

УДК 62.932.2

**Ольга Борисовна Колибаба**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: koli-baba@mail.ru

**Мария Владимировна Козлова**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

**Андрей Борисович Гаряев**

ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет "МЭИ", доктор технических наук, профессор кафедры теплообменных процессов и установок, Россия, Москва, e-mail: gab874@yandex.ru

**Юрий Владимирович Морозов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: qwest-78e23@mail.ru

## **Исследование гидродинамических закономерностей в слое влажных твердых коммунальных отходов в процессе их обезвоживания**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Одним из эффективных методов обращения с твердыми коммунальными отходами является термическая деструкция. Для термической переработки используются различные установки, в том числе шахтные печи, отличающиеся высокой надежностью и простотой конструкции. Перерабатываемые отходы перемещаются в рабочем пространстве печи под действием силы тяжести, проходя зоны сушки и пиролиза, подвергаясь непрерывной тепловой обработке. В зоне сушки осуществляется нагрев и обезвоживание слоя твердых коммунальных отходов за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза. Недостатком в работе шахтных печей является плохая газопроницаемость слоя в зоне сушки, обусловленная слипаемостью сырья, что приводит к неравномерному прохождению газового потока через пористый слой твердых коммунальных отходов. Газодинамика слоя должна быть организована таким образом, чтобы учесть данную особенность. В этой связи актуальным является исследование гидравлического сопротивления слоя твердых коммунальных отходов, на которое оказывает влияние ряд факторов, таких как структура и влажность сырья, а также скорость сушильного агента.

**Материалы и методы.** Исследование гидродинамических закономерностей в слое влажных твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава в процессе их обезвоживания проведено посредством расчетных и экспериментальных методов исследований.

**Результаты.** По результатам экспериментальных исследований гидродинамики слоя влажных твердых коммунальных отходов в процессе его высушивания установлены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от влажности сырья и скорости фильтрации сушильного агента. Предложена формула для расчета перепада давления в слое отходов, учитывающая порозность слоя твердых коммунальных отходов. Экспериментально установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления при снижении влажности в процессе высушивания уменьшается неравномерно: в области повышенной влажности (40–89 %) наблюдается незначительное уменьшение сопротивления, характер зависимости близок к линейному, сопротивление резко падает, нелинейность зависимости возрастает.

**Выводы.** Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов работы шахтных печей термической переработки твердых коммунальных отходов.

**Ключевые слова:** твердые коммунальные отхода, термическая переработка, шахтная печь, обезвоживание, гидравлическое сопротивление, порозность, влажность

**Olga Borisovna Kolibaba**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: koli-baba@mail.ru

**Maria Vladimirovna Kozlova**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

**Andrey Borisovich Garyaev**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Heat and Mass Transfer Processes and Installations Department, Russia, Moscow, e-mail: gab874@yandex.ru

**Yuri Vladimirovich Morozov**

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: qwest-78e23@mail.ru

## Study of hydrodynamic regularities in a layer of wet solid municipal waste during its dehydration

**Abstract**

**Background.** Thermal destruction is one of the effective methods of treatment of municipal solid waste (MSW) is. Various installations are used for thermal processing, including shaft furnaces, which are distinguished by high reliability and simplicity of design. The waste being processed moves in the furnace body under the action of gravity, passing through drying and pyrolysis zones and undergoing continuous heat treatment. In the drying zone, the MSW layer is heated and dehydrated due to heat exchange with the gas flow from the underlying pyrolysis zone. A disadvantage of shaft furnaces is poor gas permeability of the layer in the drying zone, caused by the stickiness of the raw materials. It leads to uneven passage of the gas flow through the porous layer. Therefore, flow fluid dynamics of the layer should be organized in such a way as to take this feature into account. In this regard, it is relevant to study the hydraulic resistance of the MSW layer, which is influenced by a number of factors, such as the structure and humidity of the layer, as well as the speed of the drying agent.

**Materials and methods.** Computational and experimental research methods have been used to study hydrodynamic regularities in the layer of wet MSW during their dehydration.

