

Modeling the Mixing of Components in a Rotary Kiln While Burning Municipal Waste to Ensure Rational Use of Energy

Krot O.P.,¹ Rovenskyi O.I.²

¹Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture

²North–East Scientific Center of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kharkov, Ukraine

Abstract. In Ukraine municipal waste is collected and delivered to a landfill. Municipal waste can be used as fuel to generate additional heat and electricity. The primary advantages of incineration are that waste volumes are reduced by an estimated, and the need for land and landfill space is greatly reduced. The plant has been designed by North–East Scientific Center using a thermocatalytic waste gas purification system with highly efficient dioxins reduction and heat energy recovery system. The technology of waste neutralization includes: a rotary kiln, an afterburner chamber, a new catalytic technologies for the treatment, a heat exchanger for heating combustion air, supply of alkali solution into the gas-escape channel, a carbon fiber adsorption filter. The organization of the right process of waste mixing in the rotary kiln allows increasing the efficiency of combustion, to equalize the combustion temperatures of the components of the waste and the completeness of the burning out of hazardous substances, which reduces the risk of their getting into the ash. The goal of the research is to build an analytical mathematical model of mixing of components in a rotary kiln. The model is based on the mathematical apparatus of Markov chains. The model allows to determine the concentration of the key component in any elementary volume of material circulating in the rotary kiln at any time and to calculate the statistical characteristics of the homogeneity of the mixture. The model will be used to research new designs of the equipment with rotary kilns.

Keywords: waste incineration, rotary kiln, Markov chain, waste to energy, Energy efficiency, heat treatment.

Modelarea amestecării componentelor într-un cuptor rotativ de ardere a deșeurilor municipale pentru a asigura utilizarea eficientă a energiei

Krot O.P.,¹ Rovenskyi O.I.²

¹Universitatea Națională de Construcții și Arhitectură Kharkiv

²Centrul Științific Nord-Est al ANS și MES din Ucraina

Rezumat: Deșeurile municipale din Ucraina sunt colectate și eliminate în depozitele de deșeuri, care au epuizat rezerva lor și nu îndeplinesc cerințele moderne pentru protecția mediului. În același timp, deșeurile municipale pot fi utilizate drept combustibil suplimentar pentru a genera căldură și electricitate. Deșeurile municipale - constituie o sursă alternativă de energie, care poate fi numit nepuizabilă, nu are nevoie de extracție, prelucrare și transport. Centrul Științific de Cercetare Nord-Est a dezvoltat un incinerator de deșeuri municipale într-un cuptor rotativ cu ajutorul unei purificări complex termocatalitic a gazelor reziduale și a unui sistem de utilizare a energiei termice. Organizarea procesului de amestecare a deșeurilor municipale într-un cuptor rotativ, scopul acesteia este de a obține cantitatea maximă de energie din deșeuri, cu o utilizare minimă de combustibil auxiliar, care îmbunătățește eficiența energetică a arderii componentelor reziduale, egalarea temperaturii de ardere a componentelor deșeurilor și asigură arderea completă a substanțelor periculoase, ceea ce reduce riscul de mediu. Scopul este de a crește eficiența energetică a procesului de ardere a deșeurilor într-o matematică. Scopul este de a crește eficiența energetică a procesului de ardere a deșeurilor, prin utilizarea unui model matematic privind amestecarea componentelor deșeurilor într-un cuptor rotativ, care permite să se calculeze plinătate utilizării componentei energetice a deșeurilor. Modelul permite determinarea concentrației unui component cheie în orice element de volum al căii de circulare a tamburului, în orice moment și se calculeze caracteristicile statistice de omogenitate a amestecului, ce permite analiza raționalității arderii diferitor categorii a deșeurilor municipale și reducerea utilizării de combustibil auxiliar.

Cuvinte-cheie: incinerarea deșeurilor municipale, cuptor rotativ, lanțul Markov, transformarea deșeurilor în energie, tratamentul termic.

Моделирование смешивания компонентов в барабанной печи при сжигании муниципальных отходов для обеспечения рационального использования энергии

Крот О.П., Ровенский А.И.

¹ Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

² Северо-Восточный Научный Центр НАН и МОН Украины

Харьков, Украина

Аннотация. Муниципальные отходы в Украине собираются и утилизируются на полигонах, которые исчерпали свой резерв и не отвечают современным требованиям по защите окружающей среды. В тоже время муниципальные отходы можно использовать как топливо для генерирования дополнительной тепловой и электрической энергии. Муниципальные отходы – это альтернативный источник энергии, который можно назвать неисчерпаемым, не требующим добычи, переработки и транспортировки. Северо-Восточный Научный Центр разработал установки сжигания муниципальных отходов в барабанной печи с применением термokatалитического комплекса очистки отходящих газов и системы утилизации тепловой энергии. Процесс горения отходов является сложным, вследствие неоднородности их состава. Организация процесса перемешивания муниципальных отходов в барабанной печи, целью которого является получение максимального количества энергии из отходов, минимального использования дополнительного топлива, что позволяет повысить энергетическую эффективность сжигания, выровнять температуры сгорания компонентов отходов и обеспечить полноту выгорания опасных веществ, что снижает экологическую опасность. Целью работы является повышение энергетической эффективности процесса сжигания отходов в математической модели смешивания компонентов в барабанной печи, позволяющую рассчитать полноту использования теплосодержащей части отходов. Модель базируется на математическом аппарате цепей Маркова. Модель позволяет определять концентрацию ключевого компонента в любом элементарном объеме циркуляционного контура барабана в любой момент времени и рассчитывать статистические характеристики однородности смеси, что позволяет проанализировать рациональность сжигания различных категорий муниципальных отходов и сократить использование вспомогательного топлива.

Ключевые слова: сжигание муниципальных отходов, барабанная печь, цепи Маркова, отходы в энергию, термическая обработка.

Введение

Муниципальные отходы являются источником энергии, которые по теплоте сгорания сопоставимы с некоторыми марками угля и торфом. Технология сжигания отходов широко используется во многих странах. Например, в Швеции сжигается ежегодно около 2,5 млн. тон бытовых отходов. Город Мальме (Швеция) использует 60% энергии, полученной из отходов. Способствует этому возрастающая доля пластика в отходах. Для эффективного сжигания мусора различного по свойствам, в том числе и крупногабаритного, используются термokatалитические установки с вращающейся печью (рис. 1).

Принцип действия установки термokatалитического обезвреживания и утилизации отходов. Преимущества сжигания в том, что печь перед началом работы разогревается до температуры 700 °С с помощью дизельной горелки. Подача топлива регулируется с учетом поддержания температуры в камере сгорания в пределах 850–1000 °С. Отходы порционно загружаются в барабанную печь при помощи загрузочного устройства и сжигаются в медленно вращающемся футерованном

барабане. Конструкция барабана предусматривает изменение угла его наклона, что позволяет регулировать время пребывания отходов в реакционной массе. Также в печи предусмотрено частотное регулирование скорости вращения барабана. Данные особенности позволяют обезвреживать отходы различных механических фракций и разнообразного химического состава. Порционная загрузка и постоянное вращение барабана позволяют не только выжечь органическую часть отходов, но и прокалить минеральный остаток, что является необходимым и достаточным условием безопасного обезвреживания и утилизации отходов. Далее дымовые газы поступают в камеру дожига при температуре 1000–1200 °С и выдерживаются в течении 2–2,5 с, что обеспечивает разложение и сжигание тяжелых углеводородов, а также монооксида углерода не менее, чем на 98 %. Камера дожига также оборудована дизельной горелкой для поддержания заданной температуры.

