стенде НТО "Плазмотехника", показан на рис. 2. Исследования проводились с использованием электродуговых плазмотронов различных типов номинальной мощностью от 30 до 200 кВт. Производительность реакторов по ТБО варьировалась от 30 до 100 кг/ч. Электрическая мощность и производительность плазменного реактора по ТБО на опытном стенде НТО "Плазмотехника" в 5–7 раз превосходила параметры работы печи на стенде ИТМО, что является важным шагом для масштабирования рабочих параметров плазменной установки.

Проведено несколько серий экспериментов с использованием плазмотронов различных типов: плазмотрона Vortex-200, высокоресурсного плазмотрона и плазмотрона PL-01/30. Плазмотрон Vortex-200, использующийся для переработки пластика, ДСП и ветоши, имел рабочие параметры $I = 250$ А, $U = 350$ В, $P = 87.5$ кВт и $G_g = 700$ л/мин. Высокоресурсный плазмотрон, использующийся для переработки пластика и стекла, имел рабочие параметры $I = 240$ А, $U = 300$ В, $N = 72.0$ кВт и $G_g = 200$ л/мин при температуре на выходе из печи 570 К. На рис. 3 показан факел от высокоресурсного плазмотрона, работающего на мощности 72 кВт. Температура факела на срезе крышки составляла 5000 К. Плазмотрон PL-01/30, использующийся для переработки пластика, имел рабочие параметры $I = 100$ А, $U = 300$ В, $N = 30.0$ кВт и $G_g = 100$ л/мин. Время переработки ТБО в каждом эксперименте составляло 15 мин. Средний состав газообразных продуктов переработки модельных отходов с использованием плазмотрона PL-01/30 представлен в табл. 1.

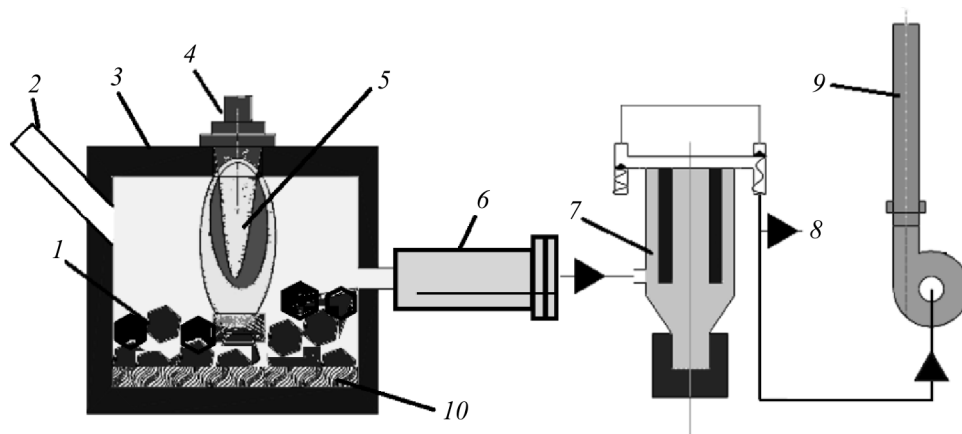


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для плазменной переработки ТБО: 1 — зона газификации ТБО; 2 — патрубок для подачи ТБО; 3 — реактор; 4 — электродуговой плазмотрон; 5 — плазменный факел; 6 — блок охлаждения отходящих газов; 7 — блок газоочистки с рукавным фильтром; 8 — система отбора газа на анализ; 9 — система вытяжной вентиляции; 10 — зона шлакообразования



Рис. 2. Экспериментальная установка для плазменной переработки ТБО на опытном стенде НТО "Плазмотехника"



Рис. 3. Плазменный факел от высокоресурсного плазмотрона

Таблица 1. Состав газа, поступающего в камеру дожигания

Компоненты газа	Содержание компонентов, об.%
Монооксид углерода	63.4
Водород	6.2
Сера	0.8
Азот, хлор и другие газы	29.6