**Results.** The authors have established the dependences on the coefficient of hydraulic resistance on the raw material moisture content and the filtration rate of the drying agent based on the results of experimental studies of the hydrodynamics of a layer of wet MSW during its drying. A formula has been proposed to calculate the pressure drop in a layer of waste considering the porosity of the MSW layer. It has been experimentally established that the coefficient of hydraulic resistance decreases unevenly with decreasing humidity during the drying process. In the zone of high humidity (40–89 %) a slight decrease in resistance is observed, the nature of the dependence is close to linear. Then the resistance drops sharply, the nonlinearity of the dependence increases.

**Conclusions.** The results obtained can be used to select the operating modes of shaft furnaces for thermal processing of MSW.

**Key words:** municipal solid waste, thermal processing, shaft furnace, dehydration, hydraulic resistance, porosity, humidity

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2025.1.023-029

**Введение.** Ежегодно возрастающие объемы твердых коммунальных отходов (ТКО) вызывают необходимость их переработки. Одним из эффективных методов обращения с отходами является термическая деструкция, которая позволяет не только резко сократить количество отходов, получить полезные продукты, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением городов и рекультивацией земельных угодий [1–4].

Для термической переработки используются различные установки, в том числе шахтные печи, отличающиеся высокой надежностью и простотой конструкции [5]. Перерабатываемые отходы перемещаются в рабочем пространстве печи под действием силы тяжести, проходя зоны сушки и пиролиза, подвергаясь непрерывной тепловой обработке. В зоне сушки осуществляется нагрев и обезвоживание слоя ТКО за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза. В зоне пиролиза происходит термохимическая деструкция ТКО с образованием пиролизного газа и твердого углеродного остатка. Полученный в процессе разложения ТКО пиролизный газ делится на два потока: одна часть газа направляется стороннему потребителю, а

другая – в зону сушки для обезвоживания влажных отходов. Увлажненный пиролизный газ из зоны сушки подается в конденсатосборник для охлаждения и удаления влаги и затем в горелки как основное топливо. Рабочий процесс термического разложения осуществляется за счет энергии, полученной от сжигания пиролизного газа.

Недостатком в работе шахтных печей является плохая газопроницаемость слоя, обусловленная слипаемостью сырья, что приводит к неравномерному прохождению газового потока через высушиваемый пористый слой. Гидродинамика слоя должна быть организована таким образом, чтобы учесть данную особенность. В этой связи актуальным является исследование гидравлического сопротивления слоя ТКО, на которое оказывает влияние ряд факторов, таких как структура и влажность сырья, порозность слоя, скорость сушильного агента. Сложность задачи заключается в том, что слой не только формируется из различных по форме и свойствам элементов, но и изменяет свою порозность в процессе высушивания. С изменением порозности изменяется и скорость фильтрации сушильного агента. Для решения такой задачи целесообразно использовать экспериментальные методы.

Ниже предлагаются результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления влажных ТКО в процессе высушивания.

В настоящее время существует ряд формул для определения величины гидравлического сопротивления плотного зернистого слоя, состоящего из различного вида частиц [6–10]. Зависимости, предлагаемые разными авторами для расчета гидравлического сопротивления слоя, записаны либо в виде известной формулы Дарси-Вейсбаха [8]

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho, \quad (1)$$

либо в виде

$$\Delta p = C_{\text{пр}} \cdot \rho W_{\text{ф}}^2 H, \quad (2)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления в слое, Па;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $H$  – высота слоя, м;  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр элемента слоя, м;  $W_{\text{ф}}$  – скорость фильтрации (фиктивная скорость), м/с;  $\rho$  – плотность фильтрующей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления слоя, м<sup>-1</sup>:

$$C_{\text{пр}} = \frac{\xi}{2d_{\text{экв}}}. \quad (3)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления зачастую выбирают в качестве критерия для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от размера частиц, температуры и скорости фильтрации. Анализируя имеющиеся данные [8], стоит отметить, что одни исследователи считают коэффициент  $C_{\text{пр}}$  функцией только критерия Рейнольдса, другие, устанавливая зависимость порозности от эквивалентного диаметра элементов слоя, находят, что  $\xi$  является функцией  $Re$  и порозности, третьи отмечают зависимость порозности от  $d_{\text{экв}}$ . В [8] также показано, что на характер зависимости коэффициента гидравлического сопротивления слоя от порозности практически не влияет форма частиц.