После камеры дожига дымовые газы проходят через высокотемпературный каталитический реактор I ступени, представляющий собой шамотные трубки,

пропитанные катализатором. Не догоревшие в камере дожигания печи трудноокисляемые органические вещества, включая бенз(а)пирен, диоксины, фураны и другие канцерогены, обезвреживаются на слое катализатора не менее чем на 95 %.

Очистка продуктов сгорания от кислых неорганических соединений производится за счет впрыска десяти процентного раствора кальцинированной соды в камеру перед рекуператором. Впрыск осуществляется эжекционной форсункой, в которой в качестве распылителя используется сжатый компрессорный воздух. Далее дымовые газы проходят рекуператор, в котором наружный воздух, подаваемый дутьевым вентилятором, нагревается до температуры 300–350 °С. Нагретый воздух подается в барабан печи и в камеру дожигания с регулировкой расхода по узлам подачи для интенсификации процесса горения и экономии дизельного топлива.

Охлажденные до 500–600 °С дымовые газы поступают на очистку в каталитический реактор II ступени, на котором происходит окончательная доочистка отходящих дымовых газов от органических веществ.

Водогрейный экономайзер предназначен для охлаждения дымовых газов с использованием отводимой от них теплоты для подогрева воды на хозяйственно-бытовые нужды. Дымовые газы, охлажденные до 100–150 °С подаются на очистку от мелкодисперсных взвешенных веществ в рукавный фильтр. Для улавливания тяжелых металлов, паров ртути, кадмия, кобальта установлен адсорбционный углетканевый фильтр, а также кассеты с активированным углем с эффективностью поглощения до 98 %. Установки по сжиганию муниципальных отходов с вращающейся печью и комплексом очистки по обезвреживанию отходящих газов разработаны с участием авторов.

Содержащиеся в сжигаемом мусоре компоненты с высокой теплотой сгорания значительно снижают затраты топлива при сжигании. Эти компоненты – пластик, дерево, бумага и т.д. Для эффективного сгорания важным является стабильность соотношения топлива (как в составе мусора, так и газового) и кислорода. Это означает, что процентное содержание горючих компонентов в составе мусора должно быть постоянным. Подача мусора к установке обычно весьма нестабильна. К тому же загрузочные

устройства способствуют сегрегации материала: конвейер – из-за скатывания крупных частиц мусора от середины кучи к периферии, загрузочная каретка – из-за периодичности действия. Вращающаяся печь обеспечивает наилучшее смешивание компонентов среди всех известных печей. В данном аналитическом исследовании предложен подход к моделированию процесса смешивания компонентов во вращающейся печи, разработана модель и приведен пример реализации модели.

I. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Тема исследований процесса сжигания отходов является актуальной в настоящее время. Одним из приоритетных направлений в процессах сжигания отходов является энергосбережение – низкое потребление энергии и минимальные тепловые потери.

В [1] авторы отметили, что одной из причин неудовлетворительного управления обращения с твердыми отходами является недостаточное и не рациональное функционирование оборудования, используемого для сжигания мусора.

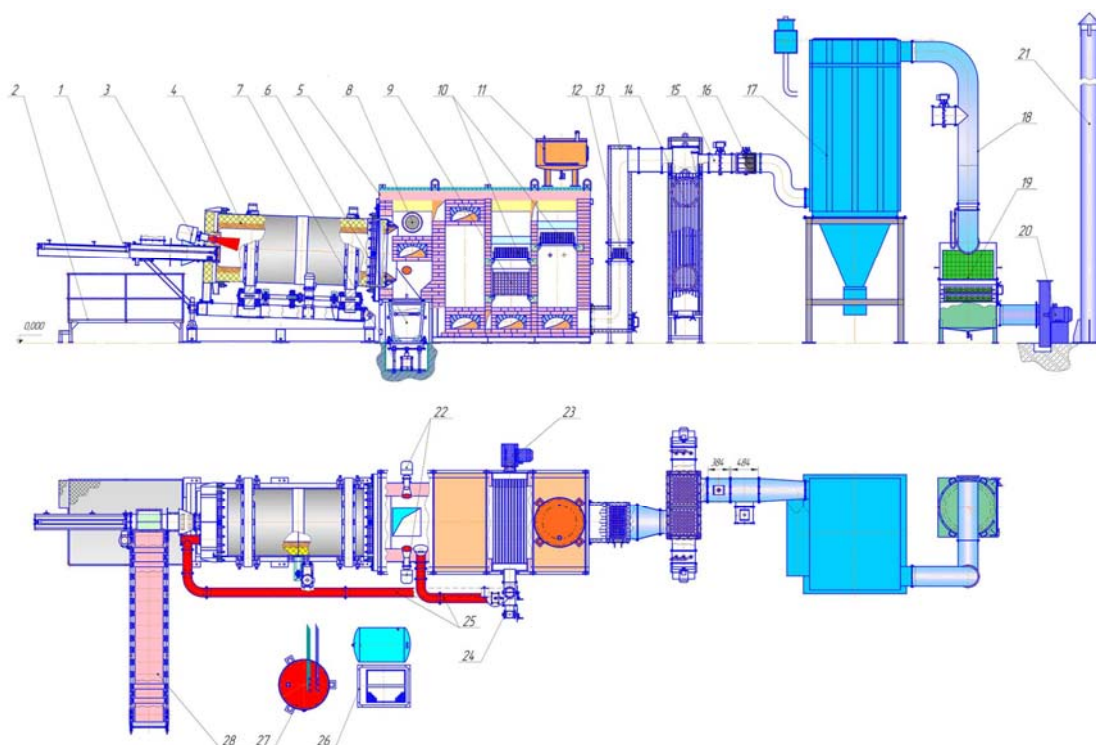
В [2] была проанализирована перспективность комбинированного использования тепловой и электрической энергии на существующих мусоросжигательных заводах в Мальме и Гетеборге (Швеция). Также автор [2] провел критический анализ влияния эффективности рекуперации энергии на выбросы парниковых газов. Приведен баланс на основе данных существующих заводов, а не модель завода. Авторами [3] была использована модель барабанной печи для выполнения анализа поведения печи при различных эксплуатационных и конструктивных параметрах, а именно: скорости потока отходов, коэффициента избытка воздуха, свойств и толщины огнеупорных материалов и изоляторов.

Расчет баланса энергии и массы в печи для сжигания отходов является очень важной частью разработки и оценки процесса сжигания.

Авторами [4] описывается компьютерная модель, которая используется для расчета баланса энергии и массы вращающейся печи для сжигания отходов. Расчет основан на

предположении, что существует термодинамическое условие равновесия в камере сгорания. Учтены параметры модели: теоретический расход воздуха для горения, количество избыточного воздуха, необходимого для конкретных случаев горения, скорость потока дымового газа и

температуры на выходе. Существующие модели печей, в том числе барабанных, построены на тепловом и материальном балансе в процессе переработки. Они не учитывают характера движения материала внутри барабана.



