

УДК 67.05: 66.040.287

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-26-35

## Методика расчета пиролизной зоны в установке производства активированного угля

**Р. Г. Сафин**, доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

**Р. Р. Зиятдинов**, кандидат технических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

**В. Г. Сотников**, аспирант, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

**Д. Г. Рябушкин**, аспирант, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

**А. Л. Тимербаева**, кандидат технических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

*Активированный уголь можно получить разными путями. Наиболее перспективным в плане ресурсосбережения и экономической выгоды является способ получения активированного угля из органических отходов. Производство активированного угля по данному методу основано на процессе пирогенетического разложения предварительно измельченных и высушенных отходов. В результате термохимической переработки образуются активированный уголь и пиролизный газ.*

*Кондуктивный пиролиз отходов – это высокотемпературный процесс, протекающий без доступа кислорода. Температурные режимы процесса пиролиза описываются дифференциальным уравнением теплопереноса. Расчет удельных масс, образовавшихся при разложении отходов, угля и парогазовой смеси, ведется по дифференциальным уравнениям массопереноса, осложненным протекающими химическими реакциями.*

*Аппаратурное оформление процесса пиролиза представляет собой совокупность сложных конструкторских и технологических решений. При разработке оборудования, предназначенного для пиролиза измельченных отходов, необходимо проводить расчеты, связанные с оптимизацией аппаратурного оформления и режимных параметров процесса термического разложения частиц отходов, позволяющих получить качественный продукт.*

*Для энерго- и ресурсосберегающей непрерывно действующей установки производства активированного угля разработана зона пиролиза измельченных отходов. Прогрев отходов до температуры 450...550 °С осуществляется неконденсирующимися горючими газами, полученными при сепарации парогазовой смеси. Отработанные топочные газы попадают в рекуперативный теплообменник, а затем служат теплоносителем для сушки новой партии отходов.*

*Представлена методика расчета пиролизной зоны в установке производства активированного угля, а также математическая модель процесса пиролиза, по которой можно определить оптимальную высоту слоя частиц отходов и удельные массы образовавшихся угля и газов при разложении органических отходов. Разработан алгоритм расчета пиролизной зоны. Приведена зависимость температуры нагрева слоя древесных частиц в камере пиролиза, описывающая конвективный теплообмен, происходящий между насыпным слоем отходов и стенкой камеры пиролиза; по зависимости определена оптимальная ширина камеры пиролиза. Получена кинетическая зависимость удельной массы твердого остатка древесных частиц при пиролизе, характеризующая массообмен при термохимическом превращении отходов в углеродистый остаток. Эта зависимость показывает динамику изменения массы твердой фракции во времени при разложении отходов; кинетические кривые показывают скорость протекающих химических реакций при пиролизе, а также конечную удельную массу угля. Представлен расчет зоны пиролиза угля для установки производства активированного угля.*

**Ключевые слова:** активированный уголь, органические отходы, пиролиз, теплоперенос, массоперенос, пиролизный газ, ресурсосбережение.

### Введение

**В** России каждый год скапливается огромное количество органических отходов сельского хозяйства и деревообрабатывающей промышленности. Данные отходы

можно переработать, получив активированный уголь различного назначения. Потребители в лице промышленных предприятий испытывают дефицит активированного угля, который используется в качестве адсорбента. И этот дефи-

цит будет расти в связи с ужесточением экологических требований к предприятиям. Наиболее перспективным методом переработки отходов в активированный уголь является пиролиз [1–9].

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля. Установка работает по принципу кондуктивного пиролиза. Проектирование оборудования, где происходит превращение отходов в уголь, представляется сложной задачей, требующей учета множества факторов [10–20].

В связи с этим **цель исследования** – разработка инженерной методики расчета зоны пиролиза в непрерывно действующей установке производства активированного угля.

#### Методы и материалы исследования

На рисунке 1 представлена непрерывно действующая энерго- и ресурсосберегающая установка для производства активированного угля. Установка представляет собой вертикальную реторту, в которой за счет действия гравитационных сил происходит движение органических отходов из накопителя через шлюзовые питатели в зону сушки, пиролиза, активации, охлаждения с превращением их в активированный уголь. Движение парогазовой смеси происходит через системы сепарации образующихся газов, систему газоочистки и рекуперативный теплообменник [21].

Зона пиролиза представлена на рисунке 2. Запуск пиролизной печи осуществляется сжиганием отходов, подаваемых через дверцу топки. Для поддержания горения предусмотрена дверца поддувки. Топочные газы движутся по спиральному газоходу, образованному направляющими. Газоход огибает пиролизную камеру. Выход отработанных топочных газов из зоны пиролиза осуществляется через патрубок отвода топочных газов. Сушеные органические отходы подаются в пиролизный узел питателем, под действием гравитационных сил частицы отходов двигаются вниз, превращаясь в уголь с выделением пиролизных газов. Отвод пиролизных газов из зоны пиролиза происходит через патрубок отвода пиролизных газов. Отведенные пиролизные газы проходят через систему сепарации, где от них отделяется жидкая фракция. Неконденсирующиеся горючие газы из системы сепарации подаются вновь в зону пиролиза через патрубок подвода горючих газов. Для со-

кращения тепловых потерь процесса пиролиза предусмотрен теплоизоляционный корпус.

