

УДК 621.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ
СЛОЯ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ
В ПРОЦЕССЕ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ**

**HYDRODYNAMIC STUDY
OF LAYER OF MUNICIPAL SOLID
WASTE IN THE PROCESSING**

А.А. КРАСНОВ, О.Б. КОЛИБАБА, А.И. СОКОЛЬСКИЙ, Д.А. ДОЛИНИН

A.A. KRASNOV, O.B. KOLIBABA, A.I. SOKOLSKY, D.A. DOLININ

**(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State Power University)**

E-mail: tevp@tvp.ispu.nj

На основе геометрического фрактала "губка Менгера" разработана математическая модель, позволяющая исследовать фильтрацию в слое ТО в процессе его переработки. Исследованиями подтверждена предпочтительность фрактальной модели, позволяющей корректно оценить влияние фильтрации на процесс термической переработки ТО в реакторе. Рекомендуется использование предложенной модели при проектировании термических реакторов для переработки многокомпонентных органических отходов.

On the basis of the fractal model "Menger sponge" a mathematical model has been developed that allows to investigate the filtration in the MSW layer during their processing. The model was validated by comparing the calculation results with the experimental data. The proposed approach to modeling makes it possible to increase the accuracy in assessing the hydraulic resistance of the MSW layer. Studies have confirmed the advantage of the fractal model, which allows to correctly evaluate the effect of filtration on the thermal processing of MSW in the reactor. It is recommended to use the proposed model for the design of thermal reactors for the processing of multi-component organic waste, including MSW.

Ключевые слова: твердые отходы, модель структуры слоя, гидродинамика, фрактал "губка Менгера", фильтрация, перепад давления.

Keywords: municipal solid waste, model of the layer structure, hydrodynamics, fractal "Menger sponge", filtration, pressure drop.

Как известно [1...3], текстильные отходы делятся на 4 группы. Отходы первой и второй групп могут быть переработаны внутри текстильного предприятия. Отходы третьей и четвертой групп чаще всего вывозятся на полигоны. Годовой объем текстильных отходов, вывозимых на полигоны, для России может составлять величину порядка 10...20 млн. тонн [4].

Текстильные отходы относятся к твердым отходам (ТО), содержащим большое количество горючей фракции, что создает предпосылки утилизации их вместе с твердыми коммунальными отходами энергоэффективными термическими методами, позволяющими получать тепловую и электрическую энергию.

Наиболее перспективным термическим методом ликвидации отходов является пиролиз в шахтных печах. Однако существенным недостатком всех пиролизных процессов, осуществляемых в шахтных печах, является неравномерное прохождение газов через отходы и плохая газопроницаемость слоя, что снижает эффективность процесса пиролиза в шахтных печах, так как сокращаются время и поверхность контакта газов с отходами.

Для выбора рациональных параметров процессов утилизации ТО в работе [5], посвященной моделированию тепло- и массообмена в процессе сушки слоя ТО в реакторе шахтного типа, предложено на базе современных пакетов прикладных программ использовать фрактальный подход, который позволяет унифицировать внутреннюю геометрию слоя ТО. В основу 3D-модели положена известная фрактальная структура – "губка Менгера" [6]. Недостатком предложенной геометрической модели является визуальное искажение структуры слоя ТО, обусловленное наличием центрального отверстия, соответствующего первому рангу разбиения "губки Менгера".

Если в тепловом отношении рассматриваемая модель является адекватной, что подтверждается представленными в работе результатами исследований, то в отношении

гидравлических характеристик ее адекватность не доказана. Вызывает сомнение то, что данный вариант внутренней геометрии слоя ТО будет достоверно описывать фактическое распределение скоростей в теле.

В связи с этим целью настоящего исследования является совершенствование геометрической модели слоя ТО 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 "трубки Менгера", реализованная в программном комплексе SolidWorks (рис. 1: а) – модуль со структурой второго порядка; б) – модель со структурой второго порядка в цилиндрической оболочке).