Плазменный реактор на опытном стенде НТО "Плазмотехника" предназначен для переработки ТБО, включая токсичные МБО. Реактор представляет собой куб, футерованный огнеупорным кирпичом толщиной 0.065 м, с внутренней стороной размером 0.45 м. Реакционный объем камеры реактора составляет 0.091 м³. В стенке реактора предусмотрен смотровой лючок для измерения температуры пирометром в объеме реактора. Процесс плазменной газификации органических отходов осуществлялся следующим образом. После включения плазмотрона 4 и прогрева реактора 3 до температуры внутренней поверхности футеровки 1100 К, измеряемой на расстоянии 0.2 м от крышки реактора, через патрубок 2 в зону газификации 1 подавались брикетированные ТБО. Масса каждого брикета составляла 0.4 кг. ТБО газифицировались в воздушном плазменном факеле 5, обеспечивающем среднюю температуру в объеме реактора до 1600 К. Образующиеся газообразные продукты выводились из реактора в систему охлаждения отходящих газов 6, а конденсированные продукты скапливались в зоне шлакообразования 10. Совмещение зон тепловыделения от факела 5, газификации ТБО 1 и шлакообразования 10 способствовало интенсификации процесса переработки органических отходов. Охлажденные газообразные продукты поступали в блок газоочистки 7, после которого с помощью системы отбора 8 газ подавался на газоанализатор. Система вытяжной вентиляции 9 обеспечивала разрежение в реакторе до 10 мм водяного столба. Эксперименты показали, что время полного цикла переработки ТБО составляет 30 мин. На рис. 4 показана зона переработки ТБО в работающем плазменном реакторе.

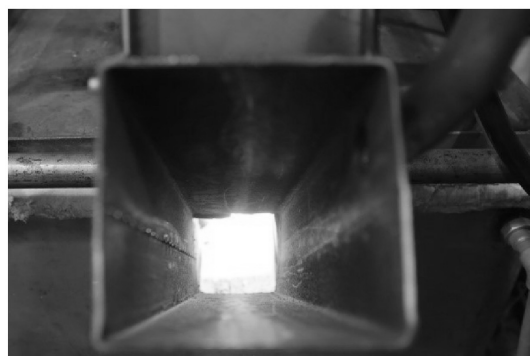


Рис. 4. Работающий реактор с открытым загрузочным люком

Рассмотрим работу реактора, оснащенного высокоресурсным плазмотроном. В качестве газифицирующего агента использовался плазмообразующий воздух с расходом 15 кг/ч. Мощность плазмотрона составляла 72 кВт (240 А, 300 В). После прогрева реактора в течение 15 мин через патрубок 2 (рис. 1) было последовательно загружено 20 брикетов модельных ТБО общей массой 8 кг. Под воздействием воздушного плазменного факела среднemasсовая температура в камере достигала 1600 К, органическая часть ТБО газифицировалась, а неорганическая часть плавилась и скапливалась в зоне шлакообразования реактора. Полученный топливный газ непрерывно выводился из установки через системы охлаждения и очистки. Расплавленная минеральная часть отходов удалялась из реактора после завершения рабочего цикла.

По результатам экспериментальных исследований плазменной переработки модельных ТБО определены режимы работы плазменного реактора, выполнен анализ отходящих газов, получены образцы конденсированных продуктов, отобранных в зоне шлакообразования реактора, и определено остаточное содержание углерода в шлаке. По результатам газового анализа, выполненного на газовом хроматографе SRI 8610С, получен следующий состав газа на выходе из блока газоочистки: 26.5 об.% CO, 44.6 об.% H₂, 28.9 об.% N₂. Суммарная концентрация синтез-газа составила 71.1%, что хорошо согласуется с данными термодинамического расчета. Согласно расчету, выход синтез-газа при температуре 1600 К составляет 82.4%: 31.7% CO и 50.7% H₂). Таким образом, расхождение между экспериментом и расчетом по выходу целевого продукта (синтез-газа) не превышает 16%. В результате рентгенофазного анализа, выполненного на установке ДРОН-3, был получен следующий состав шлака: 63.0 мас.% Fe₃C, 21.0 мас.% CaSiO₃, 13.0 мас.% SiO₂, 3.0 мас.% Fe. Содержание углерода в образце шлака, определенное абсорбционно-весовым методом, составило 2.8 мас.%, что соответствует степени газификации углерода органических отходов 91.8%. Расхождение между опытным и расчетным значениями степени газификации углерода не превышает 9%. В конденсированных продуктах плазменной газификации ТБО не выявлено вредных примесей. Очистку топливного газа от хлорсодержащих соединений необходимо проводить на углеродных фильтрах и биофильтрах.