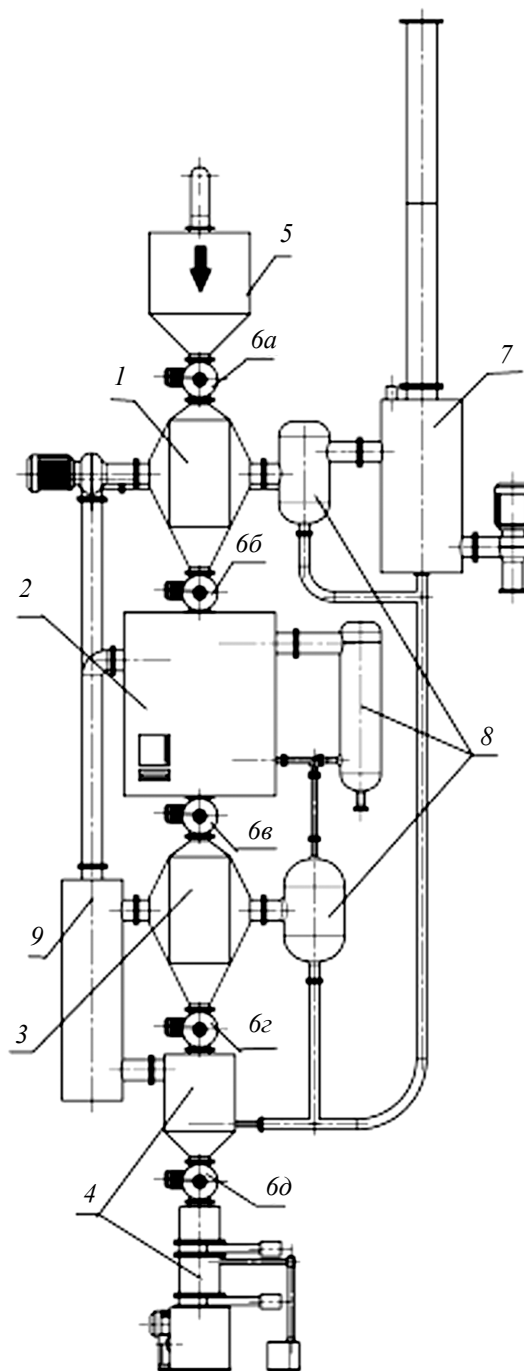


Рис. 1. Установка для производства активированного угля: 1 – зона сушки; 2 – зона пиролиза; 3 – зона активации; 4 – зона охлаждения; 5 – накопитель; 6а–6д – шлюзовые питатели; 7 – система газоочистки; 8 – системы сепарации образующихся газов; 9 – рекуперативный теплообменник

Fig. 1. Installation for the production of activated carbon: 1 - drying zone; 2 - pyrolysis zone; 3 - activation zone; 4 - cooling zone; 5 - drive; 6a-6e - sluice feeders; 7 - gas cleaning system; 8 - systems for separating the generated gases; 9 - recuperative heat exchanger

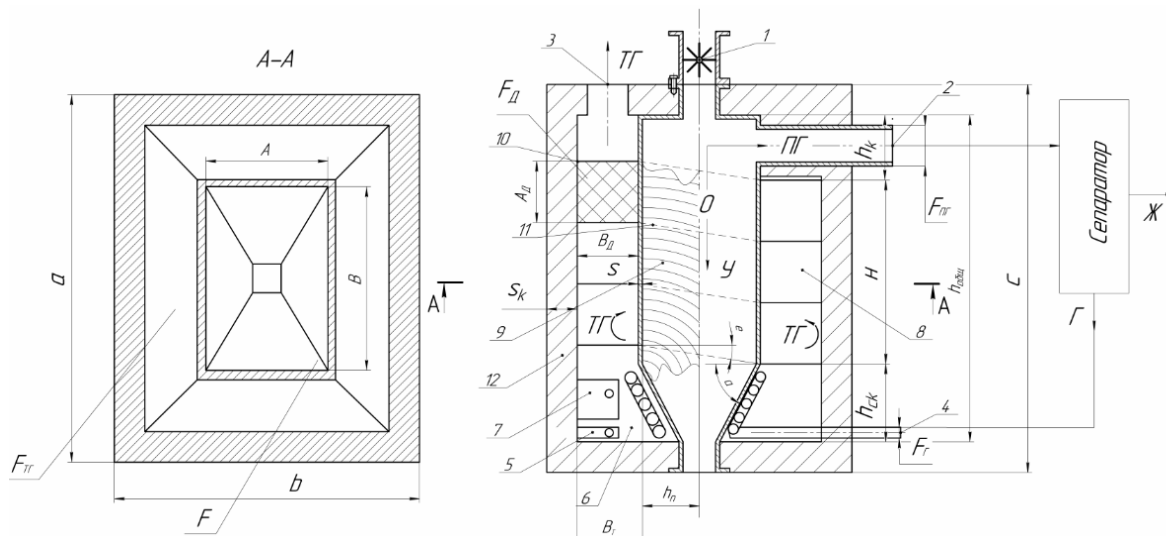


Рис. 2. Схема зоны пиролиза: 1 – шлюзовый питатель; 2 – патрубок отвода пиролизных газов; 3 – патрубок отвода топочных газов; 4 – патрубок подвода горючих газов; 5 – дверца поддувки; 6 – топка пиролизной зоны; 7 – дверца топки; 8 – газоход; 9 – камера пиролиза; 10, 11 – направляющие (образующие) дымохода; 12 – теплоизоляционный корпус

Fig. 2. Pyrolysis zone diagram: 1 - sluice feeder; 2 - branch pipe for removal of pyrolysis gases; 3 - flue gas outlet; 4 - branch pipe for supplying combustible gases; 5 - blower door; 6 - firebox of the pyrolysis zone; 7 - firebox door; 8 - gas duct; 9 - pyrolysis chamber; 10, 11 - chimney guides (generators); 12 - heat-insulating body

Исходными данными для расчета узла пиролиза являются: температура процесса пиролиза  $T_{п}$ , °С; заданная массовая производительность по сухим отходам  $B$ , кг/ч; вид отходов. В работе рассматриваются древесные отходы: щепа, опилки, стружка.

Сечение пиролизной камеры задается из априорной информации.

