

## Моделирование процесса сушки древесных отходов в установке производства активированного угля

Р.Г. Сафин<sup>a</sup>, Р.Р. Зиятдинов<sup>b</sup>, В.Г. Сотников<sup>c</sup>, Д.Г. Рябушкин<sup>d</sup>, Д.А. Ахметова<sup>e</sup>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
ул. К. Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>a</sup> safin@mail.ru, <sup>b</sup> radis226@rambler.ru, <sup>c</sup> vcvcvc12345678@gmail.com, <sup>d</sup> tabalcao@yandex.ru, <sup>e</sup> pdm\_d@list.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>

Статья поступила 31.08.2021, принята 25.10.2021

*На сегодняшний день вопрос переработки органических отходов очень актуален. Из ненужного сырья можно производить полезные в хозяйстве продукты, например, активированный уголь, который получают в результате пиролиза. Перед процессом пиролиза необходимо удалить из отходов всю влагу. Для энерго- и ресурсосберегающей непрерывно действующей установки по производству активированного угля разработана зона конвективной сушки, в которой сушильным агентом являются топочные газы, получаемые при пиролизе органических отходов. Представлена инженерная методика расчета камеры сушки шахтного типа, применяемой для измельченных органических отходов, таких как щепка, стружка, опилки, скорлупа грецкого ореха, лузга подсолнечника, отбракованные автомобильные покрышки, косточки различных плодово-ягодных продуктов. Представлена математическая модель процесса сушки, по которой определяется продолжительность сушки. По заданной производительности конечного продукта рассчитаны количественные характеристики топочного газа и измельченного сырья, определены конструктивные размеры камеры сушки, даны расчеты и рекомендации по выбору аппаратного оформления зоны сушки непрерывно действующей установки по производству активированного угля. Представлена блок-схема расчета шахтной сушильной камеры. Получено распределение влагосодержания по сечению отдельной щепки в различных временных слоях. Приведены расчетные зависимости объема камеры сушки от влагосодержания и типа высушиваемых отходов, а также зависимость сечения патрубка подвода теплоносителя от начального влагосодержания и типа отходов. Анализ результатов моделирования показал, что на объем сушильной камеры и сечение коробов значительное влияние оказывает вид высушиваемого материала.*

**Ключевые слова:** активированный уголь; органические отходы; влагосодержание; теплоноситель; конвективная сушка; шахтная сушилка.

## Modeling of the drying process of wood waste in an activated coal production unit

R.G. Safin<sup>a</sup>, R.R. Ziatdinov<sup>b</sup>, V.G. Sotnikov<sup>c</sup>, D.G. Ryabushkin<sup>d</sup>, D.A. Akhmetova<sup>e</sup>

Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marx St., Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>a</sup> safin@mail.ru, <sup>b</sup> radis226@rambler.ru, <sup>c</sup> vcvcvc12345678@gmail.com, <sup>d</sup> tabalcao@yandex.ru, <sup>e</sup> pdm\_d@list.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>

Received 31.08.2021, accepted 25.10.2021

*Today, the issue of processing organic waste is extremely relevant. Useful products can be obtained from unnecessary raw materials, for example, activated carbon obtained as a result of pyrolysis. All moisture must be removed from the waste before the process. For the energy- and resource-saving continuously operating unit for the production of activated carbon, a convective drying zone has been developed, in which the drying agent is the flue gases obtained during the pyrolysis of organic waste. An engineering methodology for calculating a mine-type drying unit is presented. The unit is used for crushed organic waste such as wood chips, shavings, sawdust, walnut shells, sunflower husks, rejected car tires, braids of various fruit and berry and vegetable products. A mathematical model of the drying rate of an infinite plate is presented, according to which the drying time is determined. For a given productivity of the final product, the quantitative characteristics of gas, moisture, and waste particles are calculated. The design dimensions of the drying unit have been determined. Calculations and recommendations are given on the choice of hardware design for the drying zone of a continuously operating unit for the production of activated carbon. The block diagram of the calculation of the mine drying chamber is presented. The distribution of moisture content over the cross-section of a chip particle in different time layers is obtained. The calculated dependence of the volume of the drying unit on the moisture content and the type of waste to be dried is given. When analyzing, it was found that the type of waste has a strong effect on the volume of the drying unit. The calculated dependences of the size of the drying unit from moisture content and the type of dried waste, as well as the dependence of the section of the pipe supply of the coolant from the initial moisture content and the type of waste are given. From these dependences, it is clear that both, the moisture content and the type of particles of the dried waste, have a strong effect on the cross-section of the coolant supply duct.*

**Keywords:** activated carbon; organic waste; moisture content; coolant; convective drying unit; shaft drying unit.

**Введение.** Благодаря своим адсорбционным свойствам активированный уголь сегодня крайне востребованный продукт. Его промышленное потребление растет с каждым годом. В качестве сырья в производстве активированного угля используются материалы органического происхождения — древесина, каменный и битумный уголь, различные органические отходы, такие как скорлупа грецкого ореха, древесные отходы — стружка, опилки, щепа, а также изношенные шины и др. На производство активированного угля из отходов приходится менее 10 % от общего объема, в остальном используются невозобновляемые ресурсы, что негативно сказывается на экологии [1–4].

