

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ УСТАНОВКА ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ТОПЛИВО И АДСОРБЕНТЫ

Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников

Кафедра Переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Россия  
E-mail: vcvcvc12345678@gmail.com

*Целью работы является разработка энергонезависимого и ресурсосберегающего способа пирогенетической переработки органических отходов построенного по принципу использования тепловой энергии высококалорийных горючих газов, получаемых при разложении органических отходов, с производством конечного продукта в виде жидкого топлива и адсорбентов. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач: построение математической модели процесса пирогенетического разложения отходов; экспериментальные исследования по пиролизу и активации отходов: лесопромышленного комплекса, сельского хозяйства, химической и текстильной промышленности; математическое моделирование процесса разложения отходов. Наиболее важными результатами работы являются: разработанная математическая модель процесса пиролиза; полученные и проанализированные кинетические зависимости изменений массы сухого остатка, жидкой и газообразной фаз. Показано, что для твердых органических отходов усредненное время разложения составляет 90 мин, при этом отходы теряют порядка 70% от изначальной массы, в среднем 45% от изначальной массы составляет конденсат пиролизных газов - жидкое топливо, остальное высококалорийный горючий газ. Показано, что при активации сухой остаток теряет 53% в массе, отделившуюся часть составляет газы активации, которые являются горючими газами. Представлена технологическая схема термохимической переработки органических отходов в жидкое топливо и твердый адсорбент. Наиболее значимыми результатами работы являются возможность применения математической модели построенной на уравнениях химической кинетики для моделирования процесса пирогенетического разложения насыпного слоя отходов. Было также установлено, что время переработки для пищевых, древесных, синтетических отходов различается, при удалении всех компонентов из углеродной составляющей массы остатка убывает на предельно малые значения, это наблюдение позволяет создать единый температурный режим для отходов с различным химическим составом и как следствие выработать единую методику расчета энергосберегающего аппаратного оформления.*

**Ключевые слова:** органические отходы, пиролизные газы, жидкое топливо, адсорбенты, экзотермический процесс, эндотермический процесс, энергосбережение, ресурсосбережение

## ENERGY-SAVING PLANT FOR PROCESSING ORGANIC WASTE INTO FUELS AND ADSORBENTS

R.G. Safin, V.G. Sotnikov

Department of Wood Materials Processing, KNITU, Kazan, Russia  
E-mail: vcvcvc12345678@gmail.com

*The aim of the work is to develop a non-volatile and resource-saving method for pyro-genetic processing of organic waste based on the principle of using thermal energy of high-calorie combustible gases obtained during decomposition of organic waste, with the production of the final product in the form of liquid fuels and adsorbents. The goal is achieved by solving the following tasks: building a mathematical model of the pyro-genetic decomposition of waste; experimental*

*studies on pyrolysis and activation of waste: timber industry, agriculture, chemical and textile industries; mathematical modeling of the decomposition of waste. The most important results of the work are: the developed mathematical model of the pyrolysis process; the obtained and analyzed kinetic dependences of changes in the mass of the dry residue, liquid and gaseous phases. It is shown that for solid organic waste, the average decomposition time is 90 minutes, while the waste loses about 70% of the initial mass, on average 45% of the initial mass is pyrolysis gas condensate - liquid fuel, the rest is high-calorie combustible gas. It is shown that upon activation, the dry residue loses 53% in mass, the separated part is made up of activation gases, which are flammable gases. The technological scheme of thermochemical processing of organic waste into liquid fuel and solid adsorbent is presented. The most significant results of the work are the possibility of applying a mathematical model based on chemical kinetics equations to simulate the pyrogenetic decomposition of a bulk waste layer. It was also found that the processing time for food, wood, and synthetic waste varies, when removing all components from the carbon component mass of the residue decreases by extremely small values, this observation allows you to create a single temperature regime for waste with different chemical compositions and, as a result, to develop a unified method for calculating energy-saving hardware design.*

**Key words:** organic waste, pyrolysis gases, liquid fuels, adsorbents, exothermic process, endothermic process, energy conservation, resource conservation

**Для цитирования:**

Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Энергосберегающая установка переработки органических отходов в топливо и адсорбенты. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 3. С. 17–24. DOI: 10.6060/RCJ.2023673.3.

**For citation:**

Safin R.G., Sotnikov V.G. Energy-saving plant for processing organic waste into fuels and adsorbents. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 3. P. 17–24. DOI: 10.6060/RCJ.2023673.3.