Как отмечено выше, особенностью структуры слоя ТКО, отличающей его от «классического» плотного зернистого слоя, является наличие элементов различной формы. Для описания подобной структуры известны формулы Касаткина-Акопяна (4) и Лева (5), в которых наличие элементов любой формы учитывается введением коэффициента формы элементов слоя [6]:

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho \left[ \frac{(1-f)^{3-n}}{f^3} \varphi^{3-n} \right]; \quad (4)$$

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho \frac{(1-f)^2}{f^3} \varphi, \quad (5)$$

где  $f$  – порозность;  $n$  – показатель степени;  $\varphi$  – коэффициент формы, зависящий от размеров и формы элементов слоя и показывающий, во сколько раз площадь смоченной поверхности слоя, состоящего из данных элементов, больше площади смоченной поверхности слоя из шарообразных элементов.

Несколько упростив вышеописанные формулы, за основу примем зависимость вида

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho f^m \varphi, \quad (6)$$

где  $m$  – показатель степени.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления были проведены в лабораторных условиях для увлажненных образцов смеси ТКО среднего морфологического состава: пищевые отходы – 48,6 %; бумага и картон – 41,7 %; текстиль – 6,9 %; дерево – 1,4 %; кожа и резина – 1,4 % (рис. 1).



Рис. 1. Образец ТКО

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

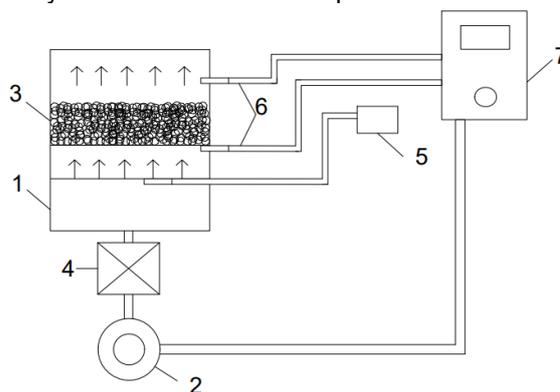


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – сушильная камера; 2 – вентилятор; 3 – слой ТКО; 4 – калорифер; 5 – анемометр; 6 – датчики давления; 7 – блок измерений и управления

Эксперимент проводили в следующей последовательности. Сухие ТКО предварительно измельчали и взвешивали. Затем их увлажняли,

снова взвешивали и размещали равномерным слоем на решетке в цилиндрической сушильной камере 1. При помощи вентилятора 2 осуществляли подачу воздуха под слой ТКО 3 для высушивания. Перед подачей в сушильную камеру воздух предварительно нагревали в калорифере 4 до температуры 100 °С. Скорость воздуха измеряли анемометром 5, а перепад давления в слое ТКО – с помощью датчиков давления 6. Показания приборов выводили на блок измерений и управления 7. В течение процесса сушки производили взвешивание образца с последующим расчетом относительной влажности и порозности ТКО.

Считая, что коэффициент гидравлического сопротивления зависит от порозности, которая, в свою очередь, определяется влажностью отходов, и критерия Рейнольдса, который определяется скоростью движения фильтрационного потока теплоносителя, в ходе эксперимента варьировали скорость движения воздуха

на входе в слой от 2,5 до 3,5 м/с. Относительная влажность исходных ТКО в разных опытах составляла от 79,2 до 89,4 %. Порозность слоя рассчитывали по формуле

$$f = \frac{V - V_{\text{ск}}}{V}, \quad (7)$$

где  $V$  – объем пористого слоя отходов в сушильной камере, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ск}}$  – объем твердого «скелета» (непосредственно ТКО), м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{ск}} = \frac{m_{\text{ск}}}{\rho_{\text{cr}}}, \quad (8)$$

где  $m_{\text{ск}}$  – масса влажных ТКО, определяемая взвешиванием в процессе их высушивания, кг;  $\rho_{\text{cr}}$  – средняя плотность измельченных ТКО, кг/м<sup>3</sup>.<sup>1</sup>

Относительная погрешность эксперимента не превысила 2,5 %.

