

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.9

Разработка фрактальной модели гидродинамики в слое твердых коммунальных отходов в процессе производства газообразного топлива

В.А. Горбунов, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, Д.А. Долинин, А.С. Семенов
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Недостатком пиролизных процессов переработки твердых коммунальных отходов, реализуемых в шахтных печах, является неравномерное прохождение газов через отходы и плохая газопроницаемость слоя, снижающие эффективность процесса переработки. Для выбора рациональных режимов работы таких установок необходимо исследование фильтрации газов с корректным учетом гидравлических сопротивлений многокомпонентного полидисперсного слоя твердых коммунальных отходов. Изучению гидродинамики плотного зернистого слоя посвящен ряд работ, авторы которых рассматривали слой как однородную изотропную среду. Известны, в частности, капиллярная и классическая фрактальная модели для описания зернистого слоя. Однако фильтрация газов в слое твердых коммунальных отходов с помощью данных моделей не исследована. В связи с этим актуальной является разработка модели слоя твердых коммунальных отходов, позволяющей унифицировать его сложную структуру таким образом, чтобы гидравлические характеристики образца и модели отличались не более чем на 10 %.

Материалы и методы: Используются результаты экспериментальных исследований фильтрации в слое твердых коммунальных отходов. Для математического моделирования процесса фильтрации применены методы вычислительной гидродинамики (CFD).

Результаты: Получены опытные данные по перепадам давления в процессе фильтрации в слое твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава. Произведены расчеты гидродинамики слоя твердых коммунальных отходов с помощью капиллярной и классической моделей, расхождение которых с опытными данными превысило 36 %. Предложена геометрическая модель слоя твердых коммунальных отходов в виде модифицированного фрактала «губка Менгера» без первого ранга разбиения, позволяющая с погрешностью менее 10 % учитывать гидравлическое сопротивление при решении задач гидродинамики в слое твердых коммунальных отходов в процессе его переработки.

Выводы: Разработанная фрактальная модель позволяет выполнять гидродинамические расчеты в слое твердых коммунальных отходов с точностью до 8,6 %. Модель применяется в расчетах при проектировании шахтных печей для переработки твердых коммунальных отходов и представляет практический интерес при моделировании различных многокомпонентных полидисперсных структур.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, модель структуры слоя, гидродинамика, фрактал «губка Менгера», процесс фильтрации, перепад давления.

Development of a fractal model of hydrodynamics in the municipal solid waste layer in the process of gas fuel production

V.A. Gorbunov, O.B. Kolibaba, A.I. Sokolsky, D.A. Dolinin, A.S. Semenov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Abstract

Background: The disadvantage of pyrolysis processes of municipal solid waste (MSW) processing in shaft furnaces is the uneven passage of gases through the waste and poor gas permeability of the layer, which reduce the processing efficiency. To select the rational operating modes of such units, it is necessary to study the filtration of gases and to correctly account for the hydraulic resistances of the multicomponent polydisperse MSW layer. A number of papers have been devoted to the study of dense granular layer hydrodynamics. Their authors considered the layer as a homogeneous isotropic medium. In particular, two models were used to describe the granular layer: the capillary and the classical fractal ones. However, these models do not take into account the filtration of gases in the MSW layer. Therefore, the aim

of the work is to develop a MSW layer model, which allows the unification of its complex structure to reduce the difference between the hydraulic characteristics of the sample and the model to no more than 10 %.

Methods and materials: Results of experimental studies of filtration in the MSW layer were applied. Methods of computational fluid dynamics (CFD) were used for mathematical simulation of the filtration process.

Results: We have obtained experimental data on pressure drops in the filtration process in the layer of MSW of average morphological composition. We have also calculated the MSW layer hydrodynamics using the capillary and classical models and found an over 36 % divergence with the experimental data. A geometric model of the MSW layer has been developed representing a modified Menger sponge fractal without the first rank of decomposition. The model accounts for the hydraulic resistance in solving hydrodynamic problems in the MSW layer under processing with an error of less than 10 %.

Conclusions: The developed fractal model allows performing hydrodynamic calculations in the MSW layer with an accuracy of 8,6 %. The model is used in calculations made for designing shaft furnaces for MSW processing and may find practical applications in modeling of various multicomponent polydisperse structures.