## ВВЕДЕНИЕ

Термохимическая переработка органических отходов может стать прибыльным сектором современной экономики. При пиролизе происходит полная переработка всей органической массы отходов. Получаемые при переработке продукты это пиролизный дистиллят, газ, и углеродистый остаток. Вопросы анализа и применения продуктов пиролиза широко освещены в работах зарубежных авторов. Так в работах [1–4] рассмотрены физико-химические свойства пиролизного топлива и возможности его применения в различных отраслях экономики. Статьи [5–11] посвящены вопросам применения углеродистого остатка в качестве адсорбентов и катализаторов. Ценность продуктов пиролиза не вызывает сомнений, но для их производства нужно довольно специфическое, сложное и энергозатратное оборудование. В публикациях [12–21] частично рассмотрены вопросы аппаратного оформления процесса пиролиза и сопутствующих процессов, но результаты скорее носят описательный характер. Возможности для улучшения и оптимизации пиролизного оборудования рассмотрены недостаточно. Можно сделать вывод, что пирогенетическая переработка отходов акту-

альное научное направление, но вопрос оптимизации оборудования для пиролиза слабо изучен.

Цель исследований, проводимых в данной работе, - разработка энергосберегающего способа пиролиза твердых органических отходов для получения жидкого топлива и адсорбентов.

Поставленная цель достигнута путем математического и физического моделирования теплообменных процессов, происходящих при разложении органических отходов на сухой остаток и пиролизные газы.

Известно, что в ходе пирогенетического разложения, перерабатываемые отходы разлагаются на более простые материалы: углеродистый остаток, газ и газовый дистиллят. В данной работе предлагается использование в качестве основного теплоносителя горючего газа, получаемого при переработке отходов. Данное решение позволит снизить себестоимость продуктов пиролиза: адсорбента, полученного из углеродистого остатка, и топлива, полученного из пиролизного дистиллята [22–28].

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена схема предлагаемого способа переработки органических отходов.

Согласно схеме, отходы сушатся и пиролизуются, затем фаза пиролизных газов разделяется на дистиллят и горючие газы, последние выгорают в топке, обеспечивая автономность при производстве адсорбента и топлива.

Для переработки по энергосберегающему способу подходят различные органические отходы, например, низкосортная древесина, ткани льна и хлопка, косточки абрикоса, скорлупа грецкого ореха, отработанные шины и др. Чтобы процессы разложения отходов протекали быстрее, их измельчают до плоских частиц толщиной не более 5 мм, затем сушат для удаления влаги.

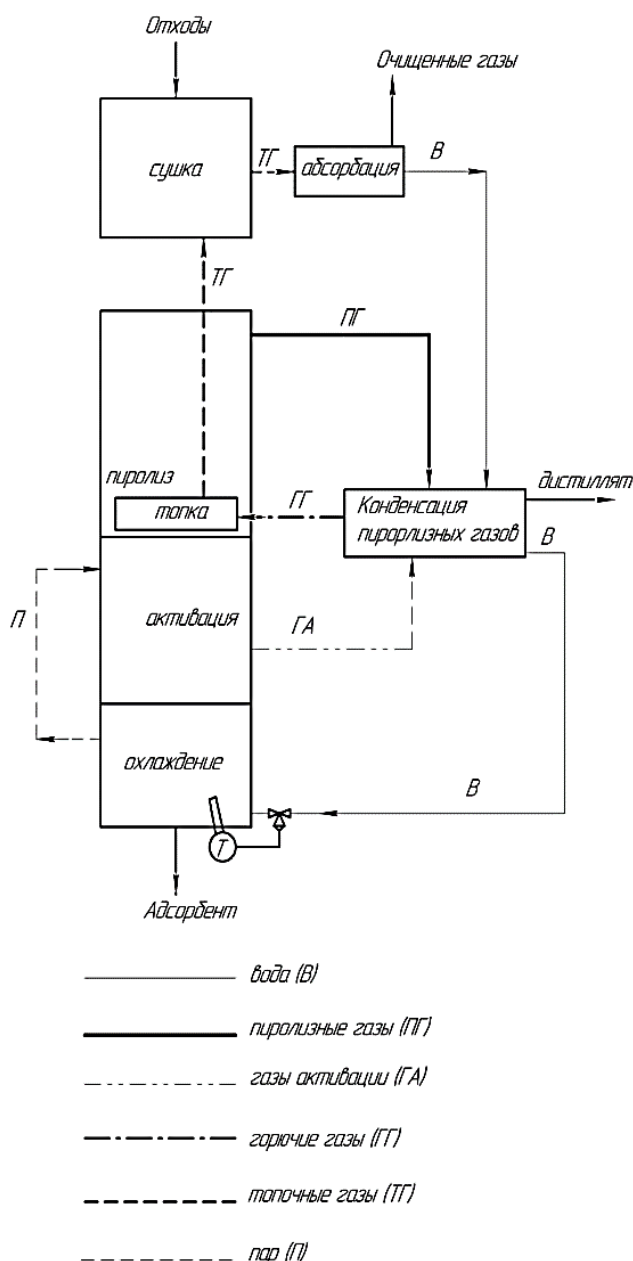


Рис. 1. Схема энергосберегающего способа переработки органических отходов

Сушка отходов происходит топочными газами при температурном диапазоне 200-300 °С зависящем от влагосодержания отходов. Отработанные топочные газы прогоняются через абсорбер и выбрасываются в атмосферу.