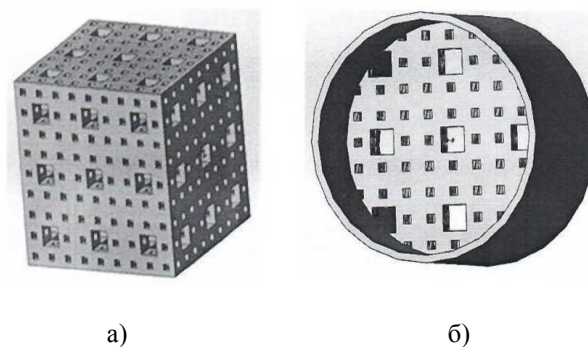


Рис. 1

В задачу данного исследования входило изучение возможности применения предложенной геометрической фрактальной модели структуры слоя ТО для решения задач гидродинамики, связанных с фильтрацией газа в плотном слое кускового материала (на примере твердых отходов).

Геометрическая модель слоя ТО, представляющего собой пористое тело, построенная на основе фрактала "губка Менгера" в среде SolidWorks, импортирована в ПК ANSYS для выполнения численного моделирования процесса фильтрации. С целью максимального приближения к реальным

условиям (конструктивному оформлению шахтной печи) геометрическая модель была заключена в цилиндрическую оболочку (рис. 1-б).

Поскольку в рамках данного исследования проводили только газодинамические расчеты без исследования теплообмена, то в вычислениях использовали только геометрию Fluid, представляющую поток газа. Задача решена численно в конечно-элементном пакете ANSYS.

Математическая постановка задачи представлена системой дифференциальных уравнений неразрывности и Эйлера:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial \tau} \text{ и } v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x},$$

с учетом краевых условий:

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

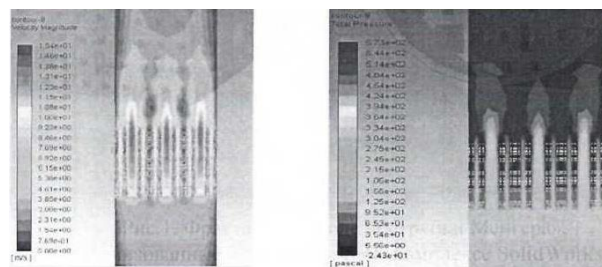
$$v(R,\tau) = v_2; 0 < x < R,$$

где ρ – плотность флюида, кг/м³; v – скорость флюида, м/с; p – давление флюида, Па; R – высота слоя ТО, м; τ – время, с.

Задача решалась в стационарной постановке. Поскольку скорости движения газа невелики по отношению к скорости звука, использовали тип решателя – Pressure Based. По

этой же причине были заданы постоянные плотность и динамическая вязкость [7], [8]. В качестве рабочей среды был выбран воздух. В качестве граничных условий задавались скорость, гидравлический диаметр и интенсивность турбулентности.

В результате расчетов получены поля скоростей (рис. 2-а) и давлений (рис. 2-б) флюида в процессе фильтрации в геометрической структуре "губка Менгера".



а) б)
Рис. 2

Верификация предлагаемой модели произведена посредством сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными. Экспериментальное изучение процесса фильтрации воздуха в слое влажных ТО проводили на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 3-а.

