



УДК 628.4

Барышева О.Б. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: obbars@mail.ru

Хабибуллин Ю.Х. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: a0an@mail.ru

Хасанова Г.Р. – студент

E-mail: hasanovag@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Исследование энергетической и экологической эффективности процессов горения твердых промышленных и бытовых отходов

Аннотация

Ежегодно на защиту и охрану окружающей среды от отходов жизнедеятельности мегаполисов затрачивается все больше материальных, трудовых и земельных ресурсов. Решение проблемы ликвидации и обезвреживания городского мусора – твердых бытовых отходов (ТБО) оказалась сложной научно-технической задачей. Это связано в сосредоточении в этих отходах всего многообразия веществ и материалов, искусственно созданных человеком.

Существует несколько освоенных в мировой практике переработки твердых бытовых, строительных и промышленных отходов технологических направлений, но ни одно из них не решает полностью данную проблему.

В данной работе проведено исследование энергетической и экологической эффективности процессов горения твердых промышленных и бытовых отходов. Получены результаты, по которым можно в дальнейшем прогнозировать состав продуктов сгорания.

Ключевые слова: диоксины, кинетика, равновесие, неравновесие, прогнозирование, твердые бытовые отходы.

Освоенные методы промышленной переработки ТБО не обеспечивают удовлетворительного решения проблемы из-за низкой интенсивности процесса (низкой удельной производительности); малой степени утилизации материально-энергетических ресурсов ТБО, значительного уровня вторичных отходов и загрязнения окружающей среды; высокой стоимости затрат при переработке ТБО. Приемлемое решение сложной и актуальной проблемы утилизации ТБО, возможно, при одновременном достижении высокой интенсивности, высокого энергетического КПД и безотходности процесса переработки ТБО. Реализация этих условий в технологическом процессе переработки ТБО требует детального изучения кинетики (механизма и скоростей) термохимических процессов, внедрения последних достижений высокотемпературной техники и технологий.

В связи с этим при разработке эффективных методов переработки ТБО большое значение имеет прогнозирование состава продуктов переработки ТБО и свойств высокотемпературных процессов. Теория процессов при высокой температуре, которые характерны для процессов горения, в том числе, и для процессов сжигания ТБО, включает основы многих наук: химической кинетики и термодинамики, газовой динамики и теплообмена, кинетики фазовых превращений, молекулярно-кинетической теории газов и жидкостей. Успешное сочетание достижений указанных разделов научных знаний уже нашло успешное и эффективное применение при моделировании процессов для некоторых типов энергоустановок.

Методология прогнозирования параметров процесса сжигания ТБО, значительно более сложных по исходному элементному составу, чем традиционные углеводородные и другие горючие, также должна строиться с привлечением строгих теорий.

По разработанным нами методам и программе расчета параметров процесса горения ТБО были проведены численные эксперименты и получены результаты.

Рассмотрено горение твердых бытовых и промышленных отходов в целом и некоторых его составляющих в предположении химического равновесия при давлении 1 физ. атм.

Среднестатистический состав твердых бытовых отходов принят по данным, приведенным в источнике [1]. Результаты расчета горения ТБО существенно зависят от принятых значений теплотворной способности; она выбрана по рекомендациям методического центра Эколайн. Так, удельная теплота сгорания твердых бытовых отходов (среднестатистическая) составляет 6192 кДж/кг и по сезонам от 5122 кДж/кг до 6745 кДж/кг.

Термическое уничтожение бытовых и промышленных отходов без какого-либо разделения часто приводит к образованию в продуктах сгорания высокотоксичных соединений. Поэтому, помимо ТБО в целом, целесообразно рассматривать горение отдельных составляющих твердых бытовых отходов: древесины, хлопка, маргарина, растительного масла, крахмала, каучука, поливинилхлорида, полиэтилена, пластика, капрона.

Рассмотрено горение сухой и влажной древесины, теплотворность которых 13800 кДж/кг и 6300 кДж/кг соответственно. Предполагается, что составы органической и минеральной составляющих древесины одинаковы, а отличие в наличии влаги.

