

Modeling of Installations with a Rotary Kiln for Thermal Decontamination of Wastes

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. The object of the study is a plant for incineration of solid wastes in a rotary kiln with an afterburning chamber and thermal catalytic emission purification. The aim of the study was to determine the rational layout of the solid wastes loading system and the location of the burner during combustion in the system - a rotary kiln and an afterburning chamber. The results of simulation countercurrent and concurrent gas flow and wastes in the form of temperature gradients in the rotary kiln and afterburner chamber are presented. It is found that in the initial part of the rotary kiln, a temperature of more than 1000 °C is created on its lower surface, almost one-third of the length of the furnace (2.5-3 times more than in the concurrent mode). In a zone close to unloading, the temperature is minimal (less than 100 °C), therefore, the slag does not tolerate heat from the furnace, it has time to cool down. Criteria for the efficiency of the rotary kiln have been proposed: the length of the section where the maximum combustion temperature is reached, the length of the section before discharge of the slag, the temperature of the slag. A more efficient configuration for all the criteria is one that ensures the counter movement of debris and gas. To effectively use the volume of the afterburner chamber, the burners must be located at the maximum distance from each other. The outlet flue must also be as far from the burners as possible.

Keywords: wastes incineration, rotary kiln, waste to energy, municipal wastes, modeling, combustion modeling, movement of gas flow.

DOI: 10.5281/zenodo.1217255

Modelarea instalațiilor cu cuptor rotativ pentru detoxificarea termică a deșeurilor

Krot O. P.¹, Rovensky A. I.²

¹ Universitatea Națională de Inginerie Civilă și Arhitectură Kharkov

² Centrul Științific Nord-Est al SNC și MES din Ucraina
Kharkov, Ucraina

Rezumat. Obiectul studiului este o unitate pentru arderea deșeurilor menajere solide într-un cuptor rotativ cu o cameră de ardere post-combustie și purificare a emisiilor catalitice termice. Scopul lucrării este acela de a determina aranjamentul rațional al sistemului de încărcare a gunoierului și amplasarea arzătorului în sistemul de neutralizare catalitică termică cu cuptor rotativ și arzător de gaz și alegerea unei versiuni raționale a mișcării de gaze și deșeuri: "traficul concomitent" sau "traficul contrasens". Considerăm, că este rațional faptul că gazele care părăsesc cuptorul rotativ au cea mai mare temperatură la o intensitate energetică specifică fixă, iar temperatura zgurii deșeurilor este minimă. Acest lucru oferă arderea completă a gazelor cu consum redus de energie, posibilitatea utilizării acestor gaze în tehnologii conexe, de exemplu, pentru producerea de materiale de construcție. Se propune un model matematic. Au fost determinate zonele cu cele mai mari pierderi termice și distribuția gradientilor de temperatură și a coeficienților de exces de oxigen. S-a constatat, că în zona intare a cuptorului rotativ, pe suprafața inferioară a acestuia se formează o temperatură mai mare de 1000 ° C, aproape o treime din lungimea cuptorului (de 2,5-3 ori mai mare decât în regimul „trafic concomitent”). În zonă aproape de descărcare, temperatura este minimă (mai mică de 100 ° C), prin urmare zgura nu tolerează căldura din cuptor. Pentru prima dată sunt formulate criteriile pentru eficiența cuptorului rotativ: lungimea secțiunii unde se atinge temperatura maximă de ardere; lungimea secțiunii cu o temperatură minimă înainte de evacuarea zgurii; temperatura zgurii la ieșire.

Cuvinte-cheie: incinerarea deșeurilor municipale, cuptor cu tambur, deșeuri energetice, modelare, modelarea arderii, circulația gazului.

Моделирование установок с вращающейся печью для термического обезвреживания отходов

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. Объект исследования – установка для сжигания твердых бытовых отходов во вращающейся печи с камерой дожигания и термокаталитической очисткой выбросов. Цель работы – определение рациональной компоновки системы загрузки мусора и расположения горелки в системе термокаталитического обезвреживания с вращающейся печью и камерой газового дожигания, и выбор рационального варианта движения газа и отходов: «сопутствующее движение» или «встречное движение». Рациональным считаем вариант, при котором отходящие из вращающейся печи газы имеют наибольшую температуру при фиксированной удельной энергоемкости, а температура отходящего шлака минимальна. Это обеспечивает малоэнергоёмкое дожигание газов, возможность использования этих газов в смежных технологиях, например, для производства строительных материалов. Предложена математическая модель. Модель реализована с использованием методов конечных элементов. Определены зоны с наивысшими тепловыми потерями и распределение градиентов температур и коэффициентов избытка кислорода. Для каждого из вариантов сравнивались также диаграммы температур вдоль двух осей. Одна ось – по линии движения газов, а вторая – по поверхности материала. Выяснено, что в начальной части вращающейся печи на ее нижней поверхности создается температура больше 1000°C, почти на трети длины печи (в 2,5-3 раза больше, чем в варианте с сопутствующим движением). В зоне, близкой к разгрузке, температура минимальна (менее 100 °C), следовательно, шлак не выносит тепло из печи. Впервые сформулированы критерии эффективности работы вращающейся печи: длина участка, где достигается максимальная температура горения; длина участка с минимальной температурой перед разгрузкой шлака; температура шлака на выходе. Выбрана более эффективная конфигурация по всем критериям (со встречным движением отходов и газа). Для рационального использования объема камеры дожигания предлагается располагать горелки на максимальном расстоянии друг от друга. Выходной газосход также должен быть максимально удален от горелок.

Ключевые слова: сжигание муниципальных отходов, барабанная печь, отходы в энергию, моделирование, моделирование горения, движение газовых потоков.

Введение

Доступные источники энергии могут быть классифицированы как возобновляемые и невозобновляемые. Возобновляемые источники энергии, в классическом понимании, — это те, которые пополняются естественным путем. В этом контексте твердые бытовые отходы (ТБО) также могут считаться источником возобновляемой энергии, поскольку они производятся постоянно и в больших количествах, оставаясь доступными в течение длительного времени в природе [1]. Актуальной проблемой современности является безопасная утилизация бытового мусора. По данным Евростата [2] страны Европейского Союза достаточно широко используют мусоросжигающие предприятия, 27% бытового мусора в странах Европы сжигается. Дания, Франция, Германия, Нидерланды, Швеция и Швейцария имеют наибольшие установленные мощности по сжиганию в процентах от общего объема ТБО. Сжигание также широко используется за пределами Европы. ТБО является потенциальным источником энергии, как в

развитых, так и в развивающихся странах [3,4]. Непосредственное сжигание отходов может привести к образованию пара, а затем производить энергию с использованием турбин и генераторов. Обзор типов ТБО, которые в настоящее время используются как возобновляемые источники энергии для электроснабжения городских жителей, рассматриваются авторами [5]. Состав образующихся отходов чрезвычайно нестабилен вследствие сезонных колебаний, образа жизни населения, демографической структуры, географического положения и законодательных решений. Теплотворную способность ТБО изучали многие авторы [6], [7], [8]. Было установлено, что теплотворная способность сильно зависит от морфологического состава, влажности и зольности отходов, и колеблется в широком диапазоне от 4 до 15 МДж/кг. Средняя теплотворная способность ТБО составляет приблизительно 10 МДж/кг, что подтверждает логичность использования отходов в качестве источника энергии. Теплотворная способность сортированных отходов выше, чем несортированных [9].