Результаты экспериментов приведены в таблице.

### Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления слоя ТКО

Скорость воздуха, м/с	Высота слоя, м	Порозность ТКО	Масса ТКО, кг	Относительная влажность ТКО, %	Перепад давления, Па
2,5	0,130	0,53	0,508	89,4	117,6
	0,120	0,57	0,388	56,9	98,0
	0,117	0,58	0,288	28,5	88,2
	0,115	0,59	0,232	11,2	78,4
	0,113	0,60	0,210	1,9	76,4
3	0,105	0,70	0,376	82,5	107,8
	0,100	0,71	0,328	59,2	88,2
	0,098	0,76	0,262	27,2	88,2
	0,097	0,77	0,246	19,4	78,4
	0,095	0,78	0,236	1,4	68,6
3,5	0,110	0,66	0,386	79,2	120,2
	0,100	0,68	0,340	44,0	119,6
	0,097	0,72	0,284	20,3	115,2
	0,095	0,74	0,258	9,3	107,4
	0,087	0,76	0,234	1,0	96,6

По экспериментальным данным были построены кинетические кривые сушки ТКО при различных скоростях сушильного агента на входе в слой (рис. 3).

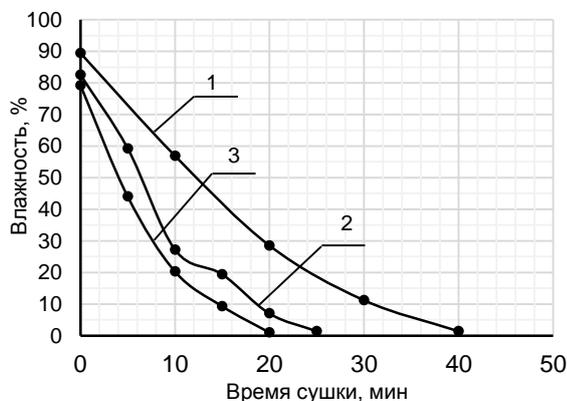


Рис. 3. Кривые кинетики сушки влажных ТКО при скоростях сушильного агента: 1 – 2,5 м/с; 2 – 3 м/с; 3 – 3,5 м/с

**Результаты исследования.** Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью дифференциального метода Вант-Гоффа [11]. Предполагаем, что зависимость перепада давления от порозности описывается степенной функцией

$$A = \xi f^m, \quad (9)$$

где

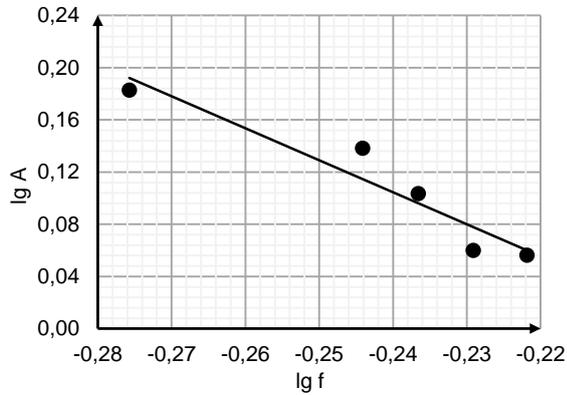
$$A = \frac{2d_{\text{экв}}\Delta p}{H\rho W_{\text{ф}}^2}. \quad (10)$$

Согласно методу Вант-Гоффа, по опытным данным (см. таблицу) строили графическую зависимость  $A$  от  $f$  в логарифмических координатах, в которых степенная функция имеет вид прямой линии. Показатель степени  $m$  при  $f$  равен тангенсу угла наклона прямой. Постоянную  $\xi$  определяли как величину отрезка, отсекаемого прямой на оси