Перенос тепла в насыпном слое в виде бесконечной пластины, движущийся с постоянной скоростью  $W_m$ , описывается дифференциальным уравнением Фурье 2-го порядка

$$W_m \rho_{сл} c_M \frac{\partial T_{сл}}{\partial h} = \frac{\partial T_{сл}}{\partial l} \left( \lambda_{сл} \frac{\partial T_{сл}}{\partial l} \right) + q_{х.р}, \quad (1)$$

где  $h$  – текущая координата высоты насыпного слоя отходов в камере пиролиза, м;  $\rho_{пл}$  – насыпная плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $c_M$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $T_{сл}$  – температура слоя, °С;  $l$  – текущая координата расстояния от прилегающей стенки камеры пиролиза, м;  $\lambda_{сл}$  – 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;  $q_{х.р}$  – сток (приток) тепла за счет химических реакций, Дж/(м<sup>2</sup>·с), рассчитывается по выражению

$$q_{х.р} = \sum_{i=1}^n q_i (-k_i \rho_i),$$

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

Уравнение (1) получено заменой времени пиролиза частицы  $\tau_{п}$  на текущую высоту насыпного слоя; скорость движения частиц по камере пиролиза через соотношение

$$\tau_{п} = h_{п} / W_m.$$

Схема крайних условий для решения уравнения (1) представлена на рисунке 3.

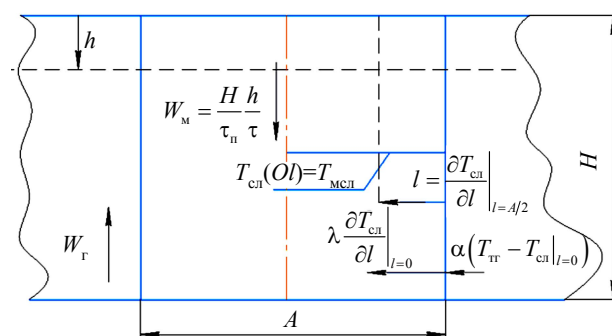


Рис. 3. Схема крайних условий уравнения Фурье

Fig. 3. Scheme of the boundary conditions for the Fourier equation

Начальная температура слоя измельченных органических отходов на входе в камеру пиролиза  $T_{сл}(0,l)$  определяется конечной температурой материала после сушки  $T_{м.с}$  соотношением

$$T_{\text{сл.м}} = T_{\text{сл}}(0,1) = T_{\text{м.с.}}$$

Температура слоя материала, соприкасающаяся с теплоподводящей поверхностью, определяется граничным условием третьего рода:

$$-\lambda_{\text{сл}} \frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \Big|_{l=0} = \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{сл}} \Big|_{l=0}),$$

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

Условие симметрии можно записать соотношением

$$\frac{\partial T_{\text{сл}}}{\partial l} \Big|_{l=\frac{A}{2}} = 0.$$

При разложении древесины образуется уголь и парогазовая смесь. Массоперенос по сечению частицы можно записать отдельно для древесины, угля и парогазовой смеси:

– для древесины

$$\frac{\partial p_{\text{др}}}{\partial \tau} = -k_{\text{др}} p_{\text{др}}; \quad (2)$$

– для угля

$$\frac{\partial p_{\text{у}}}{\partial \tau} = \varphi k_{\text{др}} p_{\text{др}}; \quad (3)$$

– для пиролизных газов

$$\frac{\partial p_{\text{п.г}}}{\partial \tau} = (1 - \varphi) k_{\text{др}} p_{\text{др}}, \quad (4)$$

где  $p$  – удельная масса компонента, кг/м<sup>3</sup> (др – древесины, у – угля, п.г – пиролизных газов);  $\varphi$  – доля угля в древесной частице,  $\varphi = m_{\text{у}}/m_{\text{др}}$ ;  $k_{\text{др}}$  – константа скорости химических реакций разложения древесины.

Начальные условия для уравнений (2)–(4) имеют вид

$$p_{\text{др}} = p_{\text{др}0}; \quad p_{\text{п.г}} = 0; \quad p_{\text{у}} = 0.$$

Объем сухих отходов,  $V_{\text{о}}$ , м<sup>3</sup>, подвергаемых пиролизу:

$$V_{\text{о}} = (B/p_{\text{сл}}) \tau_{\text{п}}. \quad (5)$$

Рабочий объем камеры пиролиза  $V_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>, равен объему сухих отходов, подвергаемых пиролизу,  $V_{\text{о}}$ , м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{п}} = V_{\text{о}}.$$

Массовая производительность по пиролизным газам  $B_{\text{п.г}}$ , кг/с, определяется соотношением

$$B_{\text{п.г}} = B - B_{\text{у}}. \quad (6)$$

Тогда объем пиролизных газов  $V_{\text{п.г}}$ , м<sup>3</sup>,

$$V_{\text{п.г}} = (B_{\text{п.г}}/\rho_{\text{п.г}}) t_{\text{п}}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{п.г}}$  – плотность пиролизных газов, кг/м<sup>3</sup>.

Размер сечения патрубка для отвода пиролизных газов  $F_{\text{п.г}}$ , м<sup>2</sup>, зависит от объема выделяемых газов при пиролизе  $V_{\text{п.г}}$  и времени пиролиза  $t_{\text{п}}$ .

После вывода пиролизных газов из камеры пиролиза через патрубок для отвода пиролизных газов  $F_{\text{п.г}}$  они попадают в сепаратор. Пиролизные газы разделяются на неконденсирующиеся газы и жидкую фракцию. Сухие газы необходимы для бесперебойной работы пиролизной зоны, следовательно, нужно знать их массовую производительность  $B_{\text{г}}$ , кг/с, которая находится по соотношению

$$B_{\text{г}} = B_{\text{п.г}} - B_{\text{ж}}, \quad (8)$$

где  $B_{\text{ж}}$  – массовая производительность по жидкой фракции при сепарации пиролизных газов, кг/с.

При недостаточной производительности по сухому газу  $B_{\text{г}}$  для достижения необходимой температуры процесса пиролиза  $T_{\text{п}}$  необходимы дополнительные источники энергии.