Key words: municipal solid waste, layer structure model, hydrodynamics, «Menger sponge» fractal, filtration, pressure drop.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.2.005-012

Введение. В России ежегодно образуется 55–60 млн тонн твердых коммунальных отходов (ТКО). Уровень переработки ТКО в России составляет 5–7 %, в то время как в странах Европы перерабатывается до 60 %. Таким образом, в нашей стране до 95 % мусора направляется на полигоны и свалки [1].

Складирование ТКО на свалках сопровождается серьезными проблемами: большая потребная площадь земельных участков, сложность организации новых свалок в связи с отсутствием свободных участков, значительные затраты на транспортировку, потеря ценных компонентов, экологическая опасность (загрязнение грунтовых вод и атмосферы, распространение неприятных запахов), потенциальная опасность пожаров и распространения инфекций и др.

Содержание в ТКО до 60–70 % органической (горючей) фракции создает предпосылки для их утилизации энергоэффективными термическими методами. Необходимую энергию для переработки можно извлекать из самих ТКО, производя при этом новое топливо и на его основе тепловую и электрическую энергию.

Наиболее перспективным термическим методом ликвидации отходов является пиролиз [2, 3]. Термическая переработка ТКО методом пиролиза часто осуществляется в печах шахтного типа в режиме плотного фильтрующего слоя [4]. Загружаемые в рабочее пространство печи влажные отходы последовательно проходят зоны сушки и пиролиза, где они разлагаются с получением горючего газа.

Существенным недостатком всех пиролизных процессов, осуществляемых в шахтных печах, является неравномерное прохождение газов через отходы и плохая газопроницаемость слоя. Газовый поток пронизывает слой отходов по немногочисленным каналам, которые по мере протекания процесса расширяются и увеличиваются настолько, что через них начинает проходить основная масса газов. Это снижает эффективность процесса пиролиза в шахтных печах, так как сокращаются время и поверхность контакта газов с отходами. Для оценки

функционирования таких установок, выбора рациональных режимов их работы необходим детальный анализ процесса фильтрации газов с корректным учетом гидравлических сопротивлений слоя.

Методы исследования. Фильтрация определяется скоростью движения газов внутри слоя ТКО. При заданном перепаде давлений скорость фильтрации будет зависеть от коэффициента сопротивления трению слоя. Поэтому исследование гидродинамических процессов, протекающих в слое ТКО, невозможно без адекватной геометрической модели структуры слоя, полидисперсность и многокомпонентность которого вызывают трудности при его моделировании. При выборе геометрии слоя необходимо учитывать тот факт, что гидравлические сопротивления реальной структуры и ее модели должны быть идентичны.

До настоящего времени учеными было разработано достаточно много моделей пористых тел, основной недостаток которых заключается в том, что пористое тело рассматривается как условная однородная изотропная среда с усредненными обобщенными характеристиками [5]. Наиболее простой моделью пористого тела является пучок прямых капилляров, более сложная модель – система, состоящая из сферических частиц одинакового размера, имеющих различную упаковку [6].

В работах [7, 8, 9], посвященных исследованию процессов термической переработки ТКО в реакторе шахтного типа, предложено на базе современных пакетов прикладных программ использовать фрактальный подход, который позволяет унифицировать внутреннюю геометрию слоя ТКО. В основу 3-D модели положена известная фрактальная структура – «губка Менгера» [10, 11]. Недостатком предложенной геометрической модели является визуальное искажение структуры слоя ТКО, обусловленное наличием центрального отверстия, соответствующего первому рангу разбиения «губки Менгера» (рис. 1).

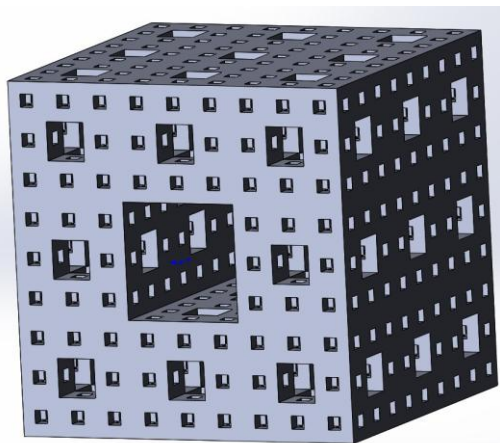


Рис. 1. Геометрическая модель слоя ТКО – «губка Менгера», содержащая первый ранг разбиения

Если в тепловом отношении рассматриваемая модель является адекватной, что подтверждается представленными в [7] результатами исследований, то в отношении гидравлических характеристик ее адекватность исследована не в полной мере. Вызывает сомнение то, что данный вариант внутренней геометрии слоя ТКО будет достоверно описывать фактическое распределение скоростей в теле.