В камеру пиролиза перенос тепла осуществляется кондуктивно, отходы разлагаются в герметичной камере при постоянной температуре 450-650 °С, в зависимости от вида перерабатываемых отходов.

Процесс кондуктивного пиролиза математически описывается системой дифференциальных уравнений тепломассопереноса и уравнений химической кинетики.

Эффективная теплопроводность рассматриваемых органических отходов небольшая, поэтому при кондуктивном тепло подводе перерабатываемое сырье целесообразно размещать между двумя, теплоподводящими поверхностями на расстоянии, определенном временем прогрева до центра слоя. В связи с этим перенос тепла, реализованный в энергосберегающем способе переработки органических отходов, описана частным случаем дифференциального уравнения Фурье.

$$W_M \cdot \rho_{cl} \cdot c_M \frac{\partial T_{cl}}{\partial h} = \frac{\partial T_{cl}}{\partial l} \cdot \left( \lambda_{cl} \cdot \frac{\partial T_{cl}}{\partial l} \right) + q_{xp} \quad (1)$$

где,  $h$  – текущая координата высоты слоя отходов в камере пиролиза, м;  $\rho_{пл}$  – насыпная плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $c_M$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $T_{cl}$  – температура слоя, °С;  $l$  – текущая координата расстояния от прилегающей стенки камеры пиролиза, м;  $\lambda_{cl}$  – эффективный коэффициент теплопроводности слоя материала, Вт/(м·К), зависит от порозности слоя, температуры, скорости движения биомассы в зоне пиролиза, его значение определяется экспериментальным путем;  $W_M$  – скорость движения отходов по пиролизной зоне, м/с;  $q_{x,p}$  – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м<sup>2</sup>·с), рассчитывается по выражению:

$$q_{x,p} = \sum_{i=1}^n q_i (-k_i \rho_i) \quad (2)$$

где,  $q_i$  – удельная теплота превращения  $i$  компонента, Дж/кг;  $k_i$  – константа скорости  $i$  химической реакции, Дж/кг.

Приведение уравнения Фурье к форме записи уравнения (1) позволяет существенно упростить расчеты и наложить граничные условия, не противоречащие физической картине процесса кондуктивного теплопереноса. В дифференциальном уравнении Фурье время пиролиза выражено через координату высоты насыпного слоя по соотношению:

$$\tau_{п} = h_{п} / W_M \quad (3)$$

Замена проведена, с целью определения оптимальных геометрических параметров камеры кондуктивного пиролиза

На рис. 2 представлена схема краевых условий для уравнения (1).

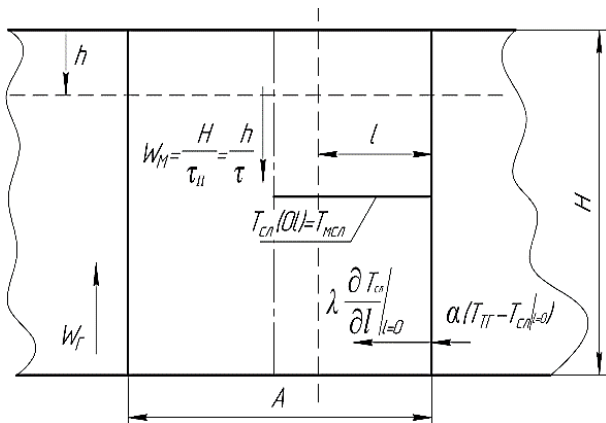


Рис. 2. Схема краевых условий

Процесс пирогенетического разложения начинается при температуре сырья после зоны сушки.

$$T_{сн}(0,l) = T_{м.с} \quad (4)$$

Передачу тепла от топочного газа к слою частиц можно задать граничным условием 3 рода:

$$-\lambda_{сн} \frac{\partial T_{сн}}{\partial l} \Big|_{l=0} = \alpha (T_{г} - T_{сн} |_{l=0}) \quad (5)$$

где,  $T_{г}$  – температура топочного газа, °С.