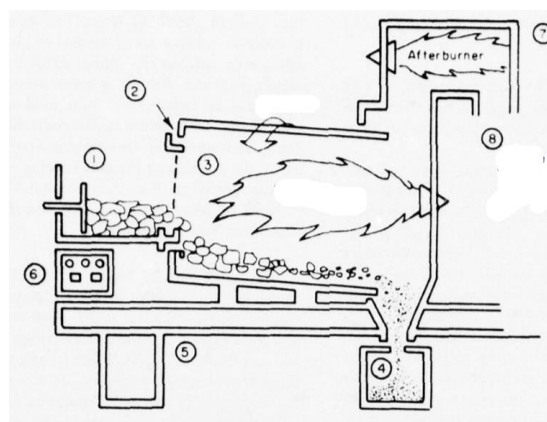
Для сжигания ТБО могут использоваться различные типы сжигающих устройств: с колосниковыми решётками, в камерных печах, в многоподовых печах, в циклонных печах, распылительных печах, в печах с псевдоожиженным слоем, во вращающихся печах [10]. Термин «отходы в энергию» "waste-to-energy" - касается производства энергии с помощью термической обработки неопасных отходов. Рамочная Директива об отходах [11] введена в действие в 2008 году и позиционирует мусоросжигательные заводы как операцию по восстановлению энергии, при условии, что они соответствуют определенным критериям. Обычным атрибутом таких устройств является так называемая камера дожигания, необходимая для обезвреживания диоксинов, являющихся канцерогенными. Выбор рациональной компоновки и состава оборудования, входящего в комплекс по сжиганию различного по составу мусора и различной производительности, является задачей актуальной.

I. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Учитывая сложность и высокую стоимость технологии сжигания, оптимизацию процессов выгодно проводить на основе моделирования. Известны различные подходы к математическому моделированию [12]. Во многих работах авторы предварительно изучали морфологический состав ТБО [6–9] и полученные модели в таких исследованиях ориентировались на конкретный материальный баланс. Такой подход описывает технологию только на локальном уровне. Некоторые модели предполагают расчет материально-теплого баланса в отдельных, последовательно расположенных тепловых агрегатов, параметры на входе в каждый последующий определяется параметрами в предыдущем [13], [14], [15], [16], [17]. Основная цель этих исследований заключалась в получении регрессионной зависимости, привязанной к оценке теплотворной способности ТБО. Так в [18], вращающаяся печь моделируется множеством последовательных сечений. Температура, тепловыделение и масса твердых компонентов в каждом из них определяется исходя из теплового баланса для конкретного состава мусора. Очевидно, недостатком таких моделей можно считать

отсутствие информации о распределении температуры по площади сечения. Из-за этого невозможно оценить появление неэффективных («мёртвых») зон в полости печного агрегата.

В работе [19] дымовые газы идут в противоположном направлении с ТБО (рис. 1). Использование противоточного движения позволяет высушивать отходы повышенной влажности и повышают полноту сгорания отходов. Недостатком работы этой установки является то, что камера дожигания находится с той же стороны, с которой и горелка. При этом тепло от горелки не рационально распределяется по всей длине печи.



1 – загрузочное устройство, 2 – подсос дополнительного воздуха, 3 – вращающаяся топливная горелка печи, 4 – шлак, 5 – опорная рама и опоры, 6 – устройство управления, 7 – камера дожигания, 8 – топливные горелки камеры дожигания.

Рис. 1. Установка сжигания ТБО со встречным движением газов и ТБО [19].

Противоточная установка для сжигания [20] состоит из двух неподвижных камер сжигания, расположенных на противоположных концах вращающейся камеры. Такая конструкция эффективно направляет поток горячих газов сгорания в направлении, противоположном потоку отходов в пределах одной вращающейся камеры сжигания, для подсушивания отходов, которые подлежат сжиганию, и обеспечивает полное сгорание побочных продуктов сжигания. Недостатком применения таких трех блоков сжигания является сложность и непредсказуемость управления процессом горения отходов.

На рисунке 2 – образцы шлаков, полученных при реализации различных конфигураций (сопутствующее и встречное

движение) [21]. С сопутствующим движением газа и материала шлак образуется черного цвета с высоким содержанием углерода, что говорит о неполном сгорании отходов. В варианте со встречным движением газа и материала шлак серого цвета, что доказывает отсутствие углерода.

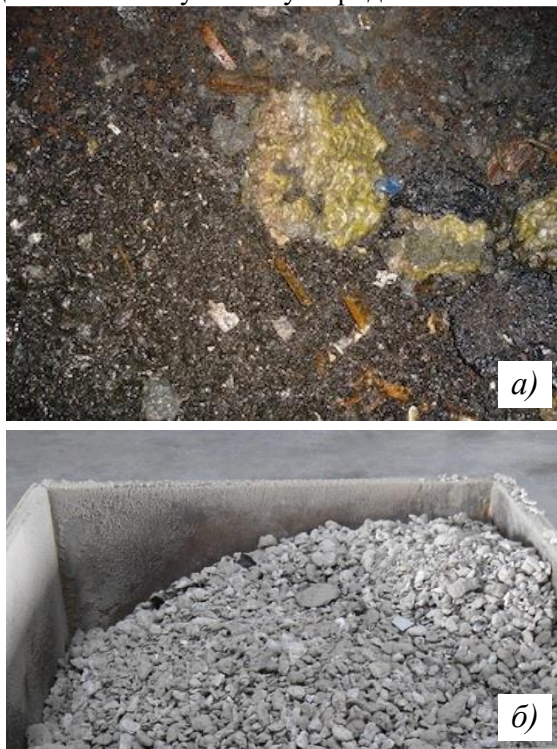


Рис. 2. Фото образцов шлака, полученного экспериментальным путем на печах [21]: а) сопутствующее движение газа и материала; б) со встречным движением.

Таким образом, актуальным вопросом является разработка модели полноты сгорания ТБО во вращающейся печи, которая описывает температурные процессы на поверхности материала (отходов), не зависимо от морфологического состава отходов, а следовательно теплоты сгорания (поскольку этот показатель чрезвычайно не устойчив). Какой бы ни была теплотворная способность ТБО, в печи поддерживается определенная температура, не ниже 850°C , сжиганием дополнительного топлива (газ или дизель), и температура в камере дожигания должна быть в пределах 1200°C . Основным направлением для исследования является получение поля температур на поверхности отходов и максимальное использование факела горелок дополнительного топлива для полноты сжигания отходов.

Для оптимизации рабочих процессов сжигания могут быть использованы модели, использующие методы конечных элементов [22, 23].

Цель исследования – определение рациональной компоновки системы загрузки мусора и расположения горелки в системе термokatалитического обезвреживания с вращающейся печью и камерой газового дожигания, и выбор рационального варианта движения газа и мусора: «сопутствующее движение» или «встречное движение».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: выбор критериев оценки эффективности, моделирование системы с сопутствующим движением и встречным движением.