Сечение патрубка для подвода горючих газов  $F_{\text{г}}$  определяется мощностью печи.

Горючие газы выгорают в печи, поднимаются по газоходу, тем самым прогревают камеру пиролиза.

Зная объем и сечение камеры пиролиза, можно найти рабочую высоту пиролизной зоны  $H$ , м:

$$H = V_{\text{п}}/F. \quad (9)$$

Высота скоса пиролизной камеры  $h_{\text{ск}}$ , м, рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} h_{\text{скА}} &= A/2 \operatorname{ctg} \alpha; \\ h_{\text{скВ}} &= B/2 \operatorname{ctg} \alpha, \end{aligned} \quad (10)$$

где угол естественного скоса  $\alpha$  активированного угля определяется экспериментальным путем.

Высота коллектора  $h_{\text{к}}$ , м, выбирается исходя из размера сечения патрубка для отвода пиролизных газов  $F_{\text{п.г}}$ .

Общая высота пиролизной камеры  $h_{\text{общ}}$ , м:

$$h_{\text{общ}} = H + h_{\text{к}} + h_{\text{ск}}. \quad (11)$$

Высота дымохода  $h_{\text{д}}$ , м:

$$h_{\text{д}} = H + h_{\text{к}}. \quad (12)$$

Минимальную ширину топки  $b_T$ , м, примем половине ширины камеры пиролиза:

$$b_T = 0,5.$$

Сечение дымохода образуется направляющими, т. е. образует прямоугольник. При проектировании данного типа сечения с целью создания завихрений в прямых углах соотношение сторон следует выбирать 1,5:1. С увеличением турбулентности потока увеличится и коэффициент теплоотдачи.

Ширину сечения дымохода  $B_d$ , м, можно принять половине минимальной ширины топки  $b_T$ :

$$B_d = b_T,$$

тогда высота сечения дымохода  $A_d$ , м:

$$A_d = 3 B_d.$$

Число колец дымохода, огибающих пиролизную камеру  $n_d$ , округляется до ближайшего целого числа корректировкой высоты сечения дымохода  $A_d$ :

$$n_d = h_d / A_d. \quad (13)$$

Сечение патрубка отвода топочных газов  $F_{T.G}$ , м<sup>2</sup>, рассчитывается с учетом коэффициента создания тяги на выходе из дымохода  $k_d$  (0,8...0,9):

$$F_{T.G} = k_d F_d. \quad (14)$$

Для определения сечения загрузочного отверстия  $h$  необходимо экспериментально определить диаметр сводообразования  $D_{св}$ , м, и умножить на коэффициент, отражающий способность материала к сводообразованию  $k_{св}$ :

$$h = D_{св} k_{св}. \quad (15)$$

Производительность шлюзового питателя  $Q_{п}$ , кг/ч, рассчитывается из соотношения

$$Q_{п} = B / \rho_{сл}. \quad (16)$$

Определение толщины стенок  $s$ , м, камеры пиролиза ведется по уравнению [22]

$$s = A \sqrt{\frac{kBH}{2[\sigma]} + kc},$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $kc$  – прибавка на коррозию;  $k$  – коэффициент запаса (0,15...0,3).

Теплостенка пиролизной зоны должна удерживать энергию, выделяемую при сжигании газа внутри. Конструктивно теплостенку можно выполнить из огнеупорного кирпича.

Габаритные размеры пиролизной зоны:

– длина пиролизной зоны  $a$ , м:

$$a = B + 2s + 2B_d + 2s_k, \quad (17)$$

где  $s_k$  – толщина теплостенки пиролизной зоны, м;

– ширина пиролизной зоны  $b$ , м:

$$b = a + 2s + 2B_d + 2s_k; \quad (18)$$

– высота пиролизной зоны  $c$ , м:

$$c = h_{общ} + 2s + 2s_k. \quad (19)$$

Методику расчета пиролизной зоны можно представить в виде алгоритма, изображенного на рисунке 4.

В первом блоке алгоритма вводятся исходные данные необходимые для расчета пиролизной зоны.

Во втором блоке рассчитывается процесс пиролизного разложения древесины.

В третьем блоке рассчитываются геометрические параметры основных элементов зоны пиролиза.

В четвертом блоке рассчитываются габаритные размеры, необходимые для монтажа, и выбирается аппаратное оформление стандартных узлов.

### Результаты исследования

По разработанному алгоритму проводился расчет для древесных отходов. В качестве пиролизуемых отходов использовались: щепа толщиной 5 мм, стружка толщиной 1 мм, опилки толщиной 0,5 мм. Производительность по отходам 100 кг/ч. Температура пиролиза 500 °С.

На рисунке 5 приведена расчетная зависимость времени нагрева слоя древесных частиц до 500 °С от толщины слоя древесных частиц в камере пиролиза. Эта зависимость позволяет определить рациональные размеры пиролизной зоны для разных видов отходов.

На рисунке 6 представлена кинетическая зависимость процесса разложения отходов в древесный уголь.

Зависимости на рисунках 5, 6 позволяют рассчитать высоту камеры пиролиза и соотношение продуктов пиролиза: древесного угля и пиролизных газов. Разница в выходе угля между опилками и щепой составляет около 8 % в пользу опилок. При больших объемах производства это становится ощутимым.

По данным, полученным из зависимостей, можно рассчитать зону пиролиза с конкретными размерами. Пиролизуемые отходы щепа. Ниже приведены результаты расчета пиролизной зоны для производительности установки производства активированного угля  $B = 100$  кг/ч по сухому сырью.