При разложении органических отходов образуется углеродистый остаток и пиролизные газы. Изменения концентрации по сечению частицы записаны раздельно для сырья, угля и парогазовой смеси:

$$\text{– для отходов: } \frac{\partial p_o}{\partial \tau} = -k_o p_o \quad (6)$$

$$\text{– для угля: } \frac{\partial p_y}{\partial \tau} = \varphi \cdot k_o p_o \quad (7)$$

$$\text{– для пиролизных газов: } \frac{\partial p_{пг}}{\partial \tau} = (1 - \varphi) k_o p_o \quad (8)$$

где,  $p$  – удельная масса компонента,  $\text{кг/м}^3$  ( $o$  – отходов,  $y$  – угля,  $пг$  – пиролизных газов);  $\varphi$  – доля угля в пиролизуемой частице, степень пиролиза отходов определяется соотношением:

$$\varphi = m_y / m_o \quad (9)$$

$k_o$  – константа скорости химических реакций разложения сырья.

Для уравнений (6)-(8) начальными условиями служат начальные удельные массы органических отходов и продуктов их разложения:

$$p_o = p_{o0} \quad (10)$$

$$p_{пг} = 0 \quad (11)$$

$$p_y = 0 \quad (12)$$

С целью проверки адекватности представленной выше математической модели проведены экспериментальные исследования по получению адсорбентов и пиролизного дистиллята, из различных видов твердых органических отходов. В качестве перерабатываемых отходов исследовались: лузга подсолнечника, древесная щепа лиственницы, отработанные шины. Такой широкий диапазон отходов позволит уловить общие закономерности пирогенетического разложения твердых органических отходов.

На рис. 3 представлены схема и внешний вид экспериментальной установки для пиролиза органических отходов. Установка состоит из муфельной печи 1, в которую помещается камера пиролиза 2. Конденсация пиролизных газов происходит в сепараторе 3, жидкость стекает в мерник жижки 4, газ собирается в сборнике газа 5.

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные кинетические зависимости удельной массы твердого остатка и его температуры в центре слоя.

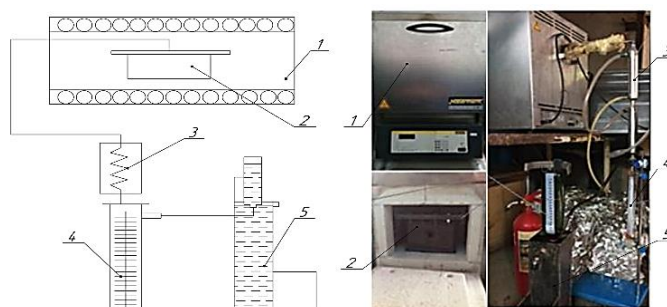


Рис. 3. Экспериментальная установка для пиролиза органических отходов

1 – муфельная печь, 2 – камера пиролиза, 3 – сепаратор, 4 – мерник жижки, 5 – сборник газа

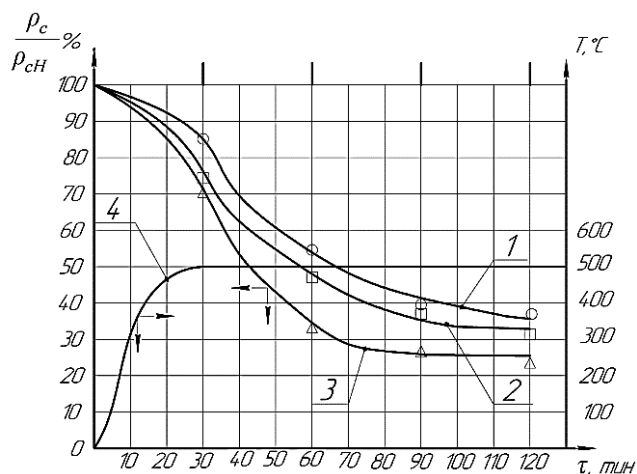


Рис. 4. Кинетические зависимости удельной массы твердого остатка и его температуры

1 – шины, 2 – лузга, 3 – щепа, 4 – кривая прогрева сырья

Кривыми показаны расчетные данные моделирования, точками - экспериментальные данные. Процесс пиролиза органических отходов проходил в муфельной печи при температуре 500 °С. Время нагрева сырья до требуемой температуры составило 30 мин. С каждым видом отходов было проведено по 4 эксперимента различающихся по времени пиролиза соответственно 30, 60, 90, 120 мин с учетом прогрева. Затем остатки взвешивались и сверялись с данными математического моделирования.

Отклонение экспериментальных данных от аналитических данных составило менее 10%, что может свидетельствовать о том, что представленная математическая модель соответствует физической картине процесса и адекватно ее отражает.

Из анализа результатов физического моделирования видно, что наибольший выход сухого остатка наблюдается у шин - 37% на 123 мин процесса, у лузги - 31% на 120 мин, хуже всех по выходу остатка показала себя щепка лиственницы - 22% на 120 мин. Изменение удельной массы щепы практически стабилизируется на 90 мин, выход дистиллята и газа, при этом, практически прекращаются. В аналитической модели для щепы кинетическая кривая массы с 93 мин до 120 мин убывает на 0,6%. Это укладывается в погрешность расчета.