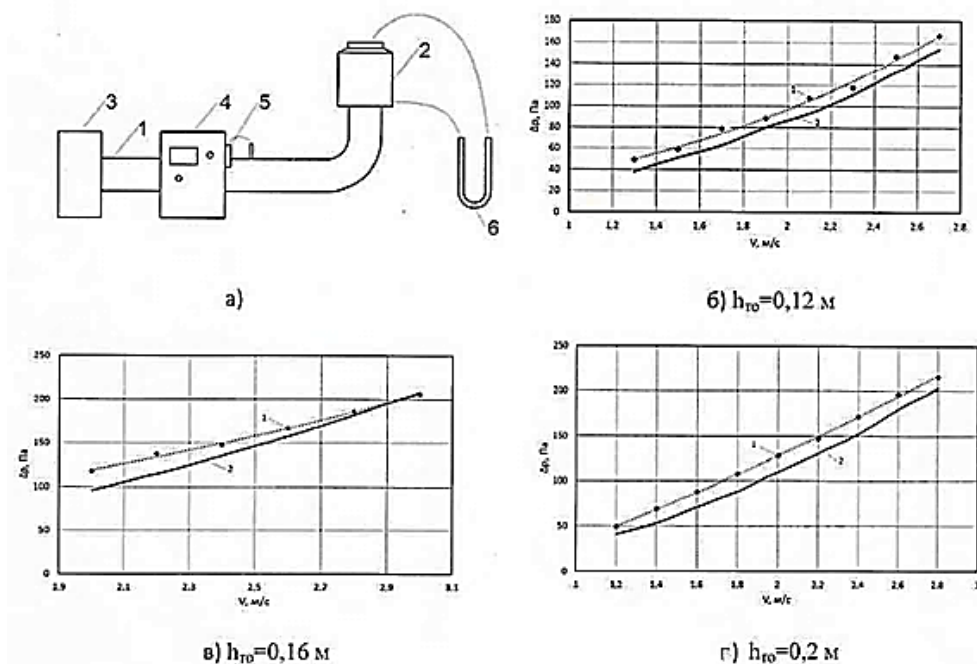


Рис. 3

Экспериментальная установка состояла из участка трубы 1, соединенного с камерой 2, в которой установлена металлическая сетка для удержания засыпаемых в камеру твердых 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 ТО использовался U-образный манометр 6.

Результаты эксперимента, полученные с погрешностью не более 3% на образце слоя ТО высотой 0,16 м, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

м, кг	0,38					
Н, м	0,16					
V, м/с	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Δр, Па	117	137	147	166	186	206

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

Построена графическая интерпретация расчетных и экспериментальных данных о потерях давления в зависимости от скорости воздуха, полученных для образцов ТО высотой 0,12 м (рис. 3-б); 0,16 м (рис. 3-в) и 0,2 м (рис. 3-г). Цифрой 1 на графиках обозначены экспериментальные данные, цифрой 2 – результаты моделирования. Средние погрешности при сопоставлении результатов расчета с опытными данными составили: при высоте слоя ТО 0,12 м – 12,6%; при высоте слоя ТО 0,16 м – 8,6%; при высоте слоя 0,20 м – 12,5%.

Анализируя результаты, приведенные на рис.2, 3, можно сделать вывод, что гидравлическое сопротивление рассматриваемой модифицированной фрактальной структуры идентично сопротивлению реальной структуры слоя ТО и, следовательно, замена реального пористого тела предложенной моделью достаточно корректна.

Для подтверждения предпочтительности предлагаемой модифицированной фрактальной модели структуры слоя ТО были проведены аналогичные расчеты с использованием классической модели "губка Менгера" (рис. 1-а), предложенной в работе [5].

Дополнительно был проведен расчет процесса фильтрации на основе известной ка-

пиллярной модели пористого тела. Цилиндрическая капиллярная модель пористого тела (слоя ТО), построенная в среде Solid-Works, приведена на рис. 4-а.

На рис. 4-б представлена графическая интерпретация результатов расчетов, полученных с использованием капиллярной, двухфрактальных моделей и результатов эксперимента для слоя ТО высотой 0,16 м.

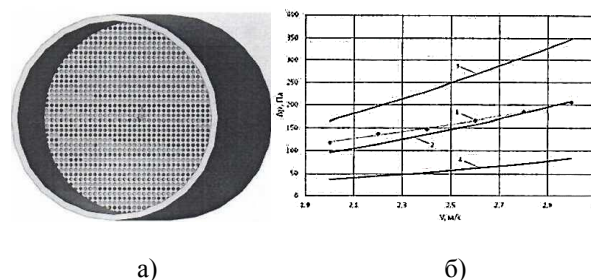


Рис. 4

Обозначения на графиках: 1 – эксперимент; 2 – расчет на модифицированной фрактальной модели; 3 – расчет на капиллярной модели; 4 – расчет на классической фрактальной модели "губка Менгера".

Из анализа результатов, представленных на рис. 4, видно, что кривые, полученные моделированием, имеют сходный характер. Однако более точное совпадение с результатами эксперимента обеспечивает модифицированная фрактальная модель.