1 – загрузочное устройство; 2 – площадка обслуживания; 3 – топливная горелка печи; 4 – печь барабанная; 5 – камера дожигания; 6 – зольник; 7 – пневмоподъемник зольника; 8 – противозрывной клапан; 9 – рекуператор; 10 – каталитический реактор; 11 – система подачи содового раствора; 12 – каталитический реактор; 13 – газоход; 14 – дымоохладитель; 15 – клапан разрежения; 16 – клапан подсоса воздуха; 17 – рукавный фильтр; 18 – газоход; 19 – адсорбционный углеканевый фильтр; 20 – дымосос; 21 – дымовая труба с дефлектором; 22 – топливные горелки камеры дожигания; 23 – вентилятор; 24 – распределитель воздуха; 25 – воздуховоды; 26 – компрессор; 27 – топливный бак; 28 – ленточный конвейер.

Рис. 1. Установка для сжигания муниципальных отходов с вращающейся барабанной печью.

Авторами [5] описана математическая модель для сжигания твердых бытовых отходов в двухступенчатой печи с возвратно-поступательным движением. Численное моделирование проводилось для прогнозирования температуры, потока и распределения тепла в печи с учетом практических рабочих условий. Основными факторами, влияющими на процесс горения, являются толщина обработанного слоя, начальная влажность, избыточный коэффициент воздуха и вторичный воздух. При высокой начальной влажности отходов, их тепловая ценность и температура внутри мусоросжигателя низкие. Рациональная

толщина слоя и достаточный избыточный коэффициент воздуха обеспечивают высокую температуру, следовательно, выгорание горючих веществ и снижение выброса загрязняющих веществ – диоксинов.

Авторами [6] предложена дисперсионная модель для смешивания частиц, обусловленная движением решетки в слое с движущимся сжиганием, и описаны уравнения переноса для непрерывности, импульса, вида и сохранения энергии. Обнаружено, что интенсивное смешивание значительно усиливает процессы горения в течение основного периода сжигания в слое.

Авторами [7] разработана математическая модель для сжигания твердых бытовых отходов в поршневом мусоросжигателе. Оптимальные расчетные и рабочие параметры получены путем анализа угла впрыска и скорости подачи вторичного воздуха. Это исследование является важной ссылкой на оптимизацию конструкции печи и эксплуатации мусоросжигательных заводов.

В наиболее экологически безопасных европейских странах, таких как Дания, Швейцария, Швеция, Нидерланды, Норвегия, Финляндия и Германия, почти половина (или даже больше) коммунальных отходов сжигается [8]. Значительное количество энергии, полученное от сжигания отходов, обеспечивает тепло системы центрального отопления и/или паром для выработки электроэнергии. При этом муниципальные отходы выступают в качестве локально доступного топлива и заменяют ископаемые виды топлива, которые в большинстве случаев в Европе импортируются.

При использовании установок для сжигания муниципальных отходов их необходимо комплектовать системами газоочистки для гарантии экологически безопасного уровня выбросов. Это связано с опасностью загрязнения окружающей среды диоксинами и тяжелыми металлами. Как правило, установки имеют первую камеру сгорания, работающую при температуре от 800 до 1000°C, и вторую камеру сгорания, работающую при контролируемой минимальной температуре 850°C, со временем выдержки газообразных продуктов сжигания 2 секунды. При обследовании мусоросжигательных печей [9] было показано, что диоксины образуются в процессе сжигания, и их образование происходит в зоне охлаждения. Большая часть, образовавшихся диоксинов, адсорбируется на частицах летучей золы. Практически полностью удаляют диоксины в отходящих газах мусоросжигательных установок угольные фильтры и каталитические дожигатели.

В работе [10] представлена пиролизная установка, которая используется для сжигания отходов, в том числе медицинских.

В работе [11] параметры процесса, сжигания и топлива варьировались для выяснения факторов, которые существенно влияют на образование и выброс полихлорированных дибензо-*п*-диоксинов

(ПХДД) и полихлорированных дибензофуранов (ПХДФ), образующихся при сжигании.

В статье [12] рассматриваются исследования, проведенные по выбросам современных мусоросжигательных заводов. Рассмотрены результаты измерений дымовых газов при сжигании отходов и отбора проб атмосферного воздуха на уровне земли вблизи установок для сжигания. В некоторых случаях концентрация ультрамелкозернистых частиц в дымовом газе ниже, чем в локальном окружающем воздухе.

В последнее время пересматриваются методы переработки и утилизации полимерсодержащих бытовых отходов. В статье [13] уделено внимание различным технологиям прямого сжигания отходов с регенерацией энергии в виде тепла, пара и электроэнергии. Пластиковые материалы обладают высокой теплотворной способностью (при сгорании); особенно если учесть, что они получены из сырой нефти.

При оценке жизненного цикла отходов с применением сжигания необходимо учитывать особенности развития разных стран и регионов. Помимо различий, связанных с местной нормативно-правовой базой и конкретными климатическими условиями, технология и режим работы может быть результатом местной практики и традиций [14,15].

Ключевым вопросом, связанным с сжиганием муниципальных отходов, является эффективность восстановления энергии. Стимулом для улучшения энергетических характеристик установок для сжигания отходов является Директива об отходах (Директива 2008/98/ЕС Европейского парламента и Совета от 19 ноября 2008 года об отходах и отмене некоторых Директив). Так называемая «формула R1», указанная в Директиве, учитывает как производство энергии, так и получение тепла, научно обосновывается эффективность сжигания. Результаты, полученные в статье [16] на работающих в Европе электростанциях на муниципальных отходах, показывают некоторые существенные различия в их характеристиках, которые в основном связаны с мощностью и наличием теплового рынка (районных тепловых сетей).

В статье [17] была проведена сравнительная оценка эффективности сжигания на двух мусоросжигательных

заводах Орхус (Дания) и Милан (Италия). По полноте сгорания вредных веществ Орхус более экологически чистое предприятие, чем итальянский мусоросжигательный завод. Это происходило из-за различного состава отходов, который влияет на специфические выбросы и извлеченную энергию.

Технология сжигания муниципальных отходов активно развивалась последние 10–15 лет. Большая часть этого изменения обусловлена законодательством, что привело к сокращению выбросов в атмосферу отдельных установок. Продолжается непрерывное развитие процесса, и в настоящее время в мусоросжигании разрабатываются методы, которые улучшают экологические показатели. В документе [18] приводится описание процессов и методов, применяемых в промышленности по сжиганию отходов. Он фокусируется на сжигании, но также включает информацию о газификации и пиролизе.

Целью статьи является моделирование подготовки многокомпонентных муниципальных отходов к сжиганию в барабанных вращающихся печах с целью повышения эффективности сжигания и снижения выбросов.

Эффективность сжигания – это характеристика полноты использования теплосодержания топлива (в данном случае бытовых отходов) в процессе их сжигания.