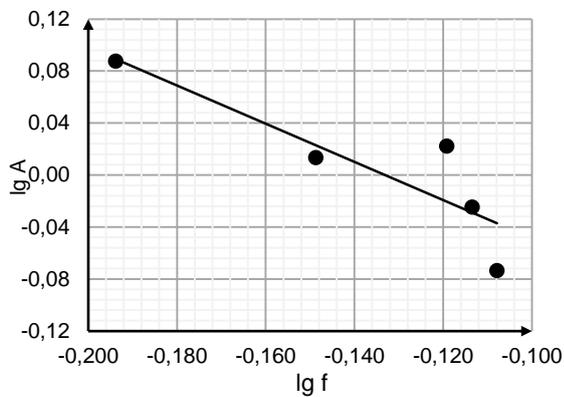
<sup>1</sup> Таблица плотности отходов по ФККО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecopoliss.ru/poleznaya-informaciya/tablica-plotnosti-othodov> (дата обращения 10.11.24).

ординат (с учетом знака) и равного  $\lg \xi$ . По значению  $\lg \xi$  находили величину  $\xi$ .

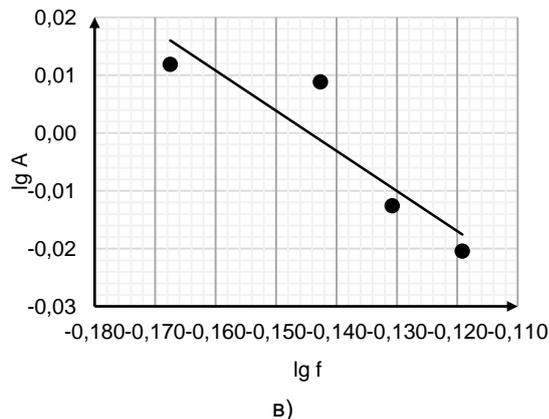
Ниже приведен график зависимости  $A$  от  $f$ , полученный при скоростях теплоносителя на входе в слой ТКО: 2,5 м/с, 3 м/с, 3,5 м/с и 4 м/с (рис. 4).



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимость  $\lg A$  от  $\lg f$  при различных скоростях сушильного агента: а – 2,5 м/с; б – 3 м/с; в – 3,5 м/с

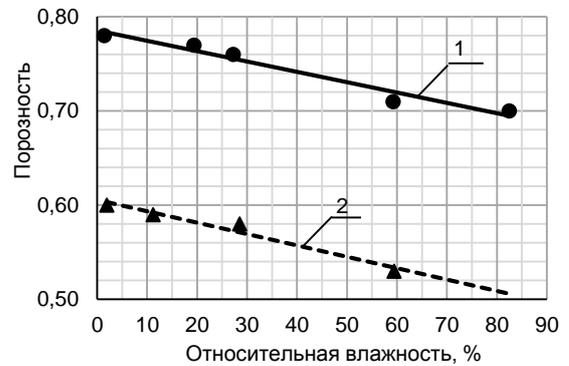
Очевидно, что графики имеют сходный характер, а угол наклона прямой линии свидетельствует о том, что показатель степени  $m$  (9) отрицательный и зависит от скорости теплоносителя.

Обобщая полученные в результате обработки по методу Вант-Гоффа данные, зависимость показателя степени  $m$  от числа Рейнольдса можно записать в виде

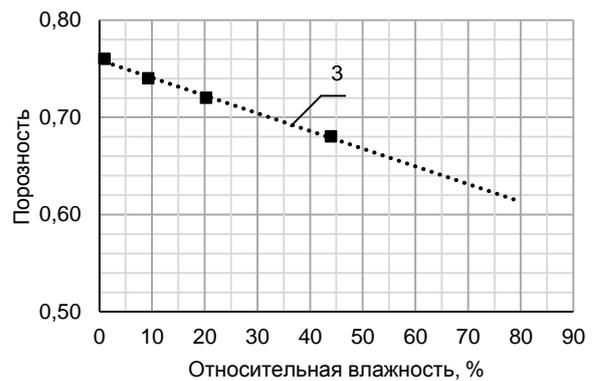
$$m = 0,0079 \cdot Re - 6,754. \quad (11)$$

Графическая интерпретация экспериментальной зависимости порозности слоя от влажности отходов (см. таблицу) представлена на рис. 5.