В связи с этим целью настоящего исследования является совершенствование геометрической модели слоя ТКО и оценка ее адекватности с точки зрения гидравлического сопротивления.

Для достижения поставленной цели при построении геометрии предлагается отказаться от первого ранга разбиения «губки Менгера», заполнив при этом центральное отверстие структурой второго порядка. Построенная таким образом модифицированная фрактальная модель, реализованная в программном комплексе SolidWorks, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Геометрическая модель слоя ТКО – модифицированная «губка Менгера»

В задачу данного исследования входило изучение возможности применения предложенной геометрической фрактальной модели структуры слоя ТКО для решения задач гидродинамики, связанных с фильтрацией газа в плотном

слое кускового материала (на примере твердых коммунальных отходов).

Геометрическая модель слоя ТКО, представляющего собой пористое тело, построенная на основе фрактала «губка Менгера» в среде SolidWorks, импортирована в программный комплекс ANSYS для выполнения численного моделирования процесса фильтрации. Для максимального приближения к реальным условиям (конструктивному оформлению шахтной печи) геометрическая модель была заключена в цилиндрическую оболочку (рис. 3).

Для моделирования процесса фильтрации потребовалось создать дополнительное тело (Fluid), которое заполняет свободное пространство в геометрии слоя ТКО (Solid) и представляет собой объем газа, проходящего сквозь него. Поскольку в рамках данного исследования проводились только газодинамические расчеты без исследования теплообмена, то в дальнейших вычислениях использовалась только геометрия Fluid.

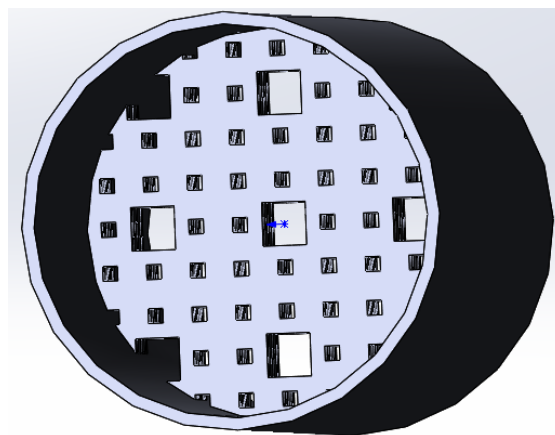


Рис. 3. Геометрическая модель слоя ТКО в реакторе

Задача решена численно в конечно-элементном пакете ANSYS [12, 13]. Реализация полной геометрической модели требует большого количества вычислительных ресурсов и времени, поэтому для дальнейших исследований, ввиду симметричности модели, использовали ее четвертую часть.

Математическая постановка задачи представлена системой дифференциальных уравнений неразрывности и Эйлера:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (2)$$

с учетом краевых условий:

$$v(x, 0) = 0; \quad (3)$$

$$v(0, \tau) = v_1, \quad 0 < x < R; \quad (4)$$

$$v(R, \tau) = v_2, \quad 0 < x < R. \quad (5)$$

В системе (1)–(5): ρ – плотность флюида, кг/м^3 ; v – скорость флюида, м/с ; p – давление

флюида, Па; R – высота слоя ТКО, м; τ – время, с.

Задача решалась в стационарной постановке. Поскольку скорости движения газа невелики по отношению к скорости звука, использовался тип решателя Pressure Based. По этой же причине были заданы постоянные плотность и динамическая вязкость [5]. В качестве рабочей среды был выбран воздух.

В качестве граничных условий задавались скорость, гидравлический диаметр и интенсивность турбулентности.