Поддержание стабильных условий горения, это значит стабильного состава различных компонентов в мусоре, стабильной влажности и однородности компонентов, что может быть достигнуто качественным смешиванием. Когда общее количество воздуха постоянное, снижение первичного воздуха и введение вторичного воздуха должным образом может улучшить турбулентность и перемешивание, продлить время пребывания дымовых газов и способствовать полному сгоранию горючих материалов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для эффективного сжигания необходимо равномерно смешанный материал. Барабанные бетоносмесители наиболее универсальные среди смесителей, они могут работать с наполнителем как мелким, так и

очень крупным [19].

Среди методов определения рациональных режимов смешивания и выбора конструкции смесителя перспективным можно считать аналитическое математическое моделирование, как наименее ресурсоемкий и наиболее оперативный метод.

Аналитически процесс смешивания принято рассматривать как сложную физико–механическую систему (ФМС). Комплексный системный анализ процесса смешивания предполагает на первом этапе качественный анализ ФМС [20]. При этом выделяются два уровня иерархии физико–механических эффектов и явлений, имеющих место при протекании процесса смешивания сыпучих материалов: 1) совокупность физико–механических явлений в локальном объеме (микроуровень); 2) то же самое в объеме всего аппарата (макроуровень). Под локальным объемом понимают некоторый элементарный объем, в котором содержится довольно много частиц дисперсных фаз. Структурная схема эффектов первого уровня иерархии ФМС для совмещенного процесса смешивания – измельчения рассмотрены в работе [20], и она может быть использована при анализе процесса смешивания после внесения соответствующих упрощений.

Рассмотрим более подробно второй уровень – макроуровень.

Для описания процесса смешивания сыпучих материалов чаще всего используют *диффузионную* и *воротниковую* математические модели.

Диффузная модель [21] соответствует потоку с поршневым движением материала при наличии продольного и поперечного перемешивания частиц. Основное уравнение имеет вид:

$$\frac{dC}{dt} = -V \frac{dC}{dx} - \bar{D}_L \frac{d^2C}{dx^2} + \frac{\bar{D}_R}{R} \frac{d}{dR} \left(R \frac{dC}{dR} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация ключевого компонента; t – время; V – линейная скорость потока; x – координата вдоль потока; D_L и D_R – коэффициенты продольного и поперечного перемешивания (аналоги коэффициентов диффузии); R – радиус поперечного сечения потока.

Основной недостаток данного подхода – в сложности решения уравнения двухпараметрической диффузионной модели

и необходимости экспериментального определения значений D_L и D_R на опытных установках.

Сущность второго подхода (*ячеистая* математическая модель) заключается в том, что процесс смешивания рассматривается как результат перераспределения частиц при их движении в потоке материала через систему цепочек, составленных из ячеек идеального смешивания и образующих циркуляционный контур смесителя. Данный подход подробно рассмотрен в работе [22]. Используя его, можно составлять уравнения для расчета конечной концентрации циркуляционного контура практически с любым соединением зон, но для многоконтурных схем конечные выражения для концентраций, преобразованных по Лапласу, оказываются сложными.

Для построения модели на втором уровне иерархической структуры ФМС с учетом процессов, протекающих не в локальном объеме аппарата, а во всем его рабочем пространстве, наиболее эффективным признан математический аппарат случайных марковских процессов. Примеры их использования, но для машин с другими принципами смешивания – в работе Першина В.С. с коллегами [23], а также в работах [22, 24, 25] и в работе [26].

Как известно [23], марковские процессы подразделяют на три вида: 1) *дискретные в пространстве и во времени*; 2) дискретные в пространстве и непрерывные во времени; 3) непрерывные в пространстве и во времени.

Для случая барабанной машины не весь материал одновременно участвует в процессе смешивания, а только тот, который в данный момент времени соскальзывает с поверхности материала и приземляется на материал (рис. 2). Поэтому используем первый вид марковских процессов [23]. Движения перехода ключевого компонента на рис. 2 обозначены стрелками.

Процесс называют марковским, если состояние системы в некоторый момент времени определяет лишь вероятность $P_{ij}(t)$ того, что через промежуток времени t система будет находиться в состоянии E_j , причем эта вероятность не зависит от протекания процесса в предшествующий период. Вероятности $P_{ij}(t)$ называют переходными вероятностями.

III. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СМЕШИВАНИЯ МУСОРА ПЕРЕД СЖИГАНИЕМ В БАРАБАННОЙ ПЕЧИ

Суть метода марковских цепей такая. Пусть $\{E_1, E_2, \dots, E_k\}$ – множество состояний некоторой физической системы. В любой момент времени система может находиться в одном состоянии и изменяет свое состояние только в моменты $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots$. Для однородных цепей Маркова вероятность p_{ij} перехода системы из состояния в состояние за один шаг зависит только от того, из какого состояния в какое осуществлялся переход. Вероятности перехода p_{ij} располагаем в виде матрицы, обозначим ее:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1k} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{k1} & P_{k2} & \dots & P_{kk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

и будем называть *матрицей перехода* однородной цепи Маркова за один шаг. Матрица P имеет такие свойства:

$$а) 0 \leq p_{ij} \leq 1; \quad (3)$$

$$б) \sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, k), \quad (4)$$

то есть сумма элементов каждой строки матрицы перехода равна единице. Квадратные матрицы, для которых выполняются условия а) и б), называются *стохастическими*.

Вектор $a=(a_1, a_2, \dots, a_k)$, где $a_i = P(E_i)$ – вероятность появления состояния E_i ($i=1, 2, \dots, k$) в начальном испытании, называется *вектором начальных вероятностей*.

Разделим весь материал, находящийся в барабанной печи, на подслои (например, шесть – семь подслоев, рис. 2). Здесь внешний слой: ячейки 1, 3, 7, 9, 13, 15, 19, 21 ... Все подслои разделим радиальными линиями на ячейки примерно одинакового размера. При этом количество ячеек в подслоях, которые находится ближе к центру

барабана, окажется меньше, чем во внешних подслоях. На большей части полученного *циркуляционного контура* материал находится в плотном состоянии – ячейки от 1 до 5, от 7 до 11, от 13 до 47 и др. (рис. 2). В зонах, где угол наклона материала превышает угол внутреннего трения (границы ячеек 63–6, 63–12, 61–63, 61–62, 58–61, 58–59, 55–58, 55–56, 51–55, 50–51, 49–50, 49–48), начинается сползание материала. В зонах сползания слоев материала происходит сегрегация материала по крупности и по

плотности вследствие неодинаковости значений кинетической энергии частиц разных размеров и разной плотности. На сегрегации основано смешивание в подобных системах. Частицы большего размера и меньшей плотности продолжают движение в своем слое, мелкие частицы и частицы большей плотности могут частично переходить во внутренние подслои. На рис. 2 такие возможные переходы обозначены стрелками.