Твердые бытовые отходы обязательно включают в себя пищевые отбросы, поэтому целесообразно рассмотреть горение жиров. Растительные жиры бывают твердые и жидкие. Твердые жиры образованы стеариновой $C_{17}H_{35}-COOH$, пальмитиновой $C_{15}H_{31}-COOH$ и некоторыми другими высшими предельными карбоновыми кислотами. Жидкие жиры образованы олеиновой $C_{17}H_{33}-COOH$, линолевой $C_{17}H_{31}-COOH$, леноленовой $C_{17}H_{29}-COOH$ и другими высшими непредельными карбоновыми кислотами. Для некоторых жиров характерна реакция гидрирования, например, для растительных масел, куда входят сложные эфиры непредельных карбоновых кислот; при этом жидкие жиры превращаются в твердые.

Теплотворная способность вышеперечисленных отходов принята согласно данным источника [2].

В работе [3] проводились исследования пластика, находящегося в ТБО, согласно которым его состав следующий: углерода – 75 %, хлора – 11 %, водорода – 14 % по массе и удельная теплота сгорания 8604 ккал/кг; эти же данные использовались в настоящих расчетах.

Математическая постановка задачи:

Программа определения характеристик продуктов сгорания состоит из следующих математических элементов:

- а) решения системы нелинейных уравнений (расчет равновесного химического состава);
- б) решение системы линейных уравнений (определение частных производных состава);
- в) расчет по формулам необходимых величин.

Задача расчета равновесного химического состава при заданных температуре и давлении и исходном элементном составе смеси формулируется следующим образом: определить число молей индивидуальных веществ, значения которых обеспечивают минимум изобарно-изотермического потенциала и удовлетворяют ограничениям в виде условий сохранения числа атомов различных химических элементов в химических реакциях.

Расчет химического равновесия основан на преобразовании задачи на условный экстремум функции в систему нелинейных алгебраических уравнений. Преобразование основано на определении условного экстремума функции методом неопределенных множителей Лагранжа. В результате применения этого метода после преобразований получается система нелинейных алгебраических уравнений, включающая уравнение закона действующих масс, уравнения сохранения вещества и закона Дальтона.

Система нелинейных алгебраических уравнений решается методом Ньютона. При сделанных ранее допущениях относительно свойств рабочего тела давление насыщенного пара индивидуальных веществ в конденсированном состоянии является известной функцией температуры и вычисляется по общеизвестным формулам [4, 5, 6].

А). Для термодинамического состояния $p, i = const$, температура является неизвестным параметром. Исходными данными являются состав (в виде условной

формулы) сжигаемой смеси, энтальпия. Начальное значение температуры $T^{(0)}$ либо указывается пользователем, либо оно принимается равным 3100 К (или по данным предыдущего расчета). Производится расчет состава и свойств. Далее, рассчитываются, в соответствии с методом Ньютона, поправки к температуре. Итерационный процесс отыскания температуры заканчивается при $DT < e_T$. Значение e_T либо указывается пользователем в исходных данных, либо принимается по умолчанию $e_T = 10^{-2}$.

Б). Для термодинамического состояния $p, T = const$ исходными данными являются: элементный состав сжигаемой смеси, давление, температура, термодинамические свойства индивидуальных веществ. В нулевом приближении парциальные давления всех газообразных индивидуальных веществ принимаются равными заданному суммарному давлению, конденсированные компоненты предполагаются отсутствующими.

Итерационный процесс отыскания состава считается законченным, если сумма абсолютных погрешностей уравнений равновесия становится меньше 10^{-6} .

Расчет равновесных термодинамических свойств производится после отыскания состава реагирующей смеси. Матрица, полученная в последнем приближении при отыскании состава, используется для нахождения частных производных $(\partial \ln n_q / \partial \ln T)_p$, $(\partial \ln n_q / \partial \ln p)_T$.

Далее, по формулам [4], вычисляются термодинамические свойства продуктов сгорания.

Весьма сложной является задача формирования качественного состава (возможный набор индивидуальных веществ) каждой из фаз и обеспечение сходимости последовательных приближений при применении метода Ньютона. Сравнительно просто эта задача решается для независимых (однокомпонентных) фаз путем проверки выполнения условий: для газообразных компонентов:

$$\ln p_q > \ln p_q^{(s)}, \quad (1)$$

для компонентов в конденсированном состоянии:

$$n_q^{(s)} \leq e, \quad (2)$$

где e – заданная малая величина.

Если выполняется первое неравенство, q -й компонент считают находящимся в конденсированном состоянии, и соответствующим образом видоизменяется система уравнений для расчета состава.