II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

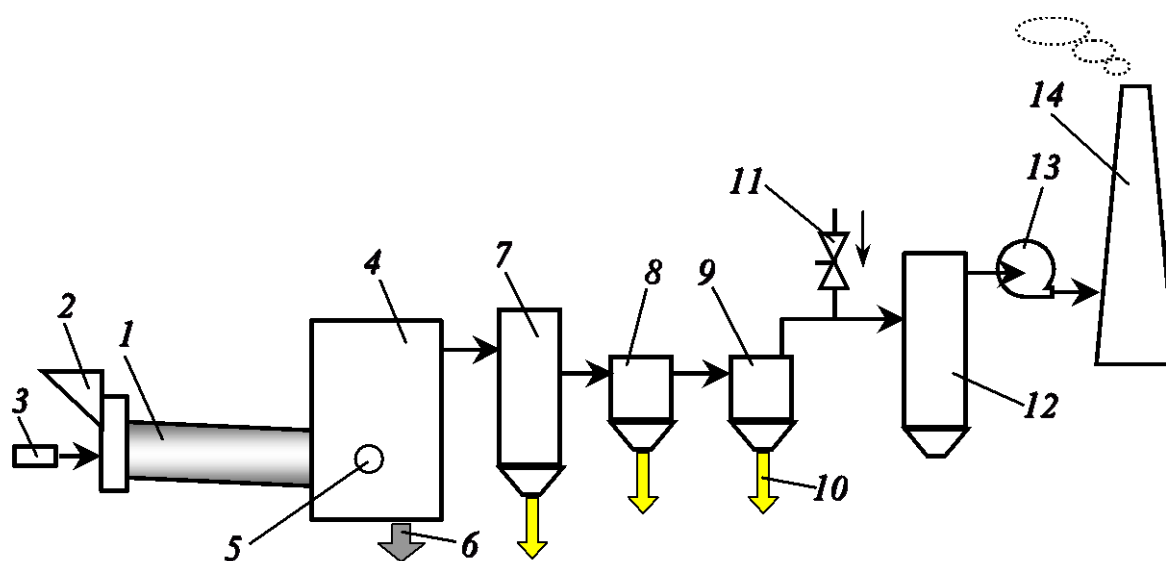
В Харькове сотрудниками Северо-Восточного Научного Центра разработаны конструкции ряда установок для сжигания отходов различного происхождения. Создана установка для сжигания отходов с вращающейся печью (рис. 3). Установка работает таким образом. Мусор загружается во вращающуюся печь питателем с гидравлическим толкателем порционно и непрерывно (поз. 2 на рис. 3). Барабанная (вращающаяся) печь 1 вращается от опорных роликов. Корпус печи с помощью двух бандажей опирается на опорные ролики. Один из двух опорных роликов в опоре является приводным, другой – не приводным. Приводные ролики связаны с приводом и между собой трансмиссионными валами. С торца загрузки мусора в печь подходит и горелка 3. Воздух для сжигания подается к этой горелке горячий и нагретый при прохождении через рекуператор. Мусор движется внутри барабанной печи 1 до разгрузки благодаря наклону корпуса печи. Горелка используется длиннофакельная. Шлак от сгорания мусора, выходит из печи и попадает в зольник 6. Газообразные продукты сгорания направляются в камеру дожигания 4. Назначение камеры дожигания - создание высокой температуры (до 1200°C) в отходящих газах. Такой уровень температур гарантирует обезвреживание основной части органических составляющих. В камеру дожигания 4 подходит пара горелок 5, а воздуха для этих горелок подается также от теплообменника-рекуператора 9. Производительность потоков горячего

воздуха в горелки 3 и 5 регулируется распределителем воздуха 24. Подача атмосферного воздуха в теплообменник обеспечивается вентилятором 23. Дымовые газы после камеры дожигания проходят через теплоутилизатор 7, где отбирается тепло для бытовых нужд и газы охлаждаются до 500–600°C. Теплоутилизатор также используется для нагрева воздуха, подаваемого в печную горелку 3 и горелки камеры дожигания 5. Далее дымовые газы по газоходу поступают в пылеуловитель 8, в котором очищается от пыли высокой плотности. Дальнейшая очистка газов выполняется каталитическим реактором 9. В реакторе при температуре

500–600°C окисляются остатки органических составляющих и восстанавливаются оксиды азота до молекулярного азота. Снижение температуры газов, поступающих к рукавному фильтру 12, обеспечивается дымоохладителем 11. Движение газов вдоль всего тракта установки обеспечивается дымососом 13, а также разрежением, создаваемым дымовой трубой 14.

III. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа процесса применялась система моделирования, основанная на методе конечных элементов.



1 – вращающаяся печь, 2 – загрузочное устройство, 3 – горелка печи топливная, 4 – камера дожигания, 5 – топливные горелки камеры дожигания, 6 – шлак, 7 – теплоутилизатор, 8 – инерционно-вихревой коаксиальный пылеуловитель, 9 – каталитический реактор, 10 – зола уноса, 11 – дымоохладитель, 12 – рукавный фильтр, 13 – дымосос, 14 – дымовая труба.

Рис. 3. Общий вид установки сжигания ТБО.

Согласно методу конечных элементов, все исследуемое пространство разбивалось на определенное количество элементарных участков, в каждом из которых в соответствии с выбранной моделью, определенным веществом и начальными условиями рассчитывается состояние. К характеристикам состояния каждого элемента относятся: давление, скорость (в любом направлении), концентрация, плотность, энтальпия, температура и др. Любая из этих характеристик после процедуры расчета может быть отображена на участках модели в наглядном виде. Расчет последующего состояния каждого элемента происходит, на

основании результатов моделирования предыдущего состояния. Каждый такой шаг изменения состояния является итерацией. Начальные итерации отражают динамику развития процесса. О том, что моделируемый режим является установившимся, можно сделать вывод по отсутствию изменений состояния модели в течение нескольких итераций.

Исследуемое пространство модели – вся полость установки термического обезвреживания, смоделированная в 3D-САПР в масштабе 1:1. 3D-модель экспортировалась в формат «*.stl», после чего импортировалась в систему моделирования

движения потоков и горения. Выбранная система моделирования и визуализации движения сред позволяет моделировать прохождение газовой смеси при любых изменениях плотности и больших (турбулентных) числах Рейнольдса. Выбранная модель и расчетные уравнения означают, что будут решены уравнения Навье-Стокса, уравнения переноса турбулентных функций, энергетическое равновесие, уравнение для восстановленной концентрации горючего, уравнение для концентрации горючего и уравнения для пульсаций [23], [24].

В частности, течение газового потока моделируется уравнением Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla(\rho v \times v) = -\nabla p + \nabla((\mu + \mu_t)(\nabla v + (\nabla v)^T)) + S \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0. \quad (2)$$

Здесь источник S определяется:

$$S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B + R, \quad (3)$$

где ρ – плотность горячих газов – продуктов сгорания; ρ_{hyd} – плотность воздуха; v – скорость; ∇ – оператор Гамильтона (набла-оператор); p – давление; μ – вязкость среды; μ_t – турбулентная кинематическая вязкость; B – составляющие сил вращения (Кориолиса и центробежной); R – силы сопротивления.

$$B = -2\omega v - \omega \cdot \omega \cdot r, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость; r – радиус.

Другим уравнением в системе принимается уравнение сплошности потока.