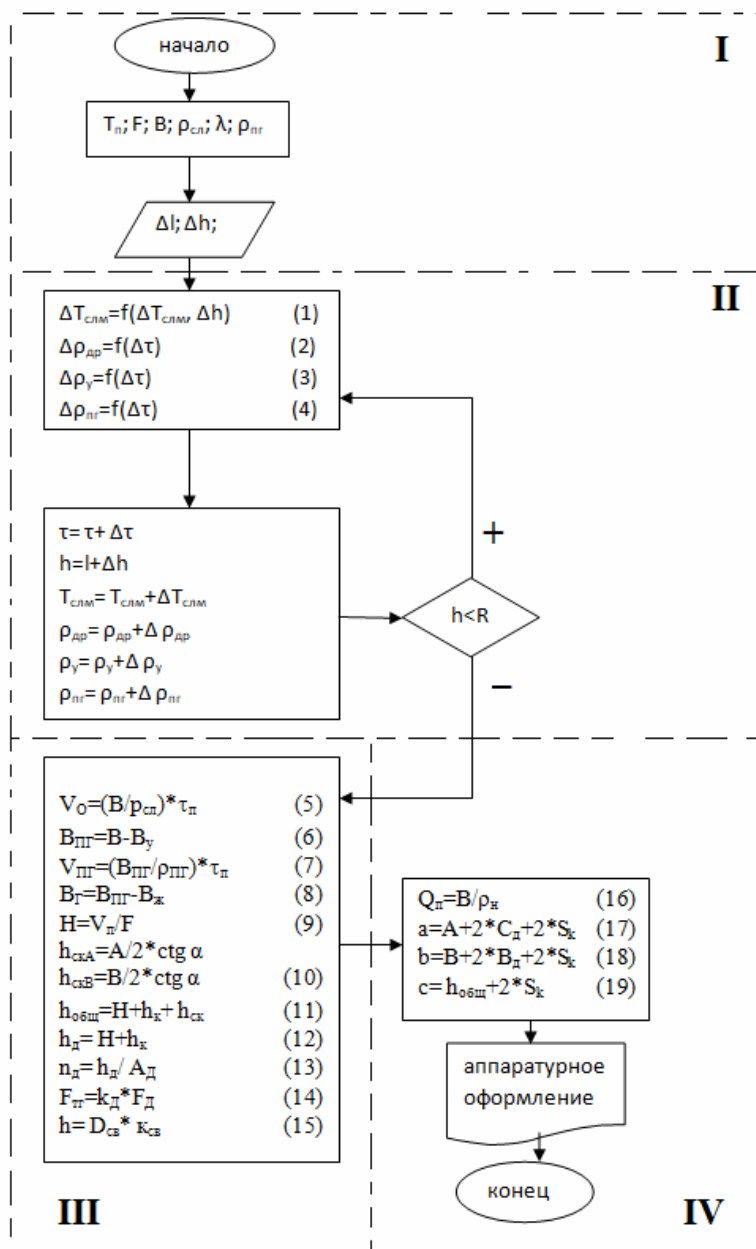


Рис. 4. Алгоритм расчета пиролизной зоны

Fig. 4. Algorithm for calculating the pyrolysis zone

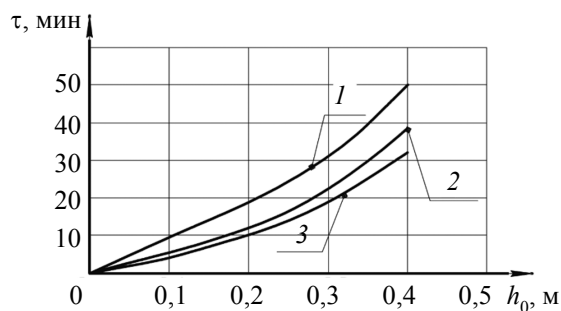


Рис. 5. Зависимость времени нагрева слоя древесных частиц до 500 °С от толщины слоя древесных частиц в камере пиролиза: 1 – щепы; 2 – стружка; 3 – опилки

Fig. 5. Dependence of the heating time of a layer of wood particles up to 500 °C on the thickness of the layer of wood particles in the pyrolysis chamber: 1 - chips; 2 - shavings; 3 - sawdust

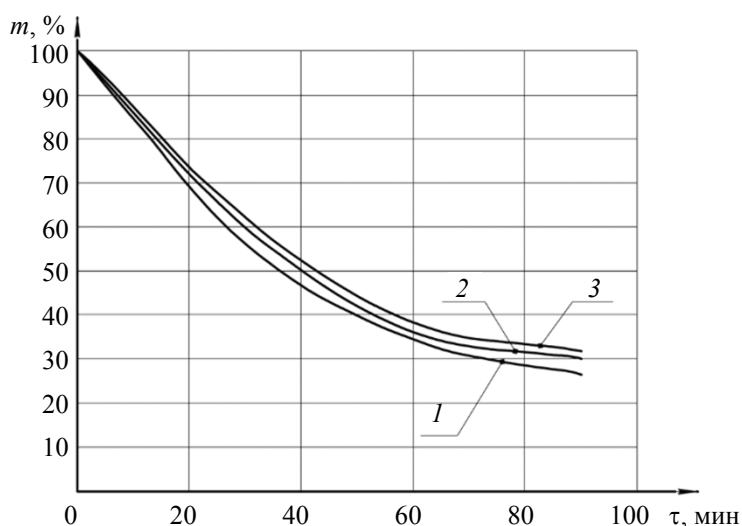


Рис. 6. Зависимость удельной массы твердого остатка древесных частиц от времени пиролиза: 1 – щепки; 2 – стружка; 3 – опилки

Fig. 6. Dependence of the specific mass of the solid residue of wood particles on the pyrolysis time: 1 - chips; 2 - shavings; 3 - sawdust

Время пиролиза тесно связано с объемом перерабатываемых отходов, поскольку камеру для пиролиза необходимо прогреть до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Проанализировав зависимость на рисунке 5, видим, что при толщине слоя более  $0,2\text{ м}$  скорость прогрева отходов начинает заметно падать. Учитывая симметричный подвод тепловой энергии со всех сторон камеры, выбираем ширину камеры пиролиза  $a = 2h_0 = 0,4\text{ м}$ . От времени пиролиза зависит выход конечного продукта и его качество: при малом времени пиролиза в углях останутся вредные примеси, и это повлияет на его адсорбционные свойства. Время переработки в камере пиролиза определяется суммированием времени прогрева отходов и пиролиза при постоянной температуре  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Время прогрева слоя отходов  $\tau_{\text{пр}}$  толщиной  $0,2\text{ м}$  до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $19\text{ мин}$ . Из зависимости на рисунке 6 видно, что при установившейся температуре процесса пиролиза убывание массы твердого остатка древесины практически прекращается на  $77\text{-й}$  минуте пиролиза. Владея этой информацией, можно задать время пиролиза, мин, которое будет суммой времени прогрева и разложения отходов:

$$\tau_{\text{п}} = \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{р}} = 77 + 19 = 96,$$

где  $\tau_{\text{р}}$  – время разложения отходов при установившейся температуре процесса пиролиза, мин.