При выполнении второго неравенства q -й компонент снова принимают находящимся только в газовой фазе и изменяют в соответствии с этим уравнения диссоциации, сохранения вещества и закона Дальтона.

В случае многофазных термодинамических систем, отдельные или все конденсированные и газовая фазы которых являются многокомпонентными, возможный качественный набор фаз и веществ в каждой фазе должен быть выбран заранее, хотя включенный в исследования и полученный в результате решения наборы могут не совпадать.

При ошибках в задании качественного состава фаз решение, если оно и будет получено, может не иметь физического смысла.

Проведенные численные эксперименты показывают, что при сгорании твердых бытовых и промышленных отходов образуются токсичные продукты сгорания (например, оксиды углерода CO и азота NO), загрязняющие окружающую среду и негативно влияющие на жизнедеятельность животного и растительного мира. Это также подтверждается источниками [7, 8]. Анализ результатов расчета твердых бытовых отходов определяет зависимость между теплотворностью твердых бытовых отходов и содержанием CO и NO в продуктах сгорания. С увеличением удельной теплоты сгорания твердых бытовых отходов при термическом уничтожении твердых бытовых отходов повышается концентрация CO и NO в атмосфере (рис. 1, 2).

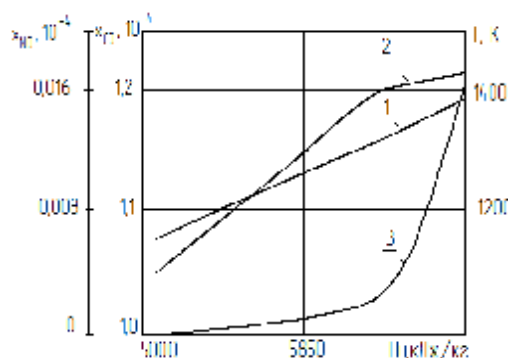


Рис. 1. Зависимость мольных долей и температуры от теплотворной способности для состава воздух+ТБО при давлении 1 физ. атм. ($C=29,7\%$, $H=3,6\%$, $O=22,6\%$, $N=0,3\%$, $S=0,1\%$, $Cl=0,7\%$, $H_2O=18,7\%$, $Al_2O_3=1,72\%$, $CaO=8,99\%$, $SiO_2=10,18\%$, $K_2O=3,41\%$): 1 – температура; 2 – мольная доля CO; 3 – мольная доля NO_x

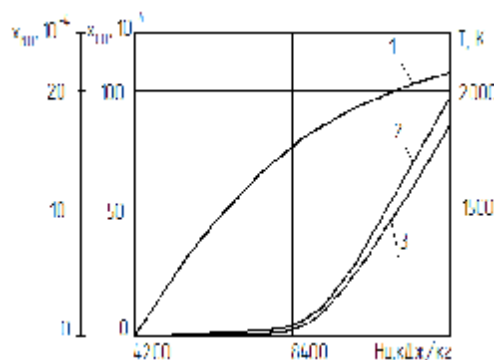


Рис. 2. Зависимость мольных долей и температуры от теплотворной способности для состава воздух+ТБО при давлении 1 физ. атм. ($C=29,7\%$, $H=3,6\%$, $O=22,6\%$, $N=0,3\%$, $S=0,1\%$, $Cl=0,7\%$, $H_2O=18,7\%$, $Al_2O_3=4,86\%$, $CaO=8,99\%$, $SiO_2=7,05\%$, $K_2O=3,4\%$): 1 – температура; 2 – мольная доля CO; 3 – мольная доля NO_x

Температуры продуктов сгорания углеводородных соединений, имеющих только органическую часть (полиэтилена, каучука, хлопка, поливинилхлорида, растительного масла, маргарина, пластика, капрона, крахмала) достаточно высоки и составляют 2100-2375 К, вследствие больших значений удельной теплоты сгорания H_u . Из расчета горения твердых бытовых отходов и древесины, которые помимо органической части включают в себя неорганику, температура продуктов сгорания составляет 1100-2100 К в зависимости от теплотворности. Таким образом, очевидно влияние неорганической части на температуру сгорания.