Уравнение энергии

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho v h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q. \quad (5)$$

Концентрация C_p трактуется как массовая концентрация вещества. Так, при моделировании горения газа на входе в

моделируемую установку, концентрацию горючего вещества (природного газа) считаем равной 1, концентрацию же окислителя (воздуха) на входе в установку считаем равной 0. Для концентрации решается уравнение конвективно-диффузионного переноса:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \nabla(\rho v C) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right). \quad (6)$$

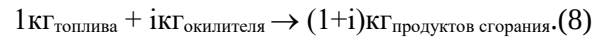
Состав смеси определяется заданием концентрации, причем концентрация может быть как массовой, так и объемной.

Модель горения основана на следующих уравнениях слабосжимаемой модели:

- уравнения Навье-Стокса;
- уравнение энергии;
- уравнение состояния;
- уравнения для скалярных величин ξ , описывающих концентрацию топлива, окислителя, продуктов сгорания, нейтрального газа и оксидов азота.

$$\frac{\partial(\rho \xi)}{\partial t} + \nabla(\rho v \xi) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \xi \right) + Q_\xi. \quad (7)$$

Процес горения моделируется реакцией:



Модель Зельдовича – модель "что смешалось, то сгорело". Скорость реакции (в формуле (8) стрелка "→") предполагается бесконечно большой. В этой модели окислитель и горючее не существуют одновременно в одной точке пространства.

При моделировании предполагали, что с учетом коэффициента избытка воздуха 1,2 на сжигание требуемых 21 м³/ч потребуется 21*10*1,2=252 м³/ч воздуха при нормальных условиях.

Принимаем плотность природного газа 0,75 кг/м³; воздуха 1,3 кг/м³.

Расход массовый составит:

– для газа: (21,12 м³/ч)*(0,75 кг/м³)=15,84 кг/ч; секундный расход 0,0044 кг/с.

– для воздуха: (252 м³/ч)*(1,3 кг/м³)=327,6 кг/ч; секундный расход 0,091 кг/с.

Подсчитаем, каковы должны быть нормальные массовые скорости газа и воздуха на входе в инжекционную горелку.

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,106^2}{4} = 0,0088 \text{ м}^2$$
 - через это отверстие подается газ в каждой горелке;

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,222^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,291^2}{4} = 0,0387 - 0,0143 = 0,0244 \text{ м}^2$$

- через это отверстие подается воздух в каждой горелке.

Горелок в агрегате 3 штуки (одна во вращающейся печи и две в камере дожигания). Поэтому, площадь сечения для подачи газа $0,0088 \cdot 3 = 0,0264 \text{ м}^2$; площадь сечения для подачи воздуха $0,0244 \cdot 3 = 0,0732 \text{ м}^2$.

Определим параметр «нормальная массовая скорость» для этих отверстий для этих производительностей:

$$\frac{0,0044 \frac{\text{кг}}{\text{с}}}{0,0264 \text{ м}^2} = 0,167 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ - для газа,}$$

$$\frac{0,091 \frac{\text{кг}}{\text{с}}}{0,0732 \text{ м}^2} = 1,27 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ - для воздуха.}$$

В существующей (базовой) установке (рис. 3) движение газов сжигания и ТБО движутся в одну сторону (сопутствующий движение). Схема движения мусора и газов в базовой установке - на рис. 4, 5.

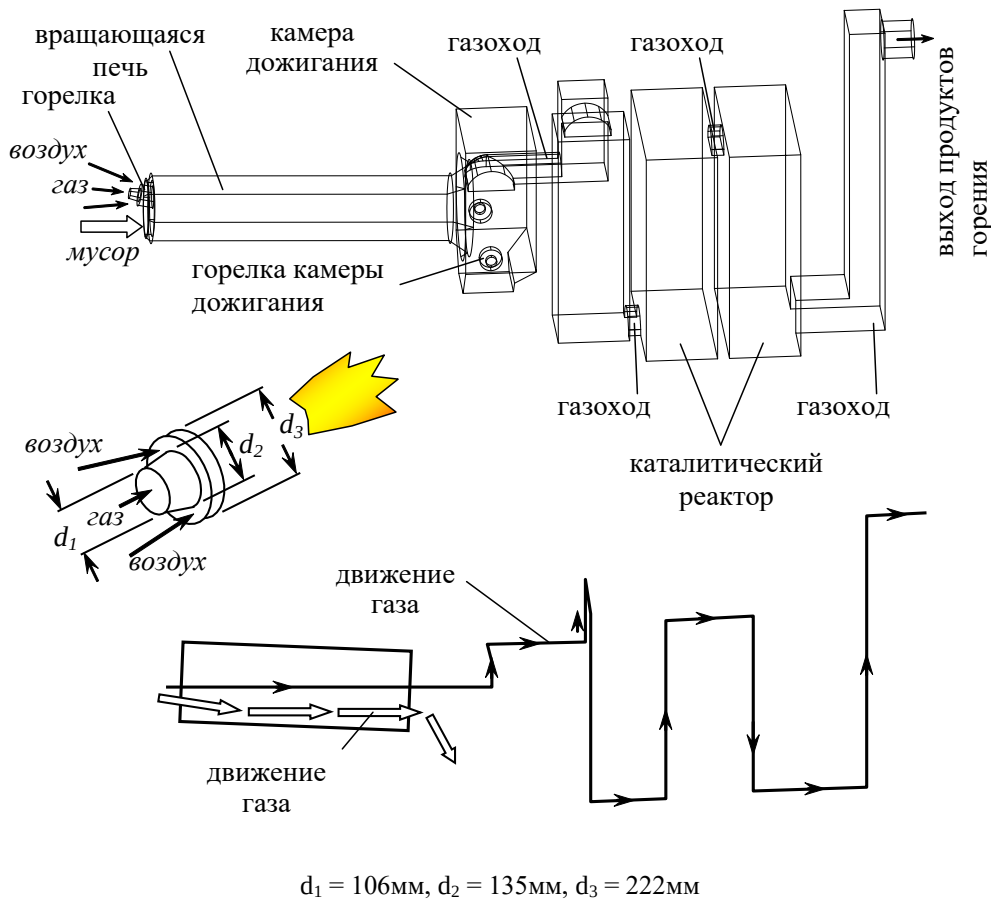


Рис. 4. Вариант компоновки установки с сопутствующим движением газов и мусора.

На рис. 6 приведены результаты моделирования варианта с сопутствующим движением в виде градиентов температур в барабанной печи и камере дожигания. На рис. 6 видим, что в начальной части вращающейся печи на ее нижней поверхности не создается достаточно высокой температуры, а верхняя часть камеры дожигания практически не прогревается. Однако, для количественной

оценки распределения температур удобнее применять двухмерные графики (диаграммы) распределения параметра. На рис. 7 - графики распределения температур во вращающейся печи и камере дожигания на уровне оси барабана (верхний график) и на уровне нижней стенки барабана, где находится мусор и получаемый из него шлак (нижний график на рис. 7). Эти же графики,

экспортированные в Excel и построенные с его помощью, – на рис. 8.