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, предложенная в работе модифицированная геометрическая модель слоя ТО позволяет повысить точность расчета гидравлического сопротивления по сравнению с предложенной ранее фрактальной моделью [5].

В Ы В О Д Ы

1. Экспериментально доказана возможность использования модернизированной фрактальной геометрии при моделировании по-

ликомпонентной полидисперсной структуры, например слоя ТО.

2. На основе предложенной геометрической модели разработана математическая модель, позволяющая исследовать влияние фильтрации в слое твердых отходов на процесс их переработки.

3. Применение предложенной модели позволяет значительно повысить точность определения гидравлического сопротивления слоя ТО.

4. Получены экспериментальные данные по перепадам давления в слое ТО в зависимости от скорости флюида и высоты слоя.

5. Адекватность математической модели подтверждена экспериментальными данными. Средняя относительная погрешность не превышает 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бобович Б.Б., Десяткин В.В.* Переработка отходов производства и потребления / Под ред. докт. техн. наук, проф. Б.Б. Бобовича. – М.: "Интернет Инжиниринг", 2000.

2. *Коган А.Г., Вербицкая Ю.П., Карпеня А.М.* Технология получения новых видов материалов с использованием отходов. – Витебск: ВГТУ, 2012.

3. *Гаев В.В.* Классификация текстильных отходов: [Электронный ресурс] // Waste.ru: отраслевой портал. URL: <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=305%D1%8D>. (Дата обращения: 19.04.2018).

4. Переработка ТБО в США: [Электронный ресурс] // cleandex.ru: Центр маркетинговой компетенции в области чистых технологий маркетинговой группы "Текарт". URL: [http://www.cleandex.ru/articles/2011/03/02/recycling of solid waste in the us](http://www.cleandex.ru/articles/2011/03/02/recycling%20of%20solid%20waste%20in%20the%20us). (Дата обращения: 19.04.2018).

5. *Колібабa O.Б., Габитов P.Н., Скворцов И.А., Муратова Т.В.* Фрактальная модель слоя твердых бытовых отходов при его переработке в термическом реакторе // Вестник ИГЭУ. – 2015, №5. С.32...37.

6. *Смирнов Б.М.* Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991.

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

8. *Кравченко В.М., Лутова А.О.* Гидродинамика плотного слоя картофеля в процессе сушки перегретым паром // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2014, №2. С. 39...44.

REFERENCES

1. Bobovich B.B., Devyatkin V.V. Pererabotka otkhodov proizvodstva i potrebleniya / Pod red. dokt. tekhn. nauk, prof. B.B. Bobovicha. – M.: "Internet Inzhiniring", 2000.

2. Kogan A.G., Verbitskaya Yu.P., Karpenya A.M. Tekhnologiya polucheniya novykh vidov materialov s ispol'zovaniem otkhodov. – Vitebsk: VGTU, 2012.

3. Gaev V.V. Klassifikatsiya tekstil'nykh otkhodov: [Elektronnyy resurs] // Waste.ru: otraslevoy portal. URL: <http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=305%D1%8D>. (Data obrashcheniya: 19.04.2018).

4. Pererabotka TBO v SShA: [Elektronnyy resurs] // cleandex.ru: Tsentr marketingovoy kompetentsii v oblasti chistyykh tekhnologiy marketingovoy gruppy "Tekart". URL: [http://www.cleandex.ru/articles/2011/03/02/recycling of solid waste in the us](http://www.cleandex.ru/articles/2011/03/02/recycling%20of%20solid%20waste%20in%20the%20us). (Data obrashcheniya: 19.04.2018).

5. 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 // Vestnik IGEU. – 2015, №5. S.32...37.

6. Smirnov B.M. Fizika fraktal'nykh klasterov. – M.: Nauka, 1991.

7. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskiy D.A. Apparaty so statsionarnym zernistym sloem. Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty. – L.: Khimiya, 1979.

8. Kravchenko V.M., Lutova A.O. Gidrodinamika plotnogo sloya kartofelya v protsesse sushki peregretym parom // Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya. – 2014, №2. S. 39...44.

Рекомендована кафедрой строительной механики ИВГПУ. Поступила 01.04.19.