При численном решении задач гидрогазодинамики особую сложность представляет выбор модели турбулентности [14]. Для этой цели была проведена оценка значений чисел Рейнольдса в каналах прохождения воздуха. Рассматривались каналы квадратного сечения с размерами сторон 0,018; 0,006 и 0,002 м, сопоставленные с вертикальной осью расчетной области. При изменении скорости воздуха на входе в расчетную область от 1,2 до 3,0 м/с значения критерия Рейнольдса варьируются для указанных выше каналов соответственно: от 2090 до 4480; от 448 до 996 и от 53 до 99. В результате анализа современных подходов к моделированию турбулентности в сложных течениях была выбрана SST (Shear Stress Transport) модель [14]. Данная модель является одной из лучших среди RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) моделей и объединяет преимущества $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей.

Расчеты проводились на сетке с числом элементов 2,68 млн элементов. Среднее ортогональное качество сетки – 0,73.

Результаты расчета полей скоростей и давлений флюида для пористого тела высотой 0,16 м при скорости воздуха на входе в расчетную область 3,0 м/с представлены на рис. 4, 5.

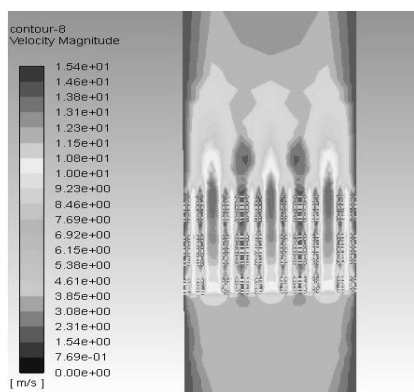


Рис. 4. Поле скоростей флюида в процессе фильтрации в модифицированной геометрической структуре «губка Менгера»

Верификация предлагаемой модели произведена посредством сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными.

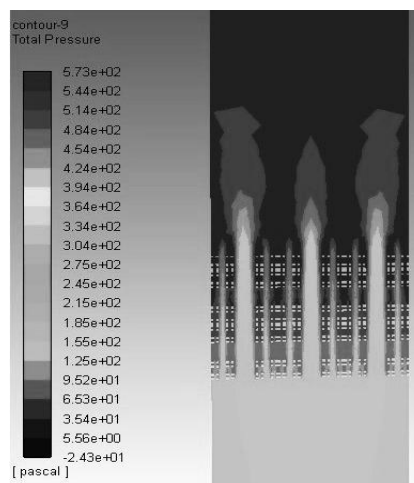


Рис. 5. Поле давлений флюида в процессе фильтрации в модифицированной геометрической структуре «губка Менгера»

Экспериментальное изучение процесса фильтрации воздуха в слое влажных ТКО проводилось на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 6.

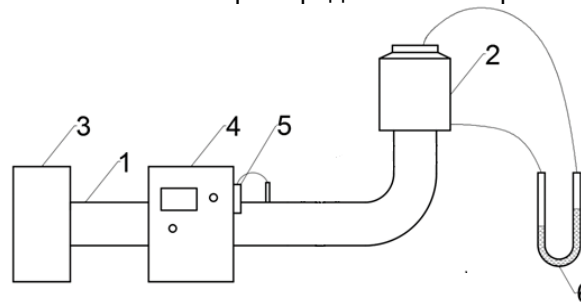


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения фильтрации в слое ТКО

Экспериментальная установка состояла из участка трубы (1), соединенного с камерой (2), в которой установлена металлическая сетка для удержания засыпаемых в камеру твердых коммунальных отходов. Движение воздуха осуществлялось при помощи вентилятора (3). Скорость воздушного потока регулировалась блоком управления (4) с экраном для вывода информации. Для определения перепада давления в слое ТКО использовался U-образный манометр (6).

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Предварительно взвешенный образец смеси влажных твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава [15] с порозностью $f = 0,6$ размещали на сетке в камере (2). Высота слоя ТКО составляла $H = 0,16$ м. Для организации процесса фильтрации в слое ТКО при помощи вентилятора (3) осуществляли подачу воздуха в трубу (1), соединенную с камерой (2).

При заданной скорости воздуха, фиксируемой анемометром (6) и регулируемой органами управления на блоке (4), производили замеры перепада давления с помощью U-образного манометра (8). Скорость воздуха

изменяли в пределах 1,2–3,0 м/с. Опыт повторяли при высоте слоя 0,12 и 0,2 м.