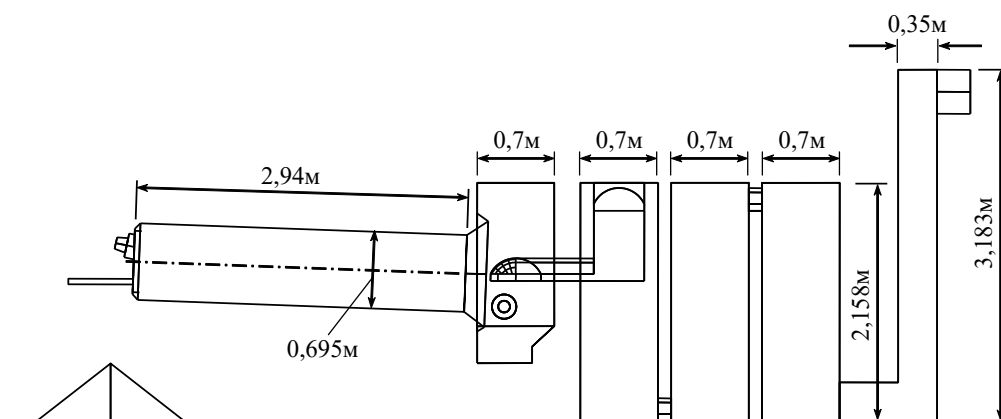


Рис. 5. Основные габариты установки.

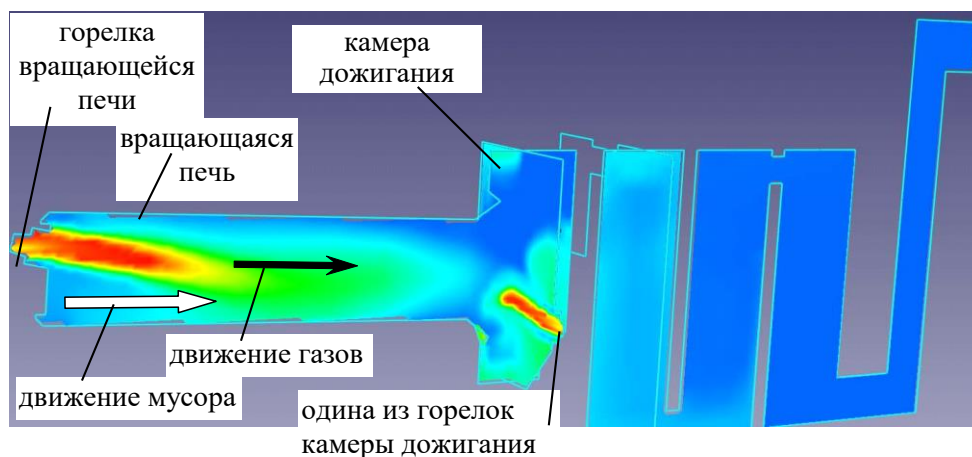


Рис. 6. Градиенты температур в установке с сопутствующим движением газов и ТБО (инструмент - заливка).

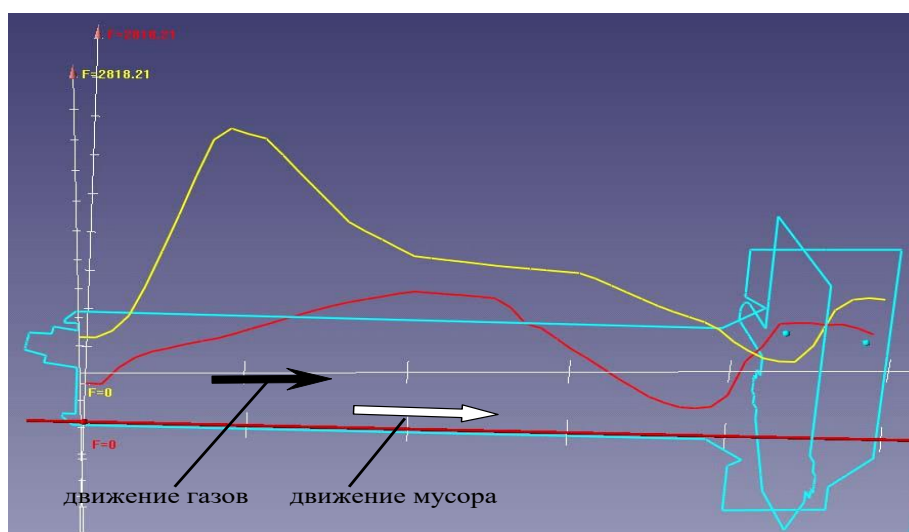


Рис. 7. Контур печи с графиками температур в установке с сопутствующим движением газов и ТБО.

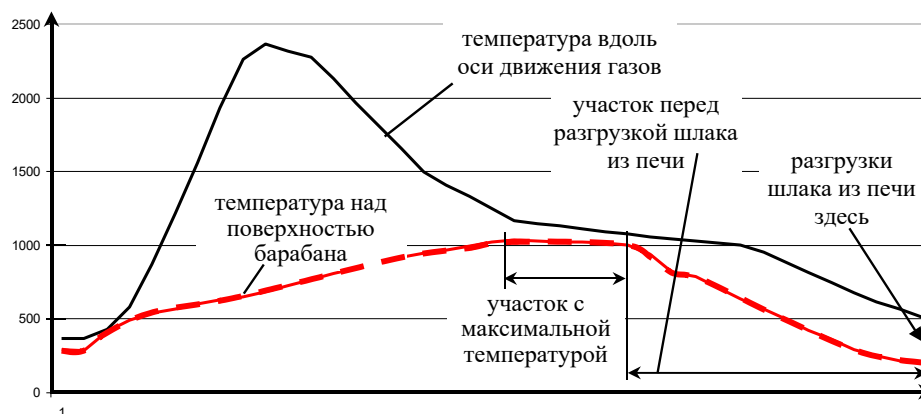


Рис.8. Графики температур в установке с сопутствующим движением газов и ТБО.

Из рисунка 8 видно, что участок, на котором достигается максимальная температура в материале, достаточно небольшая (около 10% от длины печи). Очевидно, что полнота сжигания зависит от продолжительности участка высокой температуры. Участок перед разгрузкой шлака из печи, где температура снижается, достаточно большой. Температура на выходе из печи на уровне расположения шлака (правая точка нижнего графика на рис. 8) достаточно высока (около 200°C). Это означает, что шлак выходит из печи довольно горячим, вынося с собой тепло и требуя мер для охлаждения. Причиной этих недостатков, в частности является то, что движение газов и

мусора во вращающейся печи является сопутствующим.

Итак, критериями сравнения эффективности работы вращающейся печи выбраны следующие:

1. длина участка, где достигается максимальная температура на поверхности материала;
2. длина участка перед разгрузкой шлака из печи;
3. температура на поверхности шлака на выходе из вращающейся печи.

На рисунке 9 - градиенты температур и коэффициента избытка воздуха в поперечном сечении камеры дожигания.