Представленные результаты расчета состава твердых бытовых и промышленных отходов в условиях равновесия показывают, что у ряда отдельно сжигаемых компонентов, составляющих твердых бытовых отходов: каучука, полиэтилена, поливинилхлорида, капрона, маргарина, растительного масла, крахмала, пластика, хлопка, не образуется конденсата. Поэтому в реальности необходимо учитывать неполноту сгорания, кинетику (механизмы и скорости химических реакций), возможность гашения пламени на условно «холодных» поверхностях топочных агрегатов, энергоустановок и как следствие – образование высокотоксичных соединений.

В данной работе решение проблемы расчета состава, термодинамических свойств и процессов горения твердых бытовых и промышленных отходов производится в приближении химического равновесия. Результаты расчетов в данном приближении являются своеобразным критерием оценки энергетической и экологической эффективности реальных установок, использующих методы термического обезвреживания отходов.

Список библиографических ссылок

1. Мягков М.И., Алексеев Г.В. Твердые бытовые отходы города. – М.: Стройиздат, 1978. – 168 с.
2. Бакиров Э.Г., Захаров В.М. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. – М.: Машиностроение, 1989. – 128 с.
3. Крюков В.Г., Наумов В.И., Демин А.В., Абдуллин А.Л., Тринос Т.В. Горение и течение в агрегатах энергоустановок: моделирование, энергетика, экология. – М.: «Янус-К», 1997. – 306 с.
4. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Черенков А.С. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках. – М.: Химия, 2000. – 520 с.
5. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. – М.: Химия, 1991. – 480 с.
6. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. – М.: Наука, 1990. – 215 с.
7. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка и обезвреживание органических отходов. – М.: Химия, 1990. – 214 с.
8. Девяткин В.В., Бобович Б.Б. Переработка отходов производства и потребления. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – С. 224-225.

Barysheva O.B. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: obbars@mail.ru

Khabibullin Iu.Kh. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: a0an@mail.ru

Khasanova G.R. – student

E-mail: hasanovag@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Study of energy and environmental efficiency of combustion processes
of solid industrial and domestic waste**

Resume

The thermal utilization of solid waste, construction and industrial waste is always an urgent problem, without which it is impossible to guarantee the normal life of the population, environmental protection and resource conservation. A lot of money spent each year to address this problem. These funds are also on the development and introduction of new more effective projects to solve the problem.

In the development of efficient methods for processing of municipal solid waste is very important prediction of the combustion products after processing of municipal solid waste and properties of high-temperature processes.

When you create a program for calculating the composition of combustion products obtained by thermal recycling of municipal solid waste used the theory of combustion processes that take place at high temperature. This theory includes the basics of chemical kinetics and thermodynamics, fluid dynamics and heat transfer, kinetics of phase transitions, molecular-kinetic theory of gases and liquids.

In this work the problem of calculation of thermodynamic properties and combustion of solid household and industrial waste produced in the approximation of chemical equilibrium.

According to our method and program for calculating the parameters of the process thermal recycling of municipal solid waste were carried out numerical experiments and obtain results.

The calculation results are a kind of criterion of energy and environmental efficiency of real plants using methods of thermal waste.

Keywords: dioxins, kinetics, equilibrium, disequilibrium, forecasting, municipal solid waste.

Reference list

1. Myagkov M.I., Alekseev G.V. Solid household waste in the city. – M.: Stroyizdat, 1978. – 168 p.
2. Bakirov A.G., Zakharov V.M. Education and burnout soot combustion of hydrocarbon fuels. – M: Mashinostroenie, 1989. – 128 p.
3. Kriukov V.G., Naumov V.I., Demin A.V., Abdullin A.L., Trynos T.V. Burn and a current in units of power installations: modeling, power, ecology. – M.: «Janus-K», 1997. – 306 p.
4. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Cherenkov A.S. Physical and chemical processes theory of heat engines and energy units. – M.: Chem., 2000. – 520 p.
5. Mukhachev G.A., Shchukin V.K. Thermodynamics and heat transfer. – M.: Chemistry, 1991. – 480 p.
6. The Ievlev V.M. Numerical modeling of turbulent flows. – M.: Nauka, 1990. – 215 p.
7. Bernadiner M.N., Shurygin A.P. Fire recycling and disposal of organic waste. – M.: Chemistry, 1990. – 214 p.
8. Devyatkin V.V., Bobovich B.B. Processing of wastes of production and consumption. – M.: Intermet Engineering, 2000. – P. 224-225.