Результаты исследования. Результаты эксперимента, полученные с погрешностью не более 3 % на образце слоя ТКО высотой 0,16 м, приведены в таблице.

Результаты эксперимента

<i>m</i> , кг	0,38					
<i>H</i> , м	0,16					
<i>V</i> , м/с	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Δp , Па	117	137	147	166	186	206

Аналогичные данные получены для образцов высотой 0,12 и 0,2 м.

На рис. 7–9 приведена графическая интерпретация расчетных и экспериментальных данных, полученных для образцов ТКО высотой 0,12; 0,16 и 0,2 м, соответственно. Средние погрешности при сопоставлении результатов расчета с опытными данными составили: при высоте слоя ТКО 0,12 м – 12,6 %; при высоте слоя ТКО 0,16 м – 8,6 %; при высоте слоя 0,20 м – 12,5 %.

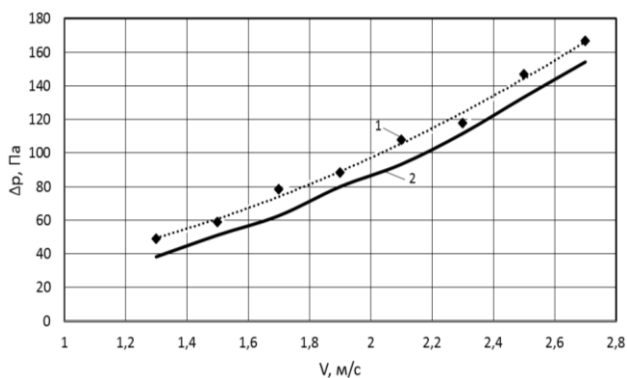


Рис. 7. Потери давления в слое ТКО высотой 0,12 м в зависимости от скорости воздуха: 1 – эксперимент; 2 – расчет

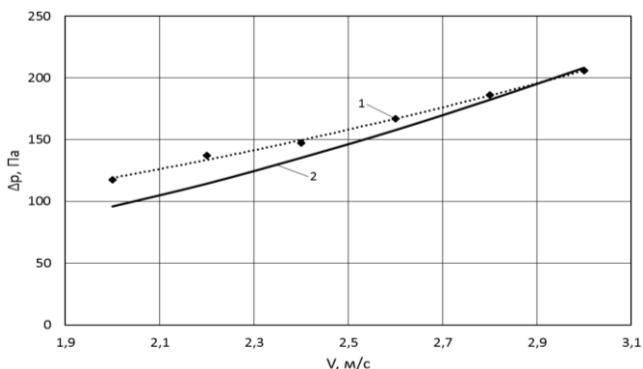


Рис. 8. Потери давления в слое ТКО высотой 0,16 м в зависимости от скорости воздуха: 1 – эксперимент; 2 – расчет

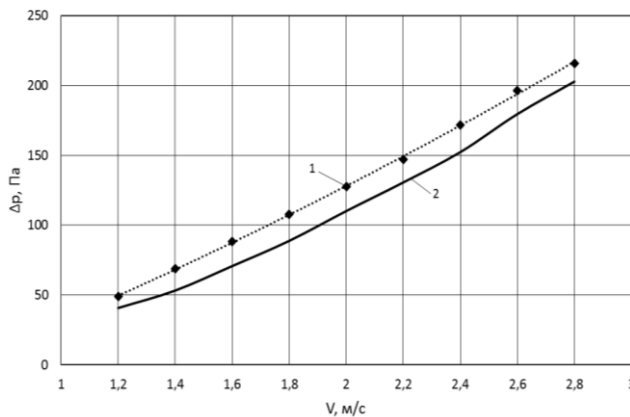


Рис. 9. Потери давления в слое ТКО высотой 0,20 м в зависимости от скорости воздуха: 1 – эксперимент; 2 – расчет

Анализ результатов (рис. 7–9) показывает, что гидравлическое сопротивление рассматриваемой модифицированной фрактальной структуры идентично сопротивлению реальной структуры слоя ТКО и, следовательно, замена реального пористого тела предложенной моделью достаточно корректна.