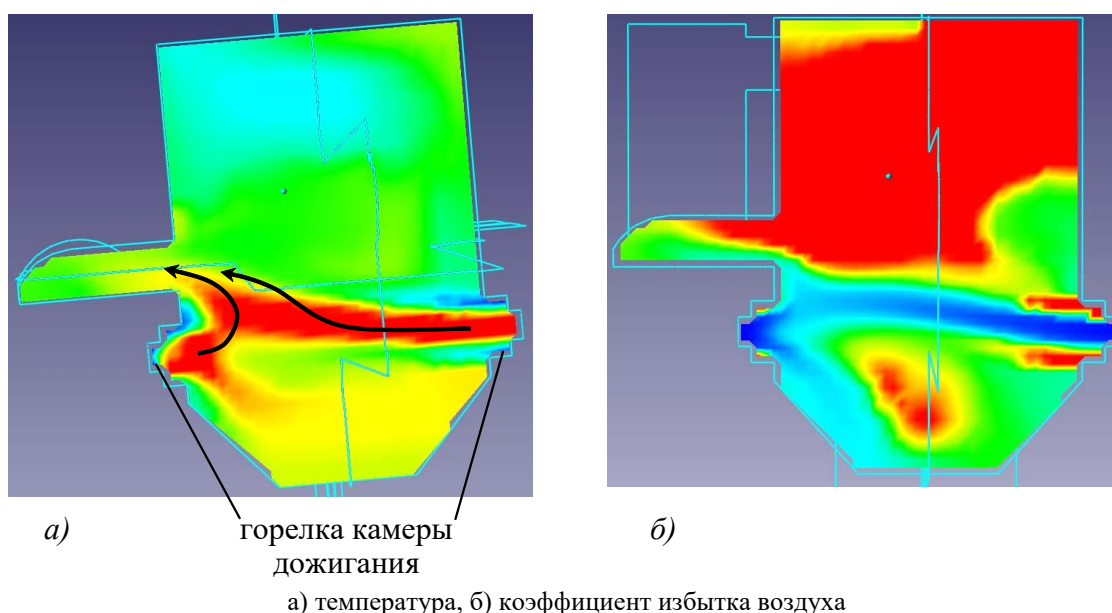


Рис. 9. Эффективность работы камеры дожигания.

Из рис. 9 видно, что максимальная температура в камере дожигания сосредотачивается только в небольшом объеме. В большей части камеры дожигания горения не происходит, коэффициент избытка воздуха в этой зоне самый большой. Горелки расположены друг напротив друга, причем одна из них расположена в непосредственной близости от газохода отвода дымовых газов. Поток газов от этой горелки попадает почти сразу в газоход на выход из камеры дожигания.

Следующим этапом исследования был анализ варианта встречного движения газа и мусора во вращающейся печи. Вариант компоновки такой установки - на рис. 10. В такой компоновке камеру дожигания мы расположили над питателем мусора. Мусор, как и в предыдущем варианте, движется вдоль барабанной печи благодаря ее наклонному расположению. Горелка размещена в противоположном торце печи (рис. 10).

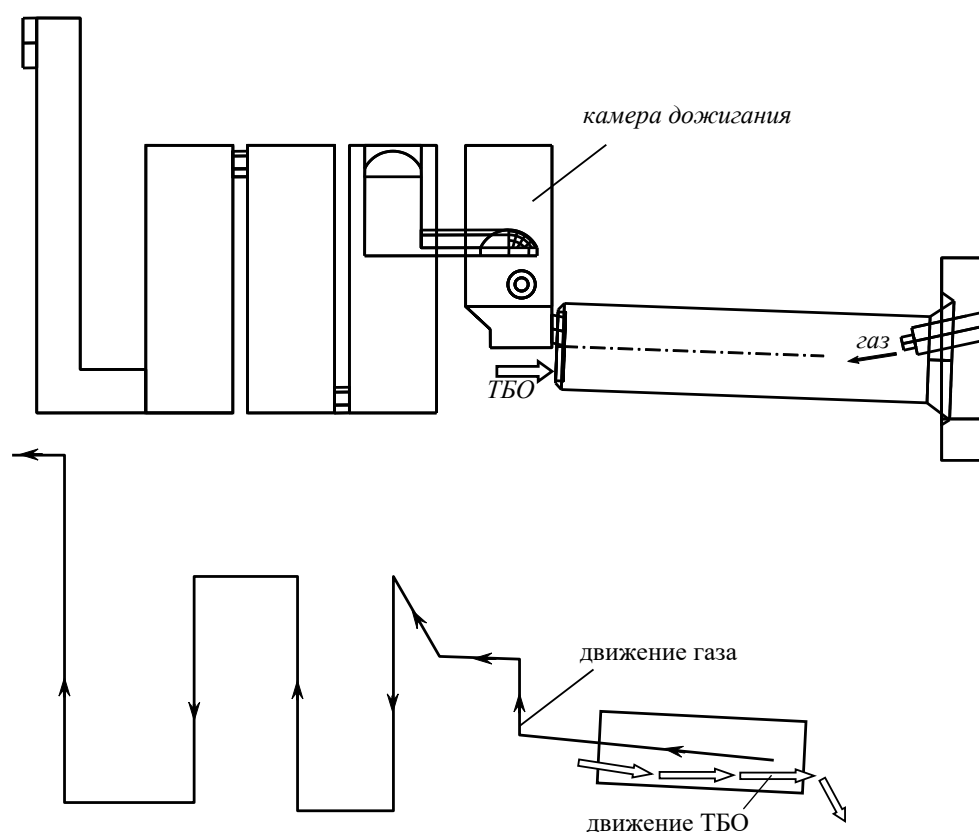


Рис. 10. Вариант компоновки установки со встречным движением газов и ТБО.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 11 приведены результаты моделирования варианта с встречным движением в виде градиентов температур в барабанной печи и камере дожигания. На рис. 12, 13 - графики распределения температур во вращающейся печи и камере дожигания на уровне оси барабана (верхний график) и на уровне нижней стенки барабана, где находится мусор и получаемый из него шлак (нижний график на рис. 12). Из рис. 12, 13 видим, что в начальной части вращающейся печи на ее нижней поверхности создается температура больше 1000°C почти на трети

длины печи (в 2,5-3 раза больше, чем в варианте с сопутствующим движением). В зоне, близкой к разгрузке, температура минимальная (менее 100°C). Итак, шлак не выносит тепло из вращающейся печи, он успевает остыть.

На рис. 14 приведены диаграммы температур над поверхностью в вариантах установок с сопутствующим и встречным движением газов и мусора (здесь диаграмма, соответствует сопутствующему движению, развернуто зеркально относительно вида этого графика на рис. 13, это позволит сравнивать графики, считая, что разгрузка шлака - справа).