Из представленных зависимостей видно, что удельная масса твердого остатка составляет, в среднем, 30%, соответственно, усредненное значение массы пиролизных газов составляет 70% от общей массы перерабатываемых твердых органических отходов.

На рис. 5 представлены кинетические зависимости выхода дистиллята, из которых можно увидеть, что удельная масса дистиллята для всех видов исследованных отходов, примерно одинакова: для щепы составляет 44%, для лузги и шин, соответственно, - 43% и 42%. Однако химический состав дистиллята будет различным. Жидкая фаза от переработанных шин будет ближе по вязкости к печному топливу и ее применение в качестве топлива допустимо. Дистиллят от пиролиза щепы и лузги необходимо сепарировать прежде чем, использовать в виде топлива, так как в них много смолистых веществ и воды.

При известной массе дистиллята и углеродистого остатка можно найти массу газа вычитанием двух вышеперечисленных удельных масс из начальной удельной массы переработанных отходов. Для нашего случая выход расчетного количества неконденсирующегося газа составил для: щепы 29%, лузги 24% и шин 23%, именно эта часть переработанных отходов станет теплоносителем для кондуктивного пиролиза органических отходов.

Полученный при пиролизе газ по калорийности приближен к природному газу. Известно, что 1 м<sup>3</sup> горючего газа выделяет энергии 32000 кДж/ч. Зная это, мы можем, по уравнению теплового баланса, определить необходимость дополнительных источников энергии для проведения процесса пиролиза.

Энергия газа тратится на прогрев отходов с 200 °С до 500 °С и поддержание этой температуры в течении определенного времени. В свою очередь время прогрева определяется размерами частицы и геометрическими параметрами камеры кондуктивного пиролиза (рис. 6).

Из приведенных расчетных зависимостей видно, что при толщине слоя более 0,2 м, скорость прогрева отходов начинает заметно падать. Размер частицы отходов также дает заметное влияние на скорость прогрева насыпного слоя. Дольше всех прогреваются опилки. Связано это с уменьшением коэффициента эффективной теплопроводности.

Опирируя данными физического и аналитического моделирования предложена конструкция пиролизной камеры, адаптированной для энергосберегающего способа пирогенетической переработки органических отходов.

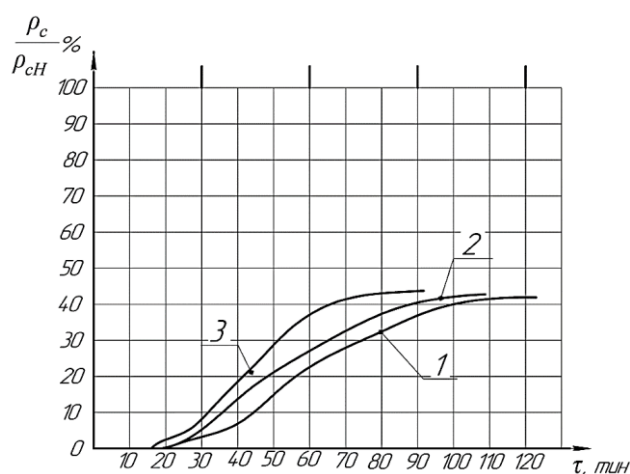


Рис. 5. Кинетические зависимости выхода пиролизного дистиллята 1-шины, 2-лузга, 3-щепка

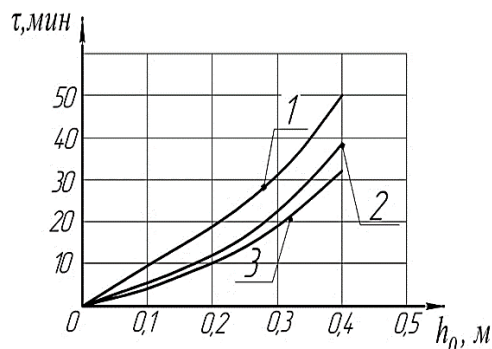


Рис. 6. Зависимость времени прогрева насыпного слоя частиц до 500 °C от толщины насыпного слоя частиц органических отходов в камере пиролиза 1 — опилки, 2 — щепа, 3 — стружка