Насыпную плотность  $\rho_{\text{сл}}$  древесной щепы примем  $250\text{ кг/м}^3$ , тогда объем пиролизуемых отходов составит  $0,68\text{ м}^3$ .

Длинную сторону и объем камеры пиролиза выбирают, ориентируясь на конструкцию всей

зоны пиролиза. При  $B = 0,8\text{ м}$  рабочая высота камеры пиролиза составит  $H = 2,15\text{ м}$ .

При угле скоса для угля  $\alpha = 40^{\circ}$  высота скоса пиролизной камеры, м, составит  $h_{\text{скА}} = 0,238$ ;  $h_{\text{скВ}} = 0,476$ .

Высота коллектора отвода пиролизных газов  $h_{\text{к}}$  определяется сечением патрубка отвода пиролизных газов  $F_{\text{п.г}}$ . Удельная масса пиролизных газов составляет  $72\%$ , т. е.  $72\text{ кг/ч}$ , их плотность,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{п.г}} = 0,68$ . Для отвода пиролизных газов со скоростью  $1\text{ м/с}$  сечение патрубка отвода пиролизных газов,  $\text{м}^2$ , составит  $F_{\text{п.г}} = 0,03$ .

Температура стенок пиролизной камеры  $s = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , материал – сталь 15Х5М-У с допускаемым напряжением  $108\text{ МПа}$ , прибавка на коррозию –  $0,1\text{ мм}$ .

Для угля полученного в результате разложения щепы диаметр сводообразования  $D_{\text{св}}$  составил  $0,18\text{ м}$ .

Теплоизоляционный корпус из огнеупорного кирпича шириной  $0,15\text{ м}$ .

Ниже приведены расчетные параметры отдельных элементов пиролизной камеры:

- диаметр патрубка отвода пиролизных газов  $D_{\text{п.г}} = 0,2\text{ м}$ ;
- высота коллектора отвода пиролизных газов  $h_{\text{к}} = 0,25\text{ м}$ ;
- высота пиролизной камеры  $h_{\text{общ}} = 2,6\text{ м}$ ;
- высота дымохода  $h_{\text{д}} = 2,35\text{ м}$ ;
- ширина топки  $b_{\text{т}} = 0,2\text{ м}$ ;
- ширина сечения дымохода  $B_{\text{д}} = 0,1\text{ м}$ ;
- высота сечения дымохода  $A_{\text{д}} = 0,35\text{ м}$ ;
- число колец дымохода, огибающих пиролизную камеру,  $n_{\text{д}} = 8$ ;

- сечение дымохода  $F_d = 0,035 \text{ м}^2$ ;
- сечение патрубка отвода топочных газов  $F_{Т.Г} = 0,028 \text{ м}^2$ ;
- диаметр патрубка отвода топочных газов  $D_{Т.Г} = 0,18 \text{ м}$ ;
- диаметр загрузочного отверстия  $h = 0,2 \text{ м}$ ;

- производительность шлюзового питателя  $Q = 0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- толщины стенок пиролизной камеры  $s = 0,005 \text{ м}$ ;
- габариты пиролизной зоны  $a, b, c = 1,3 \times 0,9 \times 2,9 \text{ м}$ .

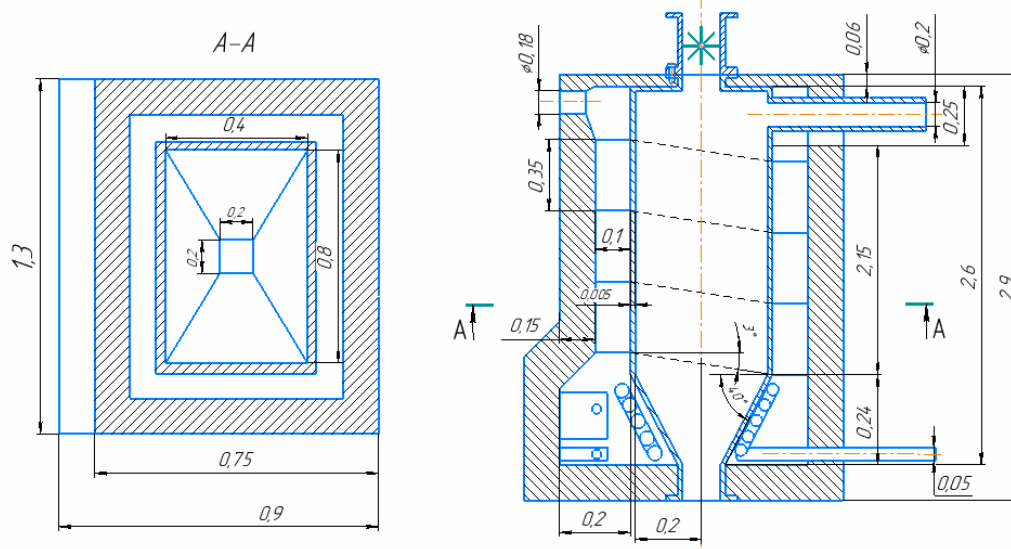


Рис. 7. Зона пиролиза с расчетными параметрами

Fig. 7. Pyrolysis zone with design parameters

### Заключение

Разработанная методика расчета решает задачу конструктивного исполнения пиролизной зоны для установки производства активированного угля. Данная методика позволяет рассчитать конструктивные размеры промышленной установки.