Для подтверждения предпочтительности предлагаемой модифицированной фрактальной модели структуры слоя ТКО были проведены аналогичные расчеты с использованием классической модели «губка Менгера» (рис. 1), предложенной в [5].

Дополнительно был проведен расчет процесса фильтрации на основе известной капиллярной модели пористого тела. Цилиндрическая капиллярная модель пористого тела (слоя ТКО), построенная в среде SolidWorks, приведена на рис. 10.

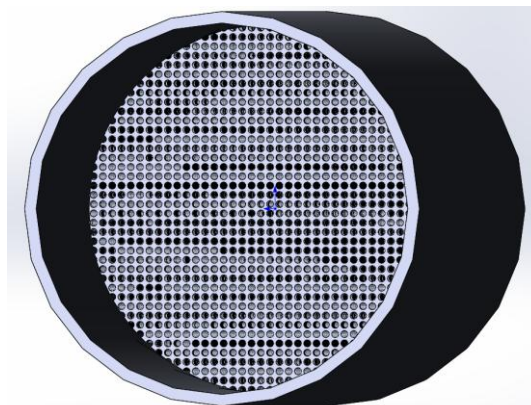


Рис. 10. Цилиндрическая капиллярная модель слоя ТКО

На рис. 11 представлена графическая интерпретация результатов расчетов, полученных с использованием капиллярной, двух фрактальных моделей и результатов эксперимента для слоя ТКО высотой 0,16 м.

Анализ результатов (рис. 11) показывает, что кривые, полученные моделированием, имеют сходный характер. Однако более точное совпадение с результатами эксперимента

обеспечивает модифицированная фрактальная модель.

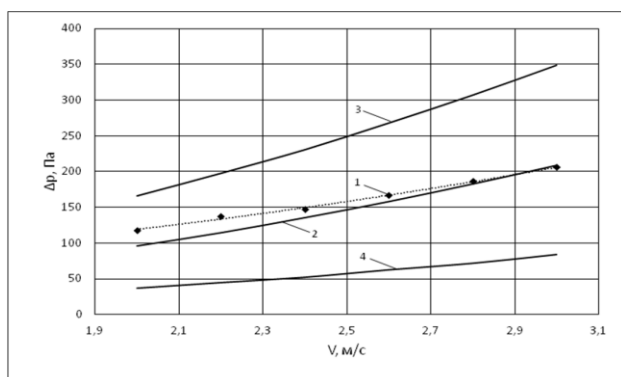


Рис. 11. Расчетные и экспериментальные данные, полученные на слое ТКО высотой 0,16 м: 1 – эксперимент; 2 – расчет на модифицированной фрактальной модели; 3 – расчет на капиллярной модели; 4 – расчет на классической фрактальной модели «губка Менгера»

Средняя относительная погрешность определения перепада давления составляет:

- 64 % – при использовании классической фрактальной модели «губка Менгера»;
- 8,6 % – при использовании модифицированной фрактальной модели;
- 36 % – при использовании капиллярной модели.

Таким образом, гидравлическое сопротивление модифицированной геометрической фрактальной модели наиболее точно соответствует сопротивлению реальной структуры слоя ТКО.

Выводы. Предложенная модифицированная геометрическая фрактальная модель многокомпонентной полидисперсной структуры на основе фрактала «губка Менгера» позволяет с большей точностью учитывать гидравлическое сопротивление при решении задач гидродинамики в слое ТКО в процессе его переработки.

Адекватность предложенной модели подтверждена сопоставлением с полученными экспериментальными данными по перепадам давления в слое ТКО в зависимости от скорости флюида и высоты слоя. Средняя относительная погрешность не превышает 10 %.

Список литературы

1. Лемасова Ю.А. Отечественный и зарубежный опыт утилизации твердых бытовых отходов // Новые тенденции рационального природопользования. Вторичные ресурсы и проблемы экологии: сб. докл. Междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодежи. Т. 1. – Владивосток: ДВГТУ, 2010. – С. 175–179.
2. Basu P., Kaushal P. Modeling of pyrolysis and gasification in fluidized beds // Chemical product and Process Modeling. – 2009. – Vol. 4. – Iss. 1. – Art. 21.

3. Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press. – Burlington, USA, 2010. – 365 p.

4. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехирев Д.В. Технологии отходов / ГОУВПО «МГУС». – М., 2006. – 410 с.

5. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

6. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971. – 268 с.

7. Фрактальная модель слоя твердых бытовых отходов при его переработке в термическом реакторе / О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, И.А. Скворцов, Т.В. Муратова // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 32–37. doi: 10.17588/2072-2672.2015.5.032-037.

8. Горбунов В.А. Опыт использования программного комплекса в Ивановском государственном энергетическом университете им. В.И. Ленина // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2011. – № 15. – С. 38–39.

9. Исследование гидравлического сопротивления слоя твердых бытовых отходов с использованием фрактальной геометрии / О.И. Горинев, В.А. Горбунов, Р.Н. Габитов, С.В. Федосеев // Промышленная энергетика. – 2011. – № 7. – С. 43–44.

10. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991. – 136 с.

11. Brambila F. Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology // InTechOpen, 2017. – P. 292.

12. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

13. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.

14. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.

15. Калинин В.И. Термическая утилизация твердых бытовых отходов // Концепция НИИ Стромкомпозит. – 2006. – URL: <http://www.Stromkomposit.ru/42/html>.

References

1. Lemasova, Yu.A. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov [Russian and foreign experience in municipal solid waste utilization]. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi «Novye tendentsii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya. Vtorichnye resursy i problemy ekologii». Vol. 1 [Proceedings of the International conference with the elements of a scientific school for the youth «New trends of rational use of natural resources. Secondary resources and environmental problems»]. Vladivostok, DVGTU, 2010, pp. 175–179.
2. Basu, P., Kaushal, P. Modeling of pyrolysis and gasification in fluidized beds. Chemical product and Process Modeling, 2009, vol. 4, issue 1, art. 21.
3. Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, Burlington, USA, 2010, p. 365.
4. Shubov, L.Ya., Stavrovsky, M.E., Shekhirev, D.V. Tekhnologii otkhodov [Waste Technologies]. Moscow, 2006. 410 p.

5. Aerov, M.E., Todes, O.M., Narinsky, D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem. Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty* [Apparatuses with a stationary granular layer. Hydraulic and thermal bases of operation]. Leningrad, Khimiya, 1979. 176 p.

6. Vasilyev, L.L., Tanayeva, S.A. *Teplofizicheskie svoystva poristykh materialov* [Thermophysical properties of porous materials]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1971. 268 p.

7. Kolibaba, O.B., Gabitov, R.N., Skvortsov, I.A., Muratova, T.V. *Fraktal'naya model' sloya tverdykh bytovykh otkhodov pri ego pererabotke v termicheskom reaktore* [Fractal model of solid waste layer under recycling in a thermal reactor]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 32–37. doi: 10.17588/2072-2672.2015.5.032-037.

8. Gorbunov, V.A. *Opyt ispol'zovaniya programmnogo kompleksa v Ivanovskom gosudarstvennom energeticheskom universitete im. V.I. Lenina* [Experience in using the software complex at Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin]. *ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya*, 2011, no. 15, pp. 38–39.

9. Gorinov, O.I., Gorbunov, V.A., Gabitov, R.N., Fedoseyev, S.V. *Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniya sloya tverdykh bytovykh otkhodov s ispol'zovaniem fraktal'noy geometrii* [Investigation into the

hydraulic resistance of the solid domestic waste layer with the use of fractal geometry]. *Promyshlennaya energetika*, 2011, no. 7, pp. 43–44.

10. Smirnov, B.M. *Fizika fraktal'nykh klasterov* [Physics of fractal clusters]. Moscow, Nauka, 1991. 136 p.

11. Brambila, F. *Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology*. InTechOpen, 2017, p. 292.

12. Bruyaka, V.A., Fokin, V.G., Kurayeva, Ya.V. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench* [Engineering Analysis in ANSYS Workbench]. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2013. 149 p.

13. Basov, K.A. *Graficheskiy interfeys kompleksa ANSYS* [The ANSYS complex graphical interface]. Moscow, DMK Press, 2006. 248 p.

14. Volkov, K.N., Emelyanov, V.N. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Simulation of large eddies in turbulent flow calculations]. Moscow: Fizmatlit, 2008. 368 p.