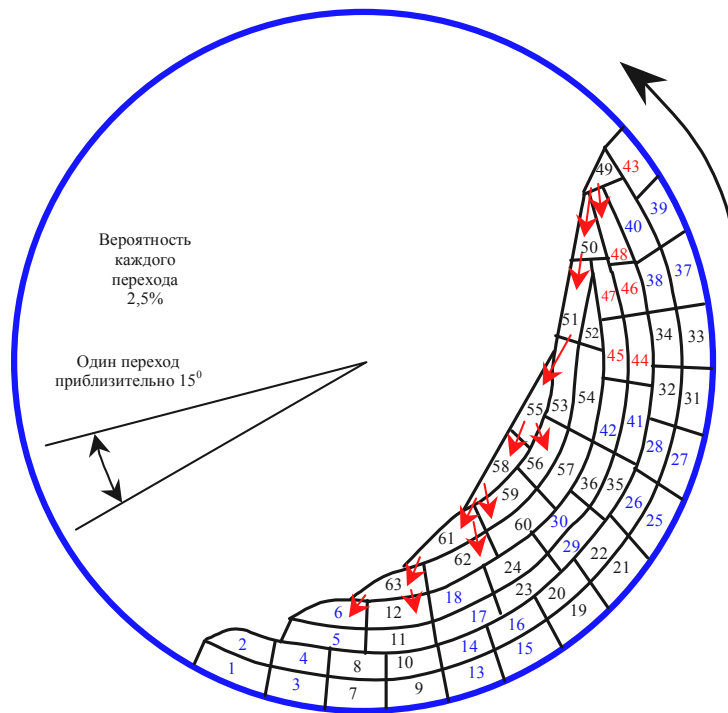


Рис. 2. Циркуляционный контур и пути распределения ключевого компонента. Один полный оборот ориентировочно 24 перехода (каждый из переходов – 15°).

Взаимопроникновение компонентов различных фракций проиллюстрировано на рис. 3.

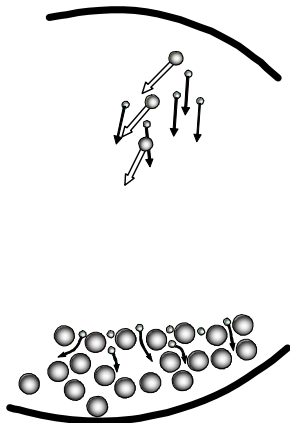


Рис. 3. Иллюстрация расположения ключевого компонента среди массива заполнителя.

Воспользовавшись сложившейся терминологией, назовем компонент, распределение которого во всем объеме мусора будем исследовать, *ключевым* компонентом [23, 25]. Как ключевой компонент можем рассматривать горючий пластик. Остальные составляющие мусора назовем *основным* компонентом.

Назовем *переходом* смещение материала на определенное количество ячеек. Если условиться, что номера ячеек (рис. 2) являются координатами в пространстве, то *один переход* – это смещение материала из ячеек 1, 2, 3, 4, 5, 6 в ячейки 7, 8, 9, 10, 11, 12 и т.д. В предлагаемой модели (рис. 2) одному переходу соответствует поворот барабана на угол $15\text{--}20^\circ$.

Активность сегрегации на каждом участке, где она может происходить, определяется вероятностью перехода частиц из одной ячейки в другую. Важным является вопрос определения этой вероятности для каждой ячейки.

В [23] вероятность перехода частиц в объемы, которые находятся ближе к центру циркуляции, то есть при $j > i$, определяют по формуле:

$$P_{ij} = P_0(1 - C_{j,m-1}) \quad (5)$$

где P_0 – устойчивый коэффициент, определяемый при идентификации параметров математической модели реальному процессу, он равен вероятности перехода частиц ключевого компонента в элементарный объем, который находится ближе к центру циркуляции при нулевой концентрации в нем ключевого компонента; $C_{j,m-1}$ – концентрация ключевого компонента в j -м элементарном объеме после перехода $m-1$.

К определению (или назначению) коэффициента P_0 можно подходить, исходя из анализа протекающего процесса. В [23, 27] он рассчитывается исходя из различия плотностей ключевого и основного компонентов:

$$P_0 = 1 - \frac{2 K_{main}}{3 K_{key}}, \quad (6)$$

где K_{main} – плотность частиц основного компонента (main component), K_{key} – плотность частиц ключевого компонента (key component). Если плотность ключевого компонента вдвое больше плотности основного компонента, а размеры частиц одинаковы, то значение P_0 будет равняться 0,67 (по формуле (6)).

Другой способ определения коэффициента P_0 – экспериментальный.

Традиционно данный коэффициент или аналогичные ему коэффициенты определяют итерационными методами, используя кинетическую кривую процесса, полученную на лабораторном смесителе. Считаем, что вероятность каждого перехода,

обозначенного стрелками на рис. 2, составляет 2,5%, в других ячейках, которые не касаются стрелки, переходы не происходят. *Матрица переходов* для этого случая определяется выражением (7).

Матрица переходов – квадратная матрица с длиной стороны 63 (количество ячеек, выбрано нами произвольно (рис. 2)). В приведенном фрагменте матрицы отмечены ее участки, где происходит перераспределение компонентов (матрица полностью не поместилась бы на странице). На главной диагонали находятся вероятности того, что соответствующая ячейка остается неизменной (перераспределение материала в этой ячейке не происходит).

Комментарий – пример: для ячейки «6» (рис. 2) вероятность того, что состояние ячейки не изменится, составляет 0,975; вероятность обмена ключевым компонентом с ячейкой «63» составляет 0,025. Для ячейки «49» вероятность того, что состояние ячейки не изменится, составляет 0,95, вероятность обмена ключевым компонентом с ячейкой «48» составляет 0,025, вероятность обмена ключевым компонентом с ячейкой «50» составляет также 0,025.

Вектор начальных вероятностей (вектор состояния системы) для случая, когда ключевой компонент (например, пластик) мгновенно попал (был загружен) в барабан и занял ячейки от 1 до 12 (выражение 8).

Вектор начальных вероятностей содержит 63 ячейки (рис. 2); вероятность нахождения ключевого компонента в каждой из ячеек от 1-й до 12-й равна единице; вероятность нахождения в других ячейках (с 13-ти до 63-й) равна нулю. Умножение матрицы переходов (выражение 7) на вектор (выражение 8) дает такой вектор (выражение 9).

Как видно из матриц (выражение 8) и (выражение 9), суммарное количество ключевого компонента неизменно (составляет 12 условных единиц). Переход (в результате вращения барабана) представляет собой смещение состояния всех ячеек в каждом подслое на один шаг (рис. 2) – примерно на 15–20°, что соответствует смещению **на 6 ячеек**.

$$P = \begin{bmatrix} \dots & 5 & 6 & 7 & \dots & 11 & 12 & 13 & \dots & 47 & 48 & 49 & 50 & 51 & 52 & 53 & 54 & 55 & 56 & 57 & 58 & 59 & 60 & 61 & 62 & 63 & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0,975 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0,975 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0,975 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0,025 & 0,950 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0,025 & 0,950 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0,925 & 0,025 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0,975 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0,925 & 0,025 & 0,025 & 0,025 & 0,025 & 0,025 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0,975 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0,025 & 0 & \dots & 0 & 0,025 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0,925 & 0,925 & \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 63 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,975 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,975 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,05 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & \dots & 56 & 57 & 58 & 59 & 60 & 61 & 62 & 63 \end{matrix}$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,05 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,975 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,975 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 & 62 & 63 \end{matrix}$$

Например, состояние ячейки «1» после перехода становится состоянием ячейки «7», состояние ячейки «2» после этого же перехода становится состоянием ячейки «8» ..., состояние ячейки «62» после этого же перехода становится состоянием ячейки «2» и так для всех ячеек. Это легко смоделировать, получив следующую матрицу (выражение 10).