Анализ зависимостей показал, что вид пиролизуемых отходов является важным фактором, влияющим на выход конечного продукта; вид отходов также оказывает сильное влияние при расчете режимов процесса пиролиза.

Методика расчета зоны пиролиза может быть использована при проектировании аппаратов различной производительности. В качестве перерабатываемого сырья могут использоваться измельченные отходы сельского хозяйства, деревопереработки, а также измельченные отработанные шины.

Получаемый уголь в установке производства активированного угля используется в качестве промышленного адсорбента.

### Библиографические ссылки

1. Место активных углей в экологии и экономике, новые технологии их производства / В. М. Мухин, А. А. Курилкин, Н. Л. Воропаева, К. В. Лексюкова,

П. В. Учанов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 3. С. 346–353.

2. Zhang W. Biowaste derived porous carbon sponge for high performance supercapacitors. *J. of Materials Science and Technology*, 2020, 55, pp. 105-113. DOI: 10.1007/s10853-019-04343-5.

3. Rocha L. S. Sustainable and recoverable waste-based magnetic nanocomposites used for the removal of pharmaceuticals from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 129974, 2021, 426, pp. 115-127. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129974.

4. Mo L. Visible-light excitable thermally activated delayed fluorescence in aqueous solution from F, N-doped carbon dots confined in silica nanoparticle. *Chemical Engineering J.*, 2021, 426, pp. 256-268.

5. Zhang B., Petcher S., Gao H. Magnetic sulfur-doped carbons for mercury adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 603, pp. 728-737. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.06.129.

6. Woo H. C., Jung S. H. Adsorptive removal of nitro- or sulfonate-containing dyes by a functional metal-organic framework. *Quantitative contribution of hydrogen bonding: Chemical Engineering J.*, 2021, 425, pp. 728-737.

7. Nizam N. U. M., Hanafiah M. M., Mahmoudi E., Halim A. A., Mohammad A. W. The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. *Scientific Reports*, 2021, 11, pp. 205-220. DOI: org/10.1038/s41598-021-88084-z.

8. Filho A. V. Optimization of cationic dye removal using a high surface area-activated carbon from water



treatment sludge. *Bulletin of Materials Science*, 2021, 44, pp. 41. DOI: org/10.1007/s12034-020-02333-x.

9. Manigomba J. A. Prospects for biomass energy use in the republic of Burundi. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2019, 10, I. pp. 1371-1382.

10. Antal M. J. Biomass pyrolysis: a review of the literature. Part I. Carbohydrate pyrolysis. *In solar Energy*, 2021, 1983, pp. 61-111. doi.org/10.1007/978-1-4684-8992-7\_3.

11. Mettler M. S., Vlachos D. G., Dauenhauer P. J. Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels. *Energy Environ Sci.*, 2021, 2012, pp. 797-809.

12. Sadrtidinov A. R. Modeling of thermal treatment of wood waste in the gasifiers. *Automation and Control Systems: Proc. of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, MEACS 2015*, 2015, 7414914.

13. Cybulak M. The influence of biochar on the content of carbon and the chemical transformations of fallow and grassland humic acids. *Scientific Reports*, 2021, 11, pp. 56-98.

14. Sun Y. Pyrolysis of flaxseed residue: Exploration of characteristics of the biochar and bio-oil products. *J. of the Energy Institute*, 2021, 87, pp. 1-12.

15. Li J. Pyrolysis characteristics and non-isothermal kinetics of waste wood biomass. *Energy*, 2021, vol. 226, 120358. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120358.

16. Chen Z. The fast co-pyrolysis study of PVC and biomass for disposing of solid wastes and resource utilization in N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 150, pp. 486-489.

17. Suriapparao D. V., Vinu R. Biomass waste conversion into value-added products via microwave-assisted Co-Pyrolysis platform. *Renewable Energy*, 2021, vol. 170, pp. 400-409.

18. Sobek S., Werle S. Solar pyrolysis of waste biomass: A comparative study of products distribution, in situ heating behavior, and application of model-free kinetic predictions. *Renewable Energy*, 2019, vol. 143, pp. 1939-1948.

19. Paulauskas R., Zakarauskas K., Striūgas N. An intensification of biomass and waste char gasification in a gasifier. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 1983.

20. Fernandes B. C. C. Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. *Materials*, 2020, vol. 3, pp. 1-13.

21. Патент РФ № 2694347, 11.07.2019. МПК С 10 В 53/00. Способ получения активированного угля / Сафин Р. Г. [и др.].

22. Лащинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. М. : Машиностроение, 1970. 752 с.

## References

1. Mukhin V.M., Kurilkin A.A., Voropaeva N.L., Leksyukova K.V., Uchanov P.V. [The Place of Active Coals in Ecology and Economics, New Technologies of their Production]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 346-353 (in Russ.).

2. Zhang W. Biowaste derived porous carbon sponge for high performance supercapacitors. *J. of Materials Science and Technology*, 2020, 55, pp. 105-113. DOI: 10.1007/s10853-019-04343-5.

3. Rocha L.S. Sustainable and recoverable waste-based magnetic nanocomposites used for the removal of pharmaceuticals from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 129974, 2021, 426, pp. 115-127. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129974.

4. Mo L. Visible-light excitable thermally activated delayed fluorescence in aqueous solution from F, N-doped carbon dots confined in silica nanoparticle. *Chemical Engineering J.*, 2021, 426, pp. 256-268.

5. Zhang B., Petcher S., Gao H. Magnetic sulfur-doped carbons for mercury adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 603, pp. 728-737. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.06.129.