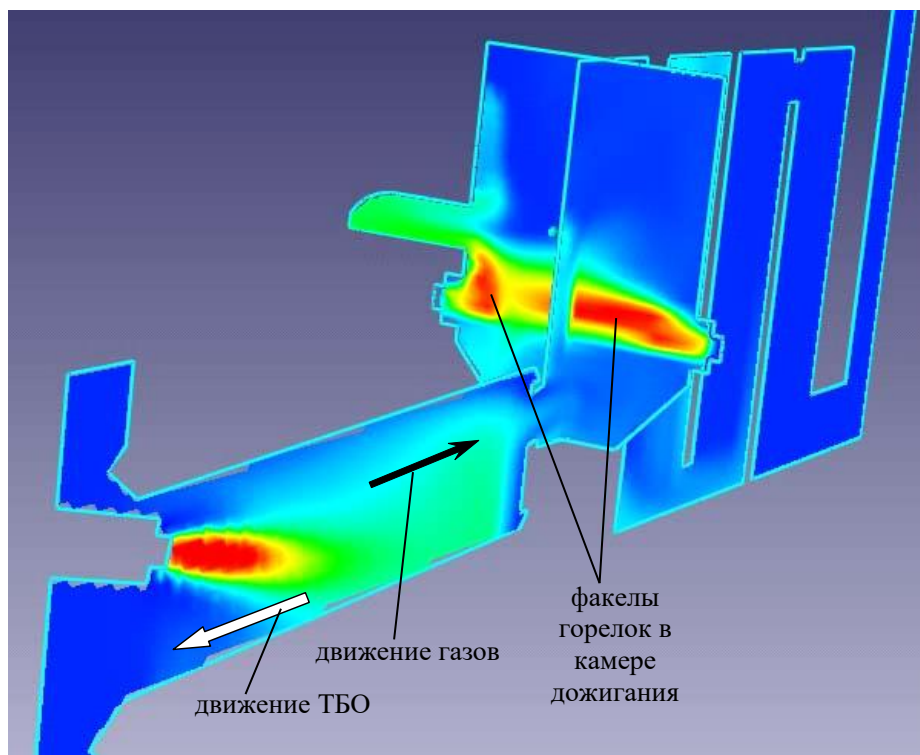


Рис. 11. Градиенты температур в установке со встречным движением газов и ТБО.

Сравнение диаграмм температур на уровне материала для обоих вариантов - на рис. 14. Анализ по предложенным критериям:

1. длина участка, где достигается максимальная температура на поверхности материала в варианте встречного движения в 2,5-3 раза больше;
2. длина участка перед разгрузкой шлака из печи в варианте встречного движения около 20-25% от длины печи; в варианте сопутствующего движения такой участок почти отсутствует;
3. температура на поверхности шлака на выходе из вращающейся печи в варианте встречного движения менее 100°C; в варианте сопутствующего движения 200°C.

ВЫВОДЫ

Применение модели установки термокаталитического обезвреживания ТБО с барабанной вращающейся печью и камерой дожигания позволяет выбрать рациональный вариант с минимизацией тепловых потерь печи и камеры дожигания.

Впервые сформулированы критерии эффективности работы вращающейся печи: длина участка, где достигается максимальная температура горения; длина участка с минимальной температурой перед

разгрузкой шлака; температура шлака на выходе.

Для эффективного использования объема камеры дожигания горелки нужно располагать на максимальном расстоянии друг от друга, а выходной газоход должен быть максимально удален от горелок.

Установлено, что более рациональной конфигурацией является встречное движение отходов и газа. Шлаки имеют различное содержание углерода – более 2% и менее 0,5% соответственно. Это позволяет сделать такие выводы.

1. Попутное движение не обеспечивает условия для полного сгорания, что объясняет:

а) повышенный расход дополнительного топлива; б) большее количество летучей золы (1,7 г/м³ против 0,76 г/м³ при встречном движении), что важно для оборудования пылеочистки; в) худшее массовое снижение отходов по твердым компонентам (примерно на 10%);

2. Для реализации встречной компоновки предлагается использовать более короткие барабанные печи без снижения полноты сжигания. Изготовление, эксплуатация и обслуживание более коротких печей значительно проще и дешевле. Это может

иметь решающее значение при выборе именно вращающейся печи при сравнении её с аналогами. Единственной технической проблемой при использовании укороченных печей встречного движения может быть повышенная температура на загрузочном устройстве мусора.

Высокое содержание углерода и недогоревших органических остатков в шлаке делает его неудобным в обращении с ним (липкие свойства), и во

многих странах запрещенным к утилизации захоронением, что объясняет его использование, в основном, для отсыпки дорог.

Повышенная температура газа, выходящего из барабанной печи в камеру дожигания, гарантированно снизит расход топлива в горелках камеры дожигания.

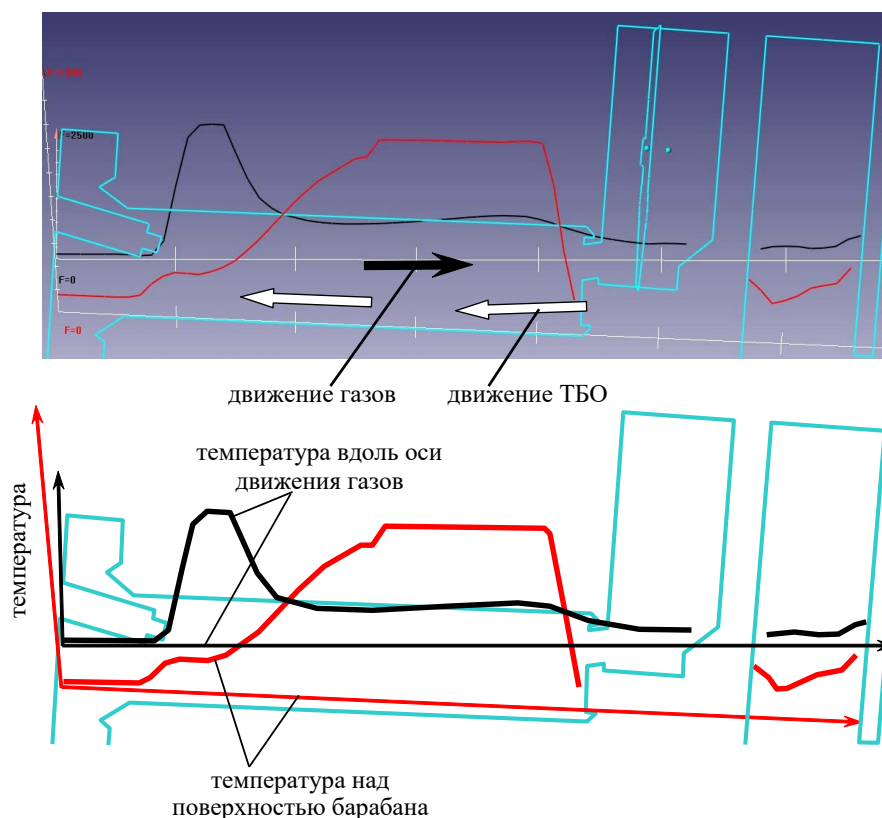


Рис. 12. Контур печи с графиками температур в установке со встречным движением газов и ТБО.

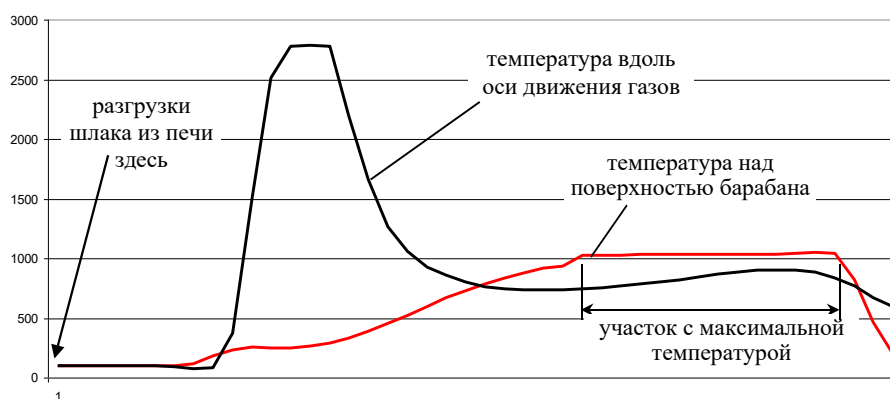


Рис. 13. Графики температур в установке со встречным движением газов и ТБО.