Полученный вектор – вектор вероятностей после первого перехода (вектор состояния E_1). Вспомним, что номера ячеек являются координатами в пространстве; изменяются при этом состояния, то есть вероятности нахождения ключевого компонента в каждой ячейке.

По этому принципу умножения вектора вероятностей после первого перехода (вектора состояния E_1) на матрицу переходов P (7) с последующим смещением ячеек на 6

номеров (согласно рис. 2)) дает вектор следующего состояния E_2 (так моделируется следующий переход). Следующее состояние – E_3 , дальше E_4 и так далее. Очевидно, что если в циркуляционном контуре 63 ячейки, а один переход – это смещение на 6 ячеек, то, например, 21 последовательный переход соответствует двум оборотам барабана. После каждого перехода полученный текущий вектор E_i иллюстрирует равномерность распределения ключевого компонента.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ

В модели равномерность распределения ключевого компонента оценивали с помощью среднеквадратичного отклонения каждого

состояния E_i , коэффициента вариации и (для визуальности) номограмм распределения. Коэффициент вариации – отношение среднеквадратичного отклонения для каждого состояния к среднему арифметическому [28]. Например, среднее отклонение для состояния E_0 (формула 8) составляет 0,394; коэффициент вариации 2,068. Номограмма распределения начального

состояния E_0 – на рис. 4,а. Номограммы распределения в некоторых других состояниях приведены на рис. 4,б и на рис. 5, 6. Зависимость полученного среднеквадратичного отклонения и коэффициента вариации от числа переходов представлена на рис. 7.

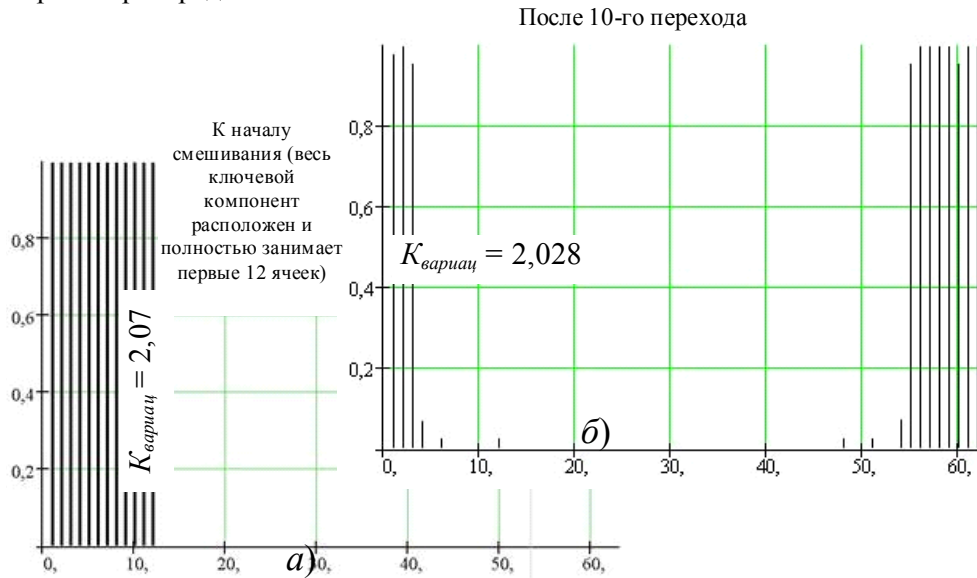


Рис. 4. Номограммы распределения ключевого компонента к началу смешивания (а); после 10-го перехода (б)

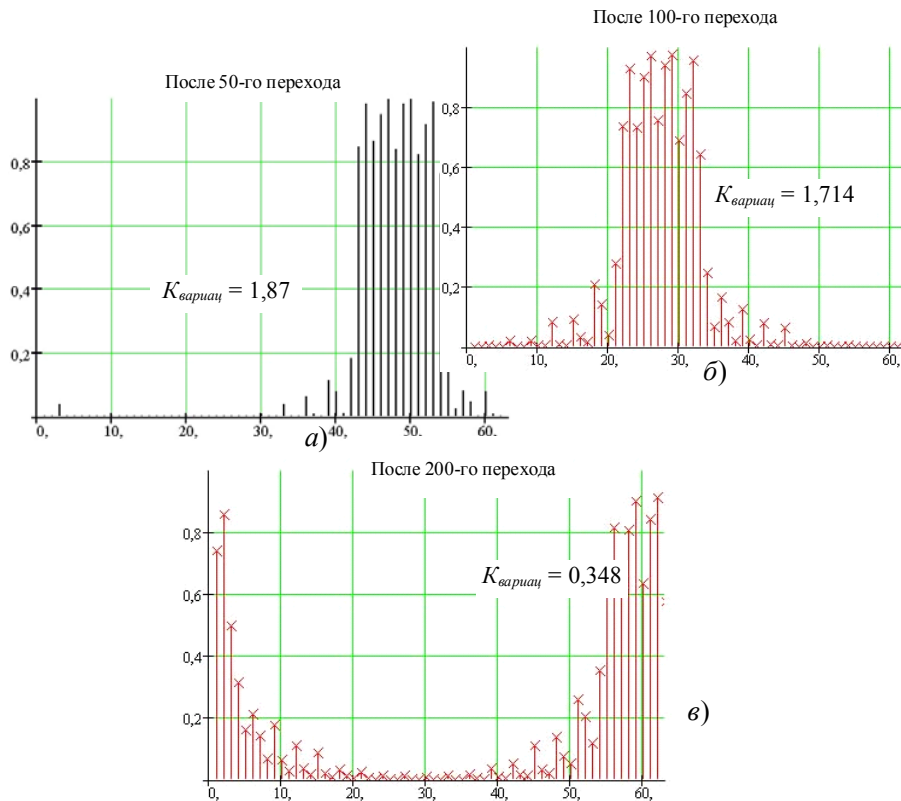


Рис. 5. Номограммы распределения ключевого компонента после 50-го перехода (а); после 100-го перехода (б); после 200-го перехода (в) / 8–10 оборотов барабана /.