По результатам экспериментов удельные энергозатраты на газификацию ТБО в плазменном реакторе составили 4.5 (кВт · ч)/кг (2.3 (кВт · ч)/кг рабочего тела). В расчете энергозатраты на воздушно-плазменную газификацию ТБО составили 1.92 (кВт · ч)/кг рабочего тела. Такое расхождение расчетных и экспериментальных значений удельных энергозатрат на процесс объясняется тем, что в термодинамических расчетах определяются минимально возможные энергозатраты в изолированной термодинамической системе без учета обмена теплом и работой с окружающей средой. На практике как сам плазменный реактор, так и плазмотрон характеризуются тепловыми потерями в окружающую среду с охлаждающей водой. Кроме того, в экспериментально полученных значениях удельных энергозатрат учитываются энергозатраты на предварительный нагрев реактора до подачи ТБО. Во втором и последующих циклах переработки ТБО дополнительных затрат на предварительный нагрев реактора не будет. В этом случае расхождение между экспериментальными и расчетными значениями удельных энергозатрат на плазменную газификацию ТБО заметно снизится.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований процесса плазменной переработки ТБО позволили сформулировать технологические рекомендации для проектирования пилотной плазменной установки и ее практического использования. Выполненный комплекс исследований подтвердил, что плазменная переработка ТБО характеризуется полным разложением любых токсичных веществ. Главная отличительная особенность и преимущество плазменной технологии заключается в значительной интенсификации процесса деструкции отходов за счет более эффективной передачи энергии перерабатываемым материалам. Существенной особенностью плазменной технологии является отсутствие высокомолекулярных соединений в продуктах переработки ТБО. Плазменная технология переработки ТБО является универсальной, поскольку может применяться для утилизации любых отходов независимо от их качественного состава. Разработанная плазменная технология переработки ТБО подготовлена к коммерциализации по согласованию со специализированными предприятиями Беларуси, Казахстана и России.

Следует отметить, что возможна реализация мобильного варианта плазменной установки, предназначенной для обслуживания медицинских учреждений и фармацевтических предприятий. Предполагается провести исследования плазменной установки, мощность и производительность которой примерно на порядок больше мощности и производительности плазменной камерной печи, и перевод ее в режим работы с непрерывной подачей брикетированных ТБО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант 3078/ГФ4 и программа 0071/ПЦФ), Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь и Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии N14.607.21.0118 (уникальный идентификатор проекта RFMEF160715X0118).

Обозначения

G_g — расход плазмообразующего газа, л/мин; I — сила тока, А; P — мощность, кВт; U — напряжение, В.

Литература

1. **Обезвреживание** отходов термическим способом (сжигание отходов): в *Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям*. Москва: Бюро НТД, 2015.
2. **Мессерле В. Е., Моссэ А. Л., Никончук А. Н., Устименко А. Б.** Плазмохимическая переработка медико-биологических отходов. *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т. 88, № 6. С. 1420–1425.
3. **Моссэ А. Л., Савчин В. В.** Анализ и моделирование процесса переработки медико-биологических отходов в плазменной камерной печи. *Инженерно-физический журнал*. 2006. Т. 79, № 4. С. 12–16.
4. **Моссэ А. Л., Савчин В. В.** Плазмотермическая обработка токсичных отходов. *Твердые бытовые отходы*. 2006. № 12. С. 22–24.
5. **Mosse A. L., Gorbunov A. V., and Sauchyn V. V.** Plasma furnaces for toxic waste processing. *J. High Temp. Mater. Process.* 2006. Vol. 11, Issue 2. Pp. 205–218.
6. **Zhdanok S. A. and Mosse A. L.** Plasma methods for toxic wastes processing: in *Plasma Assisted Decontamination of Biological and Chemical Agents*. Springer Science + Business Media B.V., 2008. Pp.143–149.
7. **Моссэ А. Л., Савчин В. В.** *Плазменные технологии и устройства для переработки отходов*. Минск: Белорусская наука, 2015.
8. **Мессерле В. Е., Моссэ А. Л., Устименко А. Б.** Плазменная газификация углеродсодержащих отходов: термодинамический анализ и эксперимент. *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. Т. 23, № 4. С. 637–644.
9. **Гольш В. И., Карпенко Е. И., Лукьященко В. Г., Мессерле В. Е., Устименко А. Б., Ушанов В. Ж.** Высоко-ресурсный электродуговой плазмотрон. *Химия высоких энергий*. 2009. Т. 43, № 4. С. 371–376.