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что зависимость порозности слоя ТКО от влажности сырья носит линейный характер, с уменьшением влажности в процессе высушивания материала порозность возрастает.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость порозности слоя ТКО от влажности сырья при разных скоростях теплоносителя: а – 1 – 3 м/с; 2 – 2,5 м/с; б – 3 – 3,5 м/с

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТКО от числа Рейнольдса (скорости фильтрации) сушильного агента представлена на рис. 6.

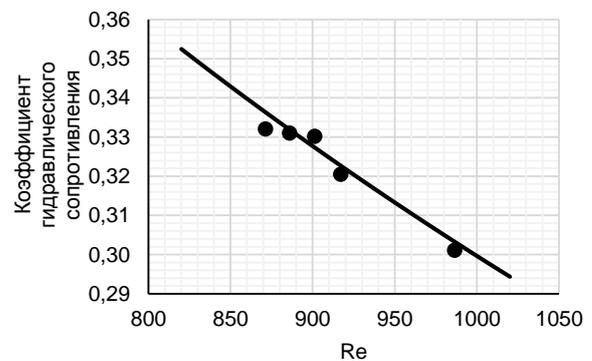


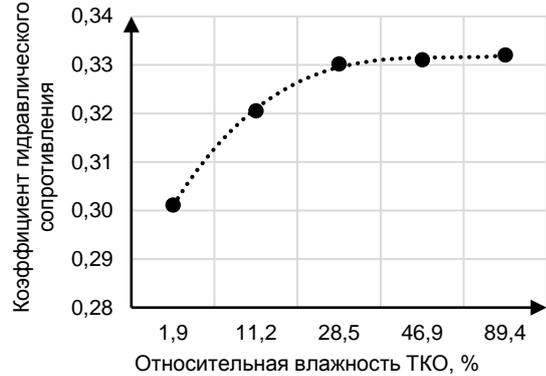
Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТКО от скорости фильтрации

Аппроксимация экспериментальных данных в диапазоне изменения порозности от 0,52 до 0,78 произведена уравнением вида

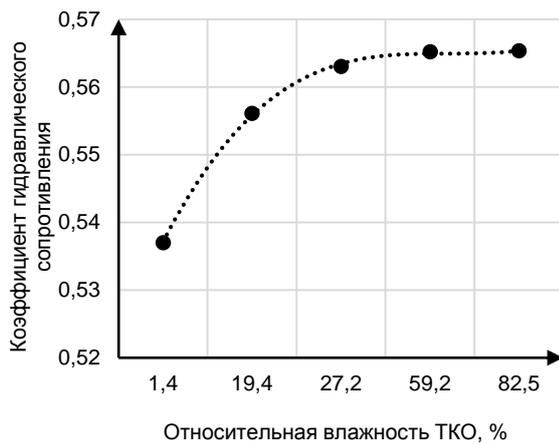
$$\xi = 0,000000158 \cdot \text{Re}^2 - 0,000581 \cdot \text{Re} + 0,722 \quad (12)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,999$ .

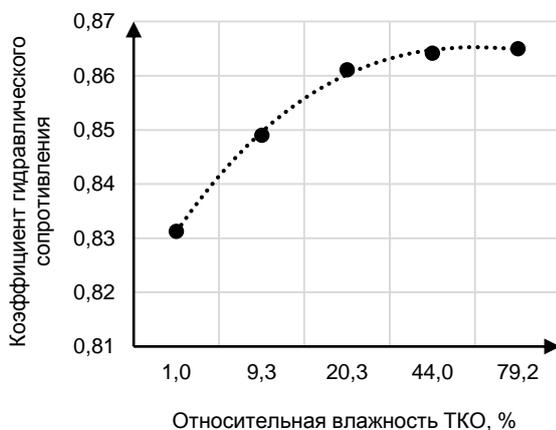
Графики зависимости коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТКО от влажности сырья при различных скоростях сушильного агента на входе в слой ТКО приведены на рис. 7.