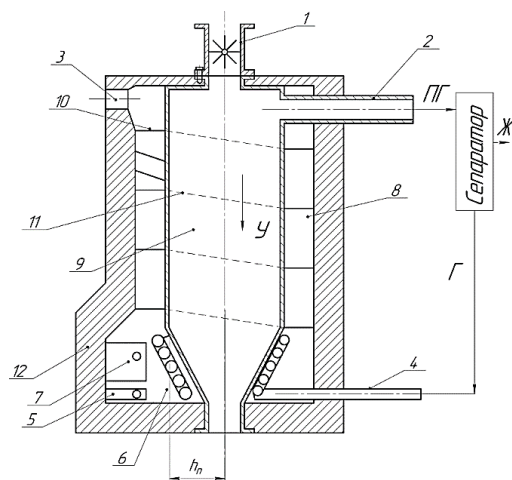


Рис. 7. Схема зоны пиролиза

1 — шлюзовый питатель; 2 — патрубок отвода пиролизных газов; 3 — патрубок отвода топочных газов; 4 — патрубок подвода горючих газов; 5 — дверца поддувки; 6 — топка пиролизной зоны; 7 — дверца топки; 8 — дымоход; 9 — камера пиролиза; 10, 11 — направляющие дымохода; 12 — теплоизоляционный корпус

Зона пиролиза представлена на рис. 7. Запуск пиролизной печи 6 осуществляется сжиганием отходов, подаваемых через дверцу топки 7. Для поддержания горения предусмотрена дверца поддувки 5. Топочные газы движутся по спиральному газоходу 8 образованному направляющими 10, 11. Дымоход огибает пиролизную камеру 9. Выход отработанных топочных газов из зоны пиролиза осуществляется через патрубок отвода топочных газов 3. Высушенные органические отходы подаются в пиролизный узел питателем 1, под действием гравитационных сил частицы отходов движутся вниз, превращаясь в уголь, с выделением пиролизных газов. Отвод пиролизных газов из зоны пиролиза происходит через патрубок 2. Отведенные пиролизные газы проходят через систему сепарации, где от них отделяется жидкая фракция. Неконденсирующиеся горючие газы из системы

сепарации подаются в рубашку камеры пиролиза через патрубок подвода горючих газов 4. Для сокращения тепловых потерь процесса пиролиза предусмотрен теплоизоляционный корпус 12. Камера пиролиза выполнена в виде прямоугольного параллелепипеда, шириной 0,4 м. При такой форме, с учетом четырехстороннего прогрева, будет затрачиваться минимальное количество энергии на прогрев и поддержание температурного режима процесса пиролиза.

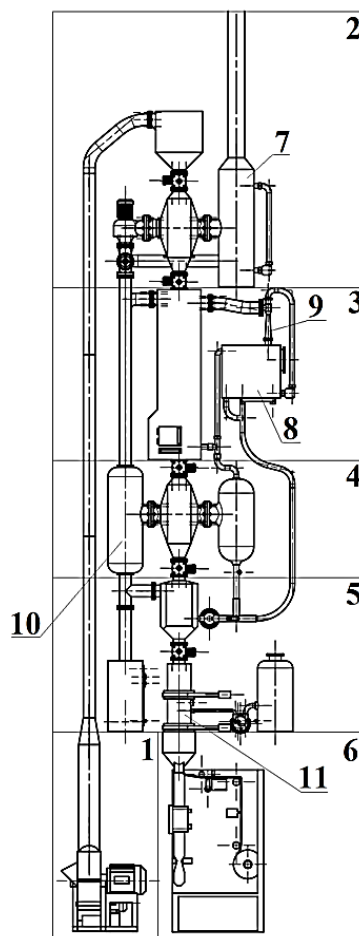


Рис. 8. Установка переработки органических отходов 1 — зона измельчения, 2 — зона сушки, 3 — зона пиролиза, 4 — зона активации, 5 — зона охлаждения, 6 — зона упаковки

Работы, зарубежных авторов по исследованию пиролиза твердых органических отходов носят узкоспециализированный характер и как правило направлены на исследование одного параметра или характеристики влияющей на процесс или оборудование для пиролиза в целом. В этих работах не предлагается новая концепция пиролизного оборудования в целом. В нашей работе на рис. 8 представлен вариант промышленной реализации

энергосберегающего способа переработки органических отходов. Установка имеет модульную конструкцию, не нуждается во внешних источниках энергии вследствие чего, высокомобильна, способна быстро разворачиваться на новых производственных участках. Вредные выбросы в атмосферу отсутствуют.