6. Woo H.C., Jung S.H. Adsorptive removal of nitro- or sulfonate-containing dyes by a functional metal-organic framework. *Quantitative contribution of hydrogen bonding: Chemical Engineering J.*, 2021, 425, pp. 728-737.

7. Nizam N.U.M., Hanafiah M.M., Mahmoudi E., Halim A.A., Mohammad A.W. The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. *Scientific Reports*, 2021, 11, pp. 205-220. DOI: org/10.1038/s41598-021-88084-z.

8. Filho A.V. Optimization of cationic dye removal using a high surface area-activated carbon from water treatment sludge. *Bulletin of Materials Science*, 2021, 44, pp. 41. DOI: org/10.1007/s12034-020-02333-x.

9. Manigomba J.A. Prospects for biomass energy use in the republic of Burundi. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2019, 10, I. pp. 1371-1382.

10. Antal M.J. Biomass pyrolysis: a review of the literature. Part I. Carbohydrate pyrolysis. *In solar Energy*, 2021, 1983, pp. 61-111. doi.org/10.1007/978-1-4684-8992-7\_3.

11. Mettler M.S., Vlachos D.G., Dauenhauer P.J. Top ten fundamental challenges of biomass pyrolysis for biofuels. *Energy Environ Sci.*, 2021, 2012, pp. 797-809.

12. Sadrtidinov A.R. Modeling of thermal treatment of wood waste in the gasifiers. *Automation and Control Systems: Proc. of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, MEACS 2015*, 2015, 7414914.

13. Cybulak M. The influence of biochar on the content of carbon and the chemical transformations of fallow and grassland humic acids. *Scientific Reports*, 2021, 11, pp. 56-98.

14. Sun Y. Pyrolysis of flaxseed residue: Exploration of characteristics of the biochar and bio-oil products. *J. of the Energy Institute*, 2021, 87, pp. 1-12.

15. Li J. Pyrolysis characteristics and non-isothermal kinetics of waste wood biomass. *Energy*, 2021, vol. 226, 120358. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120358.

16. Chen Z. The fast co-pyrolysis study of PVC and biomass for disposing of solid wastes and resource utilization in N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 150, pp. 486-489.

17. Suriapparao D.V., Vinu R. Biomass waste conversion into value-added products via microwave-assisted Co-Pyrolysis platform. *Renewable Energy*, 2021, vol. 170, pp. 400-409.

18. Sobek S., Werle S. Solar pyrolysis of waste biomass: A comparative study of products distribution, in situ heating behavior, and application of model-free kinetic predictions. *Renewable Energy*, 2019, vol. 143, pp. 1939-1948.

19. Paulauskas R., Zakarauskas K., Striūgas N. An intensification of biomass and waste char gasification in a gasifier. *Energies*, 2021, vol. 14, pp. 1983.

20. Fernandes B.C.C. Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. *Materials*, 2020, vol. 3, pp. 1-13.

21. Safin R.G. [et.al.]. RF patent no. 2694347, 11.07.2019 IPC S 10 B 53/00. Method for producing activated carbon (in Russ.).

22. Lashchinsky A.A., Tolchinsky A.R. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoi apparatury* [Fundamentals of design and calculation of chemical equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 752 p. (in Russ.).

### Calculation of Pyrolysis Zone in Installation of Activated Carbon Production

R.G. Safin, DSc in Engineering, Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

R.R. Ziatdinov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

V.G. Sotnikov, Post-graduate, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

D.G. Ryabushkin, Post-graduate, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

A.L. Timerbaeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

*Activated carbon can be obtained in a variety of ways. The most promising in terms of resource conservation and economic benefits is the method of producing activated carbon from organic waste. The production of activated carbon by this method is based on the process of pyrogenetic decomposition of pre-crushed and dried waste. As a result of thermochemical processing, activated carbon and pyrolysis gas are formed.*

*Conductive waste pyrolysis is a high-temperature process that runs without oxygen. The temperature regimes of the pyrolysis process are described by the differential heat transfer equation. The calculation of the specific masses of the waste, coal and steam-gas mixture formed during the decomposition is carried out according to the differential equations of mass transfer by complicated ongoing chemical reactions.*

*The hardware design of the pyrolysis process is a set of complex design and technological solutions. When developing equipment designed for the pyrolysis of crushed waste, it is necessary to carry out calculations related to the optimization of the hardware design and operating parameters of the process of thermal decomposition of waste particles, which make it possible to obtain a high-quality product.*

*A pyrolysis zone of crushed waste has been developed for an energy- and resource-saving continuously operating unit for the production of activated carbon. Heating of waste to a temperature of 450-550 °C is carried out by non-condensing combustible gases obtained during the separation of the steam-gas mixture. Waste flue gases enter a recuperative heat exchanger, and then serve as a heat carrier for drying a new batch of waste.*

*The paper describes a method for calculating the pyrolysis zone in an activated carbon production unit. A mathematical model of the pyrolysis process is presented, by which it is possible to determine the optimal height of the layer of waste particles and the specific mass of the formed coal and gases during the decomposition of organic waste. An algorithm for calculating the pyrolysis zone has been developed. The following characteristics are shown: the dependence of the heating temperature of the layer of wood particles in the pyrolysis chamber on the layer thickness and the kinetic dependence of the specific mass of the solid residue of wood particles during pyrolysis. The calculation of the coal pyrolysis zone for the activated carbon production unit is presented.*

**Keywords:** activated carbon, organic waste, pyrolysis, heat transfer, mass transfer, pyrolysis gas, resource conservation.

Получено 30.07.2021

#### Образец цитирования

Методика расчета пиролизной зоны в установке производства активированного угля / Р. Г. Сафин, Р. Р. Зиятдинов, В. Г. Сотников, Д. Г. Рябушкин, А. Л. Тимербаева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 3. С. 26–35. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-26-35.

#### For Citation

Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G., Timerbaeva A.L. [Calculation of Pyrolysis Zone in Installation of Activated Carbon Production]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 26-35 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-26-35.