а)



б)



в)

Рис. 7. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от относительной влажности ТКО при скоростях сушильного агента на входе в слой: а – 2,5 м/с; б – 3 м/с; в – 3,5 м/с

Полученные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от влажности  $\omega$  аппроксимированы полиномиальными уравнениями следующего вида:

– при скорости 2,5 м/с (рис. 7,а)

$$\xi = 0,0008 \cdot \omega^3 - 0,0107 \cdot \omega^2 + 0,0463 \cdot \omega + 0,26,$$

коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9986$ ;

– при скорости 3 м/с (рис. 7,б)

$$\xi = 0,0008 \cdot \omega^3 - 0,0106 \cdot \omega^2 + 0,0447 \cdot \omega + 0,50,$$

коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9994$ ;

– при скорости 3,5 м/с (рис. 7,в)

$$\xi = 0,0003 \cdot \omega^3 - 0,0055 \cdot \omega^2 + 0,0331 \cdot \omega + 0,80,$$

коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9982$ .

Анализ результатов, представленных на рис. 7, показывает, что кривые носят сходный характер. Коэффициент гидравлического сопротивления при снижении влажности в процессе высушивания уменьшается неравномерно. В области повышенной влажности (40–89 %) наблюдается незначительное уменьшение сопротивления, характер зависимости близок к линейному. Далее с уменьшением относительной влажности сопротивление резко падает, нелинейность зависимости возрастает.

Для оценки корректности расчетов, выполненных по формуле (6), проведено сравнение результатов расчета по предлагаемой зависимости с результатами, полученными по известным формулам Касаткина–Акопяна и Лева (рис. 8). Графики, приведенные на рис. 8, получены для скорости сушильного агента на входе в слой ТКО 3,5 м/с.

Анализ данных рис. 8 показывает, что графики носят сходный характер. Очевидно, что результаты расчета по формулам Лева и Касаткина–Акопяна существенно различаются между собой, причем это расхождение с увеличением числа Рейнольдса уменьшается. Более близкие результаты получаются при сравнении с формулой Лева. Средняя относительная погрешность в этом случае не превышает 30 %.

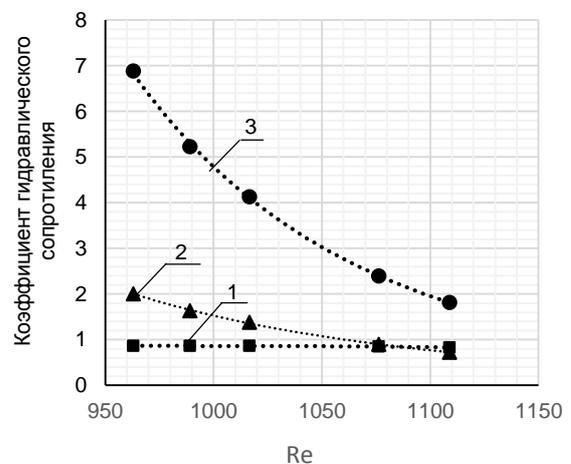


Рис. 8. Сравнение результатов расчета коэффициента гидравлического сопротивления: 1 – по предлагаемой формуле; 2 – по формуле Лева; 3 – по формуле Касаткина–Акопяна

**Выводы.** Экспериментальные исследования гидродинамики слоя влажных ТКО в процессе его высушивания позволили получить зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от влажности сырья и скорости фильтрации сушильного агента.

Предложенная формула для расчета перепада давления в слое отходов учитывает порозность слоя. Результаты расчета по предлагаемой формуле сопоставимы с результатами расчетов по известным зависимостям.

Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов работы шахтных печей термической переработки ТКО.

#### Список литературы

1. **Технические** подходы по осуществлению непрерывного пиролиза углеродсодержащих коммунальных отходов / М.Р. Хасиятуллово, А.В. Кудин, Г.И. Павлов и др. // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 11. – С. 106–112. DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_11\_106.

2. **Тугов А.Н.** Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 3–20.

3. **Пиролитические** методы термической переработки твердых коммунальных отходов / В.В. Хасхачих, О.М. Ларина, Г.А. Сычев и др. // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 467–480.

4. **Колибаба О.Б., Козлова М.В., Гаряев А.Б.** Современные тенденции в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: проблемы и перспективы. Обзор // Вестник Московского энергетического института. – 2024. – № 4. – С. 90–107.