Переработка отходов в установке начинается с их измельчения в зоне 1. Отходы измельчаются до размеров 10-20 мм. Измельченные отходы поднимаются по транспортному трубопроводу в зону сушки 2. Сушка отходов происходит, топочными газами. Отработанные топочные газы очищаются в абсорбере, и выбрасываются в атмосферу. Высушенные отходы через шлюзовый питатель попадают в зону пиролиза 3 (подробная схема проиллюстрирована на рис. 7). Сконденсированный пиролизный дистиллят поступает в сборник дистиллята 8, а углеродистый остаток направляется в зону активации 4. Активация происходит перегретым паром, полученным из технологической воды. Выделившиеся газы активации попадают в конденсатор 9 и, также, как и пиролизные газы, разделяются на горючие газы и воду. Горячий адсорбент после активации попадает в зону охлаждения 5. Первая стадия охлаждения адсорбента осуществляется орошением сепарированной технологической водой. Вода, превращаясь в пар, уносится в рекуперативный теплообменник 10, затем в зону активации. Окончательно адсорбент охлаждается в вакуумной камере 11. Упаковка адсорбента происходит в зоне 6.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3(405). С. 209–216. DOI:10.47367/0021-3497\_2023\_3\_209.
2. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Зиятдинова Д.Ф. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5(395). С. 229–235. DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_5\_229.
3. Сафин Р., Сотников В., Зиятдинова Д. Экология и промышленность России. 2023. 27(11). С. 9–14. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-11-9-14.
4. Голубев Э., Суслова Е., Лебедев А. Российский химический журнал. 2023. 67(2). С. 37–44. DOI: 10.6060/rcj.2023672.4.
5. Aleksanian K.G., Valiev A.I., Sukhareva N.M., Agadzhanian S.A. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. 66(12). P. 25–31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6897.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель термохимического разложения органических отходов позволяет оценить технико-экономические показатели выхода полезных продуктов с перерабатываемых отходов и рассчитать аппаратное оформление энергосберегающего способа переработки органических отходов.

Показано, что усредненный выход продуктов разложения отходов для твердого остатка составляет 30%, высококалорийного газа – 27% и пиролизного дистиллята – 43%.

Оптимальной конструкцией камеры пиролиза, является прямоугольный параллелепипед с шириной 0,4 м.

В ходе исследований выявлено, что лучшей частицей измельчения для пирогенетической переработки считается стружка, наихудшими показателями обладают опилки.

Представленное, аппаратное оформление пирогенетического способа переработки органических отходов позволяет непрерывно перерабатывать, различные твердые отходы, со сниженным энергопотреблением за счет использования высококалорийных неконденсирующихся горючих газов. Установка обладает высокой мобильностью позволяющая быстро разворачиваться на новых производственных линиях.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00036, <https://rscf.ru/project/23-26-00036/>.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### REFERENCES

1. Safin R.G., Somikov V.G. News of higher educational institutions. Textile industry technology. 2023. N 3(405). P. 209–216. DOI:10.47367/0021-3497\_2023\_3\_209.
2. Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. News of higher educational institutions. Textile industry technology. 2021. N 5(395). P. 229–235. DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_5\_229.
3. Safin R., Sotnikov V., Ziatdinova D. Ecology and industry of Russia. 2023. 27(11). P. 9–14. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-11-9-14.
4. Golubev E., Suslova E., Lebedev A. Russian Chemical Journal. 2023. 67(2) P. 37–44. DOI: 10.6060/rcj.2023672.4.
5. Aleksanian K.G., Valiev A.I., Sukhareva N.M., Agadzhanian S.A. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. 66(12). P. 25–31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6897.