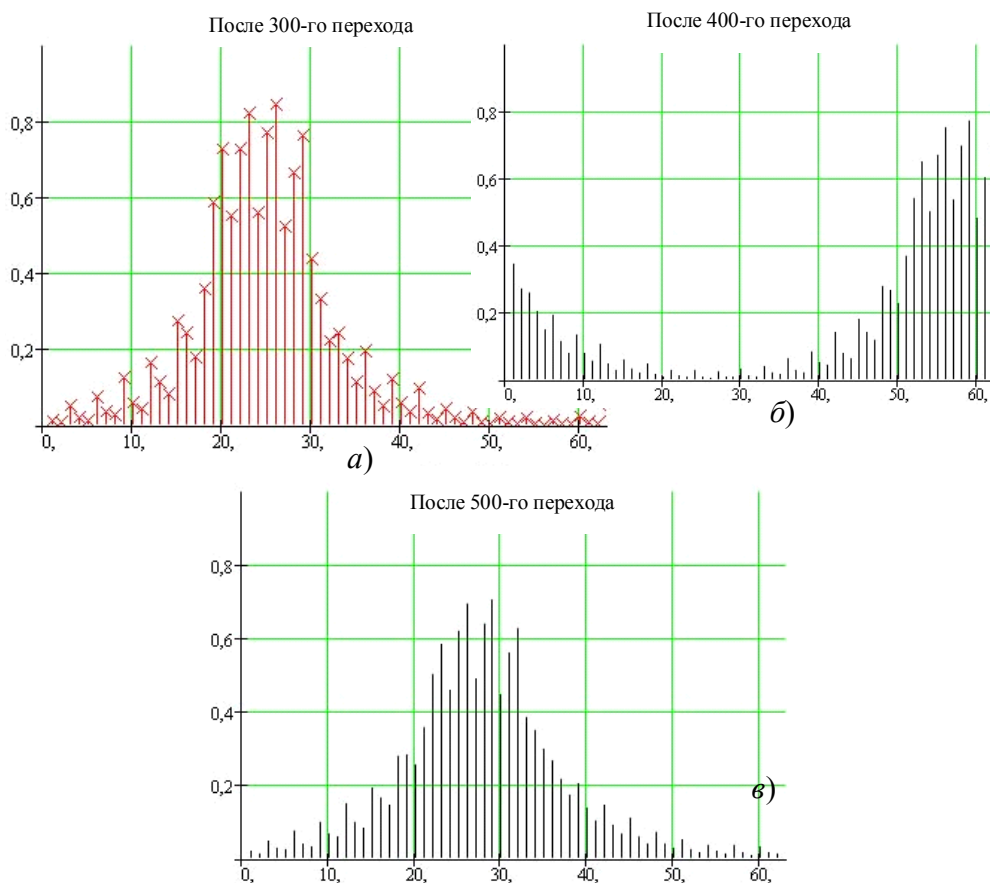


Рис. 6. Номограммы распределения ключевого компонента после 30-го перехода (а); после 400-го перехода (б); после 500-го перехода (в) / 20–27 оборотов барабана /.

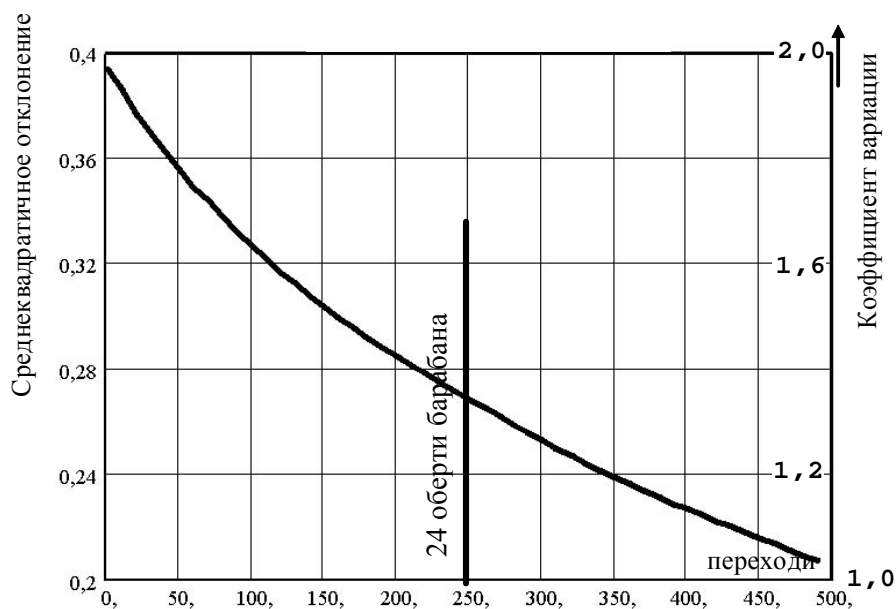


Рис. 7. Изменение коэффициента вариации в ходе переработки.

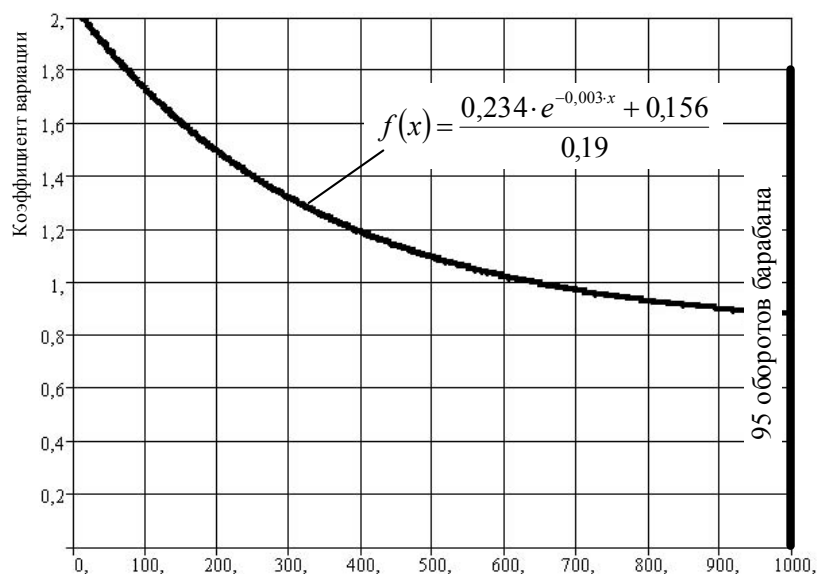


Рис. 8. Зависимость коэффициента вариации смеси от количества переходов (эмпирическая экспоненциальная зависимость).

Расчет большого количества переходов требует привлечения существенных ресурсов компьютера. Поэтому предложено для дальнейшего моделирования процесса смешивания осуществить описание полученной зависимости (рис. 8) при помощи экспоненциальной зависимости. Уравнение имеет вид:

$$f(x) = \frac{0,234 \cdot e^{-0,003 \cdot x} + 0,156}{0,19} \quad (11)$$

Здесь "0,19" – среднее значение концентрации ключевого компонента (12 ячеек ключевого компонента распределены в 63 ячейках всего мусора, $12/63 = 0,19$); 0,234; –0,003; 0,156 – эмпирические коэффициенты конкретной зависимости (рис. 6).

Выводы

Аналитическое математическое моделирование перемешивания муниципальных отходов в процессе их сжигания в барабанной печи позволяет рассчитать полноту использования теплосодержащей части отходов. В рассматриваемом примере рассчитан худший вариант с точки зрения равномерности загрузки компонентов – ключевой компонент находится в соседних ячейках в трех слоях (ячейки от 1 до 12). На рис. 8 видно, что для заданных начальных условий (вероятности перехода составляют 2,5%), даже после 1000

переходов (это 95 оборотов барабана) коэффициент вариации уменьшается вдвое (от 2,07 до 0,9), но остается весьма значительным. Это подтверждает целесообразность предварительного смешивания мусора перед сжиганием.