5. **Пат.** № 2700614 С1 Российская Федерация МПК F23G 5/027(2006.01), F27B 9/00(2006.01). Установка для термической переработки твердых коммунальных отходов методом пиролиза : № 2019108660 : заявл. 26.03.2019 : опубл. 18.09.2019 / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина А.С. Семенов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Бюл. № 26.

6. **Никольский Б.П.** (ред.) Справочник химика. – М.; Л.: Изд-во «Химия», 1966. – 976 с.

7. **Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.** Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

8. **Сравнительный** анализ описания гидравлического сопротивления плотного слоя из частиц разной формы / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.В. Луговкин, В.Ф. Ярчук // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 9. – С. 688–695.

9. **Бобков В.И., Орехов В.А.** Исследование аэродинамики полифракционного плотного слоя рудного сырья // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 9. – С. 67–72.

10. **Ровенский И.И., Бережной Н.Н.** Исследование газопроницаемости слоя окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1964. – № 1. – С. 27–32.

11. **Образцова Е.Ю., Рухов А.В.** Основы физической химии. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 80 с.

#### References

1. Khasiyatullovo, M.R., Kudin, A.V., Pavlov, G.I., Sitnikov, O.R., Garmonov, S.Yu. *Tekhnicheskie podkhody po osushchestvleniyu nepreryvnogo piroliza uglerodsoderzhashchikh kommunal'nykh otkhodov* [Technical approaches to the implementation of continuous pyrolysis of carbon-containing municipal waste]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2022, vol. 25, no. 11, pp. 106–112. DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_11\_106.

2. Tugov, A.N. *Sovremennyye tekhnologii termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov i perspektivy ikh realizatsii v Rossii (obzor)* [Modern technologies for thermal processing of municipal solid waste and prospects for their implementation in Russia (review)]. *Teploenergetika*, 2021, no. 1, pp. 3–20.

3. Khaskhachikh, V.V., Larina, O.M., Sychev, G.A., Gerasimov, G.Ya., Zaychenko, V.M. *Piroliticheskiye metody termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov* [Pyrolytic methods for thermal processing of municipal solid waste]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 467–480.

4. Kolibaba, O.B., Kozlova, M.V., Goryaev, A.B. *Sovremennyye tendentsii v sfere obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami: problemy i perspektivy. Obzor* [Modern trends in the field of solid municipal waste management: problems and prospects. Review]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2024, no. 4, pp. 90–107.

5. Kolibaba, O.B., Gorinov, O.I., Dolinin, D.A., Gabitov, R.N., Samyshina, O.V., Semenov, A.S. *Ustanovka dlya termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov metodom piroliza* [Installation for thermal processing of municipal solid waste by pyrolysis]. Patent RF, no. 2700614, 2019.

6. Nikol'skiy, B.P. (ed.) *Spravochnik khimika* [Chemist's Handbook]. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo «Khimiya», 1966. 976 p.

7. Aerov, M.E., Todes, O.M., Narinskiy, D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem* [Apparatuses with a stationary granular layer]. Leningrad: Khimiya, 1979. 176 p.

8. Yur'ev, B.P., Gol'tsev, V.A., Lugovkin, V.V., Yar-chuk, V.F. *Sravnitel'nyy analiz opisaniya gidravlicheskogo soprotivleniya plotnogo sloya iz chastits raznoy formy* [Comparative analysis of the description of the hydraulic resistance of a dense layer of particles of different shapes]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 688–695.

9. Bobkov, V.I., Orekhov, V.A. *Issledovanie aerodinamiki polifraktsionnogo plotnogo sloya rudnogo syr'ya* [Study of aerodynamics of polyfractional dense layer of ore raw materials]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 9, pp. 67–72.

10. Rovenskiy, I.I., Berezhnoy, N.N. *Issledovanie gazopronitsaemosti sloya okatyshey* [Study of gas permeability of pellet layer]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1964, no. 1, pp. 27–32.

11. Obratsova, E.Yu., Rukhov, A.V. *Osnovy fizicheskoy khimii* [Fundamentals of physical chemistry]. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO «TGTU», 2023. 80 p.