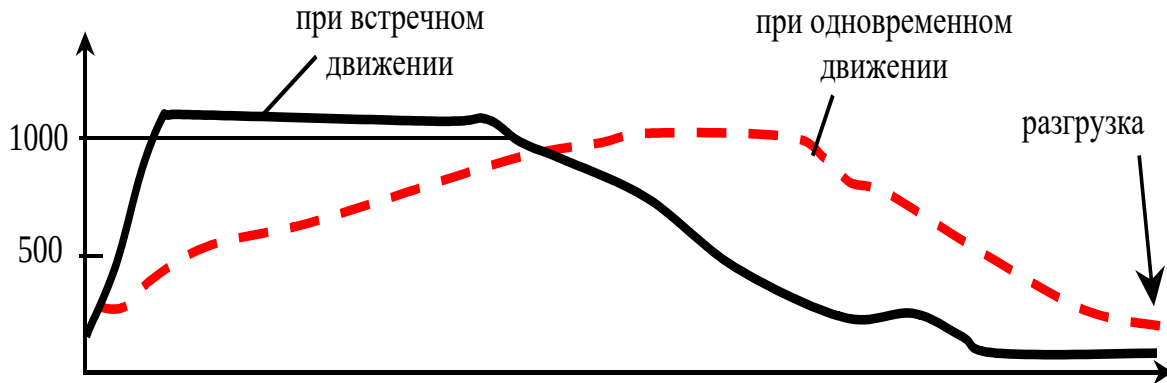


Рис. 14. Диаграммы температур над поверхностью в вариантах установок с сопутствующим и встречным движением газов и ТБО.

Литература (References)

- [1] Simone Gomes, Pedro Henrique Weirich Neto, Dimas Agostinho da Silva, Sandra Regina Masetto Antunes, Carlos Hugo Rocha. Energy potencial of household solid waste (HSW) in the city of Ponta Grossa, Paraná, Brazil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2017, vol. 22, no.6, pp. 1197—1202. doi: 10.1590/s1413-41522017143432.
- [2] Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method / *Eurostat*. Available at: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu>.
- [3] Diego Moya, Clay Aldás, Germánico López, Prasad Kaparaju. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. *Energy Procedia*, 2017, no. 134, pp. 286-295. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.618.
- [4] Diego Moya, Clay Aldás, David Jaramillo, Esteban Játiva, Prasad Kaparaju. Waste-To-Energy Technologies: an opportunity of energy recovery from Municipal Solid Waste, using Quito - Ecuador as case study. *Energy Procedia*, 2017, no. 134, pp. 327-336. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.537.
- [5] Zakir Hossain H.M., Quazi Hasna Hossain, Md. Minhaj Uddin Monir, Md. Tofayal Ahmed. Municipal solid waste (MSW) as a source of renewable energy in Bangladesh: Revisited. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 35-41. doi:10.1016/j.rser.2014.07.007.
- [6] Kong W.M. Implementation of incineration for efficient waste reduction. *International Conference on Advances in Environment Research*, 2015, vol. 87, pp. 77-80. doi: 10.7763/IPCBE. 2015. V87. 14
- [7] Young G.C. *Municipal solid waste to energy conversion processes: Economic, technical, and renewable comparisons*. New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2010, 396p.
- [8] J. Malinauskaite, H. Jouhara, D.Czajczyńska, P. Stanchev, E. Katsou, P. Rostkowski, R.J. Thorne, J. Colón, S. Ponsá, F.Al-Mansour, L. Anguilano, R. Krzyżyńska, I.C. López, A. Vlasopoulos, N. Spencer. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 2017, vol. 141, pp. 77-80. doi:10.1016/j.energy.2017.11.128.
- [9] Consonni S., Viganò F. Material and energy recovery in integrated waste management systems: The potential for energy recovery. *Waste Management*, 2011, vol. 31, pp. 2074–2084. doi: 10.1016/j.wasman.2011.05.013
- [10] Combustion and incineration processes / W.R. Niessen. - 3rd ed., rev. a. expanded. - New York ; Basel : Dekker, 2002. 699 p.
- [11] *Waste Framework Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste*. Official Journal of the European Union, 2008, 30 p.
- [12] Klasen T., Goerner K. Numerical Calculation & Optimisation of a Large Municipal Solid Waste Incinerator Plant. *IFRF Combustion Journal*, 2002, no. 2, pp. 2-17.
- [13] Ainie Khuriati, Wahyu Setia Budi1, Muhammad Nur1, Istadi Istadi1, and Gatot Suwoto. Modeling of heating value of municipal solid waste based on ultimate analysis using multiple stepwise regression linear in Semarang. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 9, pp. 2870-2876.
- [14] Jean Fidele NZIHOU, Salou Hamidou, Medard Bouda, Jean Kouliadiati, B. Gerard Segda. Using Dulong and Vandreak Formulas to Estimate the Calorific Heating Value of a Household Waste Model. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2014, vol.5, is. 1, pp. 1878-1883.

- [15] A. Johari, H. Hashim, R. Mat, H. Alias, M. H. Hassim, M. Rozainee. Generalization, formulation and heat contents of simulated MSW with high moisture content. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, vol. 7, no. 6, pp.701 – 710.
- [16] Shubham Gupta, R. S. Mishra. Estimation of Electrical Energy Generation from Waste to Energy using Incineration Technology. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 2015, vol . 3, is. 4, pp. 631-634.
- [17] A.J. Ujam, F. Eboh, T.O.Chime. Effective utilization of a small-scale municipal solid waste for power generation. *Journal of Asian Scientific Research*, 2013, vol. 3(1), pp.18-34. Available at: <http://aessweb.com/journal-detail.php?id=5003>.
- [18] 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. № 31, 7, pp. 739-750.
- [19] Hathaway S.A. Design features of package incinerator systems. Construction engineering research laboratory. Interim report, 1977, 31p.
- [20] Przewalski Z.J. *Counter current incineration unit*. Patent US, no. 4542703, 1985.
- [21] Igniss Energy. *Types of rotary kiln incinerators*. Available at: <http://www.igniss.com/types-rotary-kiln-incinerators>. (accessed 23.03.2018).
- [22] F. Ayaa, P. Mtui, N. Banadda, J. Van Impe. Design and computational fluid dynamic modeling of a municipal solid waste incinerator for Kampala city, Uganda. *American Journal of Energy Engineering*, 2014, vol . 2(3), pp. 80-86. doi: 10.11648/j.ajee.20140203.12.
- [23] Iskovich-Lototskiy R.D., Ivanchuk Ya.V., Veselovskiy Ya.P. Modelirovaniye rabochikh protsessov v piroliznoy ustanovke dlya utilizatsii otkhodov [Modeling of working processes in a pyrolysis plant for waste management]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 1, no. 8, pp. 11-20. (In Ukrainian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2016_1%288%29__3
- [24] FlowVision: Engineering programs. Software package FlowVision. Available at: <https://tesis.com.ru/software/flowvision/>.

Сведения об авторах.



Крот Ольга Петровна
Кандидат технических наук, докторант каф. 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