Предложена подтвержденная экспериментальными исследованиями математическая модель смешивания компонентов в корпусе барабанной печи; модель базируется на математическом аппарате цепей Маркова. Модель позволяет определять концентрацию ключевого компонента в любом элементарном объеме циркуляционного контура машины в любой момент времени и рассчитывать статистические характеристики однородности смеси; модель может быть применена для оптимизации процесса сжигания, за счет продуктивного дожига полимерной части отходов. Обеспечивая рациональное перемешивание при сжигании многокомпонентной смеси отходов, получаем высокую степень выделения тепловой энергии. Для машины периодического действия предложенная модель позволяет оценивать различные регламенты загрузки компонентов. Модель может быть применена для исследования новой конструкции смесителя в виде барабана с соосным с ним лопастным смесителем.

Литература (References)

- [1] Dempsey C.R., Oppelt E.T. Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update. *Air & Waste*, 1993, vol.43, pp. 25–73.
- [2] Gohlke O. Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance. *Waste Management & Research*, 2009, no. 27, pp. 894–906. doi: 10.1177/0734242X09349857.
- [3] Lombardi F., Lategano E., Cordiner S., Torretta V. Waste incineration in rotary kilns: a new simulation combustion tool to support design and technical change. *Waste Management & Research*, 2013, no. 0/0, pp. 1-12. doi: 10.1177/0734242X13484187.
- [4] Lee C.C., Huffman G.L. Energy and mass balance calculations for incinerators. *Energy Sources*, 1998, no. 20(1), pp. 990–1000.
- [5] Huai X.L., Xu W.L., Qu Z.Y., Li Z.G., Zhang F.P., Xiang G.M., et al. Numerical simulation of municipal solid waste combustion in a novel two-stage reciprocating incinerator. *Waste Management*, 2008, no.28, pp. 15–29. doi.org/10.1016/j.wasman.2006.11.010.
- [6] Yang Y.B., Swithenbank J. Mathematical modeling of particle mixing effect on the combustion of municipal solid wastes in a packed-bed furnace. *Waste Management*, 2008, no. 28, pp. 1290–1300. doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.012
- [7] X.L. Huai, W.L. Xu, Z.Y. Qu, Z.G. Li, F.P. Zhang, G.M. Xiang, S.Y. Zhu, G. Chen Analysis and optimization of municipal solid waste combustion in a reciprocating incinerator. *Chemical Engineering Science*, 2008, vol. 63, is. 12, pp. 3100-3113.
- [8] Wilson D.C., Rodic L., Scheinberg A., Velis I C.A. and Alabaster G.. Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, 2012, vol. 30(3), no. 7, pp. 237 - 254.
- [9] Robinson, H.D., Knox, K., Formby, R. and Bone, B.D. Science Report Testing of residues from incineration of municipal solid waste. *Environment Agency*, 2004, 125p.
- [10] Gielar, A., Helios-Rybicka, E. Enviromental impact of a hospital waste incineration plant in Krakow (Poland). *Waste Management & Research*, 2013, vol. 31 no. 7, pp. 722 – 728.
- [11] Aurell, J., Fick, J., Haglund, P., Marklund, S., Effects of sulfur on PCDD/F and PCDT formation under stable and transient combustion conditions during MSW incineration. *Chemosphere*, 2009, vol. 76, pp. 767–773. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.065.
- [12] Jones A.M., Harrison R.M. Emission off ultrafine from the incineration of municipal solid waste: A Review. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 140, pp. 519-528. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.005
- [13] Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens. J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 2009, vol. 29, is. 10, pp. 2625–2643.
- [14] Emery A., Davies A., Griffiths A. and Williams K. Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, no. 49, pp. 244–263.
- [15] Consonni S., Giugliano M. and Grosso M. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part A: mass and energy balances. *Waste Management*, 2005, no. 25, pp. 123–135.
- [16] Grosso M., Motta A. and Rigamonti L. Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*, 2010, no. 30, pp. 1238–1243.
- [17] Turconi R., Butera S., Boldrin A., Grosso M., Rigamonti L. and Astrup T. Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models. *Waste Management & Research*, 2011, no. 29(10), pp. 78–90. doi: 10.1177/0734242X11417489
- [18] Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. European commission, 2006, 638 p.
- [19] Yem'yanova I.A., Dobrokhodova O.V., Anishchenko A.I. *Sovremennye stroitel'nye smesi i oborudovanie dlya ikh prigotovleniya* [Modern building mixes and equipment for their preparation]. Kharkov, 2010. 146 p.
- [20] Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.YU. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials]. Moscow, 1985. 440 p.
- [21] Kol'man–Ivanov E.E. *Konstruirovaniye i raschet mashin khimicheskikh proizvodstv* [Design and calculation of chemical production machines]. Moscow, 1985. 408 p.
- [22] Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Makarov YU.I. *Osnovy raschyota protsessov smesheniya sypuchikh materialov. Issledovaniye i razrabotka smesitel'nykh apparatov*. Abstract Diss. dokt. tekhn. Nauk [Basics of calculating the processes of mixing loose materials. Research and development of mixing devices. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 1975. 35 p.
- [23] Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Bulk material processing in

- drum machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 220 p.
- [24] Aleksandrovskiy A.A. *Issledovanie protsessa smesheniya i razrabotka apparatury dlya prigotovleniya kompozitsiy, sodержashchikh tverduyu fazu* Abstract Diss. dokt. tekhn. Nauk [Study of the mixing process and development of apparatus for the preparation of compositions containing a solid phase. Dr. tech. sci. diss]. Kazan', 1976. – 48 p.
- [25] Kafarov V.V., Aleksandrovskiy A.A., Dorokhov I.N. *Matematicheskaya model' kinetiki smesheniya binarnykh smesey, sodержashchikh tverduyu fazu* [Mathematical model of the mixing kinetics of binary mixtures containing a solid phase]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1975, vol. 224, no. 5, pp. 1134 – 1137. (In Russian).
- [26] Krot O.YU. Eksperimental'ni doslidzhennya ta analitichne modelyuvannya protsesu zmishuvannya komponentiv materialu v barabanno–valkovomu pererobniku [Experimental research and analytical modeling process of mixing the components of the material in drum–roll refiners] *Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture*, 2011, no.8, pp. 18–27. (In Ukrainian).
- [27] Selivanov YU.T., Pershin V.F. *Raschet i proektirovanie tsirkulyatsionnykh smesiteley sypuchikh materialov bez vnutrennikh peremeshivayushchikh ustroystv* [Calculation and design of circulating mixers of bulk materials without internal stirring devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 120 p.
- [28] Krot O.YU., Neporozhnev O.S., Krot O.P. *Laboratorniy praktikum z vivchennya distsiplini "Osnovi naukovikh doslidzhen"* [Laboratory workshop on the discipline "Basic scientific research"]. Kharkiv, 2009. 99 p.

Сведения об авторах.



Крот Ольга Петровна
Кандидат технических наук, докторант кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и использования тепловых вторичных энергоресурсов, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры. Область научных интересов: оптимизация и моделирование сжигания муниципальных отходов, природоохранные технологии.
E-mail: uch.opk@gmail.com



Ровенский Александр Иванович
Кандидат технических наук, зав. отделом региональной экологии Северо–Восточный Научный Центр. Область научных интересов: термо-каталитическая очистка выбросов, разработка комплексов по сжиганию отходов.
E-mail: guandrina@mail.ru