6. Колобов М., Воробьев С., Миронов Е., Куваева Е., Сахаров С., Колобова В. Российский химический журнал. (2023). 67(1). С. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9.
7. Samonin V., Podvyaznikov M., Spiridonova E., Khrylova E., Khokhlache S., Garabadzhiu A. Russian Chemical Journal. 2022. 66(3). P. 61–69. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.9.
8. Chistyakova T., Novozhilova I., Meshalkin V., Paukin O. Russian Chemical Journal. 2022. 66(3). P. 70–78. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.10.
9. Фарберова Е.А., Першин Е.А., Максимов А.С., Ходяшев Н.Б., Смирнов С.А., Кузьминых К.Г. Исследование термических свойств нефтяного кокса в процессе получения активированных углей. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 102–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6776.
10. Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Lecture Notes in Mechanical Engineering this link is disabled. 2023. P. 809–818.
11. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 07005. DOI: 10.1051/e3sconf/202342007005.
12. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 09006. DOI: 10.1051/e3sconf/202342009006.
13. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G. Russian Engineering Research this link is disabled. 2022. 42(9). P. 867–870.
14. Agraftioti E., Bouras G., Kalderis D., Diamadopoulos E. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013. V. 101. P. 72–78.
15. Liu Z., Hughes M., Tong Y., Zhou J., Kreutter W., Valtierra D., Singer S., Zitomer D., McNamara P. Renewable Energy. 2021. V. 177. P. 1–11.
16. Bridle T.R., Pritchard D. Water Science and Technology. 2004. V. 50. P. 169–175.
17. Carey D.E., McNamara P.J., Zitomer D.H. Water Environment Research. 2015. V. 87. P. 2098–2106.
18. Lewandowski W.M., Radziemska E., Rymys M., Ostrowski P. Ecological Chemistry and Engineering S. 2011. V. 18. P. 39–47.
19. Tremel A., Becherer D., Fendt S., Gaderer M., Spliethoff H. Energy Conversion and Management. 2013. V. 69. P. 95–106.
20. Umeki K., Häggström G., Bach-Oller A., Kirtania K., Furusjö E. Energy and Fuels. 2017. V. 31. P. 5104–5110.
21. Trubetskaya A., Souihi N., Umeki K. Renewable Energy. 2019. V. 141. P. 751–759.
22. Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. Bioresource Technology. 2012. V. 114. P. 542–548.
23. Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson T., Fortier C.A., Lima I.M. J. Agric. Food Chem. 2011. 59. P. 2501–2510.
24. Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X. Soil Biol. Biochem. 2009. 41. P. 210–219.
25. Chen J., Zhu D., Sun C. Environ. Sci. Technol. 2007. 41. P. 2536–2541.
26. Chen B., Zhou D., Zhu L. Environ. Sci. Technol. 2008. 42. P. 5137–5143.
27. Chen B., Chen Z., Lv S. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 716–723.
28. Chen X., Chen G., Chen L., Chen Y., Lehmann J., McBride M.B., Hay A.G. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 8877–8884.
6. Kolobov M., Vorobyov S., Mironov E., Kuvaeva E., Sakharov S., Kolobova V. Russian Chemical Journal. 2023. 67(1). P. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9.
7. Samonin V., Podvyaznikov M., Spiridonova E., Khrylova E., Khokhlache S., Garabadzhiu A. Russian Chemical Journal. 2022. 66(3). P. 61–69. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.9.
8. Chistyakova T., Novozhilova I., Meshalkin V., Paukin O. Russian Chemical Journal. 2022. 66(3). P. 70–78. DOI: 10.6060/10.6060/rcj.2022663.10.
9. Farberova E.A., Pershin E.A., Maksimov A.S., Khodyashev N.B., Smirnov S.A., Kuz'minykh K.G. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 6. P. 102–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6776.
10. Safin R.G., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F. Lecture Notes in Mechanical Engineering this link is disabled. 2023. P. 809–818.
11. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 07005. DOI: 10.1051/e3sconf/202342007005.
12. Safin R.G., Sotnikov V.G. E3S Web Conf. 2023. 420. 09006. DOI: 10.1051/e3sconf/202342009006.
13. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G. Russian Engineering Research this link is disabled. 2022. 42(9). P. 867–870.
14. Agraftioti E., Bouras G., Kalderis D., Diamadopoulos E. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013. V. 101. P. 72–78.
15. Liu Z., Hughes M., Tong Y., Zhou J., Kreutter W., Valtierra D., Singer S., Zitomer D., McNamara P. Renewable Energy. 2021. V. 177. P. 1–11.
16. Bridle T.R., Pritchard D. Water Science and Technology. 2004. V. 50. P. 169–175.
17. Carey D.E., McNamara P.J., Zitomer D.H. Water Environment Research. 2015. V. 87. P. 2098–2106.
18. Lewandowski W.M., Radziemska E., Rymys M., Ostrowski P. Ecological Chemistry and Engineering S. 2011. V. 18. P. 39–47.
19. Tremel A., Becherer D., Fendt S., Gaderer M., Spliethoff H. Energy Conversion and Management. 2013. V. 69. P. 95–106.
20. Umeki K., Häggström G., Bach-Oller A., Kirtania K., Furusjö E. Energy and Fuels. 2017. V. 31. P. 5104–5110.
21. Trubetskaya A., Souihi N., Umeki K. Renewable Energy. 2019. V. 141. P. 751–759.
22. Ozkan A., Kinney K., Katz L., Berberoglu H. Bioresource Technology. 2012. V. 114. P. 542–548.
23. Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson T., Fortier C.A., Lima I.M. J. Agric. Food Chem. 2011. 59. P. 2501–2510.
24. Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X. Soil Biol. Biochem. 2009. 41. P. 210–219.
25. Chen J., Zhu D., Sun C. Environ. Sci. Technol. 2007. 41. P. 2536–2541.
26. Chen B., Zhou D., Zhu L. Environ. Sci. Technol. 2008. 42. P. 5137–5143.
27. Chen B., Chen Z., Lv S. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 716–723.
28. Chen X., Chen G., Chen L., Chen Y., Lehmann J., McBride M.B., Hay A.G. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 8877–8884.

Поступила в редакцию (Received) 28.01.2023  
 Принята к опубликованию (Accepted) 20.09.2023