15. Kalinin, V.I. *Termicheskaya utilizatsiya tverdykh bytovykh otkhodov Elektronnyy resurs* [Thermal disposal of municipal solid waste]. *Kontseptsiya NII Stromkompozit*, 2006. Available at: [http://www. Stromkompozit.ru/42/html](http://www.Stromkompozit.ru/42/html).

Горбунов Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, зав. кафедрой атомных электрических станций,
e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Gorbunov Vladimir Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Head of the Department of Nuclear Power Stations,
e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Колыбаба Ольга Борисовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: koli-baba@mail.ru

Kolibaba Olga Borisovna,

Ivanovo State Power Engineering University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Head of the Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: koli-baba@mail.ru

Сокольский Анатолий Иванович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Sokolsky Anatoly Ivanovich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Долинин Денис Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: denisdolinin@yahoo.com

Dolinin Denis Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Associate Professor of the Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: denisdolinin@yahoo.com

Семёнов Алексей Сергеевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru
Semenov Aleksei Sergeevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Master Program Student of the Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

УДК 662.61

Оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт, методом термодинамического анализа

А.Б. Бирюков, В.В. Варакута, П.А. Гнитиев
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина
E-mail: birukov.ttf@gmail.com, varakutaviktor@ukr.net, gnitiev.pavel@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одним из путей утилизации вторичной и низкопотенциальной теплоты является создание энергогенерирующих станций, использующих паротурбинные установки с низкокипящим рабочим телом. Известна экспериментальная паротурбинная установка, в которой в качестве нагревателя и холодильника выступает вода с температурой 90 и 12 °С соответственно. КПД данной установки в таких условиях составляет 16 %. Эффективность работы энергогенерирующих станций, использующих вторичную и низкопотенциальную теплоту, зависит от состава используемого оборудования и температурных потенциалов нагревателя и холодильника. В связи с этим актуальной является оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт.

Материалы и методы: Исследование выполнено для четырех схем на базе тепловых машин, реализующих прямой и обратный циклы: паротурбинная установка; паротурбинная установка и холодильная машина; паротурбинная установка и тепловой насос; паротурбинная установка в комплексе с тепловым насосом и холодильной машиной. Сравнительная оценка предельно возможной эффективности выполнена при помощи метода термодинамического анализа для идеального цикла Карно, реализуемого в условиях реально имеющегося перепада температур между нагревателем и холодильником.

Результаты: Рассмотрены четыре схемы, реализующие прямой и обратный циклы, охватывающие все возможные комбинации машин прямого и обратного действия. Установлено, что термический КПД одинаков для схем на базе паротурбинной установки и паротурбинной установки с холодильной машиной и он больше КПД других схем. Впервые для условий угольных шахт рассчитаны усредненные и пиковые значения термодинамического КПД и удельного количества вторичной и низкопотенциальной теплоты для наиболее экономичных схем при использовании нерегулируемых и регулируемых параметров низкокипящего рабочего тела.

Выводы: Достоверность результатов базируется на использовании фундаментальных положений технической термодинамики. На основании анализа полученных результатов обоснована целесообразность использования схем с регулируемыми параметрами низкокипящего рабочего тела за счет применения в схеме тепломашинной установки обратного цикла и других устройств регулирования.

Ключевые слова: энергогенерирующая станция, тепломашинная установка, паротурбинная установка, тепловой насос, холодильная машина, термодинамический цикл, низкокипящее рабочее тело, суточные и сезонные колебания температур, энергетические характеристики.

Estimation of efficiency of the power generating station using secondary and low-grade heat in conditions of coal mines by the thermodynamic analysis method

A.B. Biryukov, V.V. Varakuta, P.A. Gnatiev
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine
E-mail: birukov.ttf@gmail.com, varakutaviktor@ukr.net, gnitiev.pavel@gmail.com

Abstract

Background: One of the ways to utilize secondary and low-grade heat (SLH) is to create power-generating stations using steam-turbines with low-boiling working fluid (LWF). There is an experimental steam-turbine which uses water heated to 90 °C and 12 °C as a heater and a refrigerator, respectively. Its efficiency in such conditions is 16 %. The efficiency of power-generating stations using SLH depends on the equipment composition and heater and refrigerator tem-