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [5–10]. В основу был положен разработанный и запатентованный способ переработки древесных отходов в активированный уголь [11; 12]. Начальной стадией термохимической переработки органических отходов в активированный уголь является сушка. Сырьем для сушки являются измельченные отходы деревообрабатывающей, химической и пищевой промышленности. Сушка этих материалов связана с высокой энергоемкостью и длительностью процесса [13; 14]. Качество переработанного сырья определяется его конечным влажностным содержанием, что открывает возможность применения высокотемпературных режимов сушки.

Для непрерывно действующей установки производства активированного угля наиболее выгодным будет способ конвективной сушки отработанными топочными газами, образующимися при сжигании пиролизных отходов и газов активации.

В связи с этим в работе поставлена задача разработки инженерной методики расчета камеры конвективной сушки измельченных органических отходов и моделирования процесса.

**Материалы и методы исследования.** Непрерывно действующая энерго- и ресурсосберегающая установка для производства активированного угля (рис. 1) состоит из вертикальной реторты, в которой за счет действия гравитационных сил происходит движение органических отходов из накопителя 8 через шлюзовые питатели 9 а–д в зоны сушки 1, пиролиза 2, активации 3, охлаждения 4 с превращением их в активированный уголь, системы сепарации образующихся газов 13, системы газоочистки 12, рекуперативного теплообменника 14 [11].

Зона конвективной сушки представлена на рис. 2. Измельченные отходы с начальной температурой  $T_{m0}$  и начальным влажностным содержанием  $U_0$  через транспортный трубопровод 1 поступают в накопитель 2. Затем через барабанный питатель 3 а непрерывно поступают в сушильную камеру шахтного типа, где отходы подвергаются прогреву сушильным агентом при температуре 250 °С. Сушильным агентом является топочный газ, который поступает в сушильную камеру через коллектор подвода 4. Равномерное омывание измельченных

отходов топочным газом происходит благодаря расположенным в шахматном порядке коробам подвода 5 и отвода 7 теплоносителя. Отработанный сушильный агент выводится через коллектор 6. Высушенные отходы через барабанный питатель 3 б попадают в зону пиролиза.

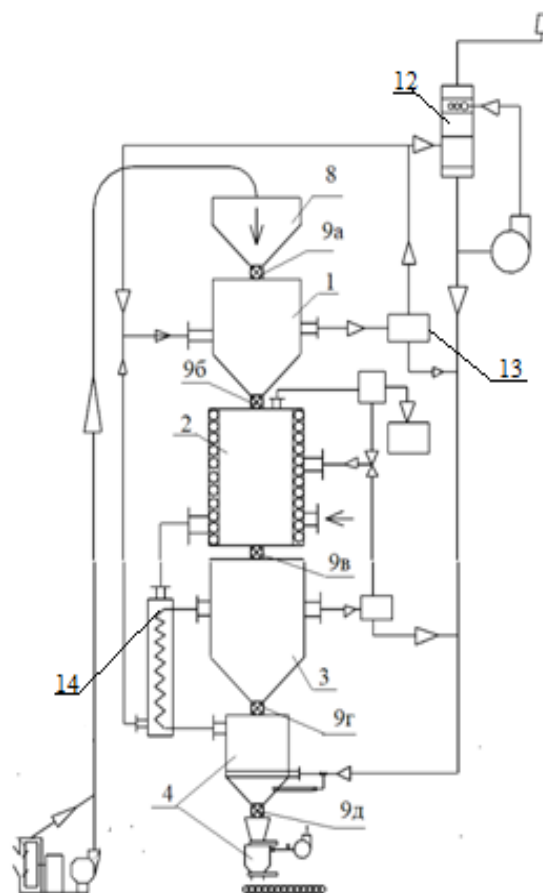


Рис. 1. Установка для производства активированного угля

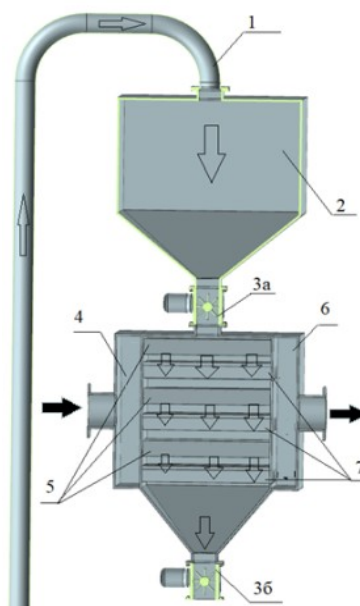


Рис. 2. Зона конвекционной сушки дисперсных материалов

Для расчета сушильной камеры используются следующие исходные данные: заданная производительность установки по сухому продукту  $B$ ,  $m^3/ч$ , начальное влагосодержание отходов  $U_0$ , %, начальная температура отходов  $T_0$ ,  $^{\circ}C$ , температура сушильного агента на входе  $T_c$ ,  $^{\circ}C$ , начальное влагосодержание сушильного агента  $X_{г0}$ .

Короба шахтных сушильных камер (рис. 3) имеют конструкцию разной сложности, но все они имеют тре-

угольный профиль, который крепится к стенкам сушильной камеры. Короба служат для подвода и отвода агента сушки в сушильной камере. Расстояния между коробами  $h1$  выбираются больше диаметра загрузочного отверстия камеры сушки  $h$  для предотвращения образования свода.

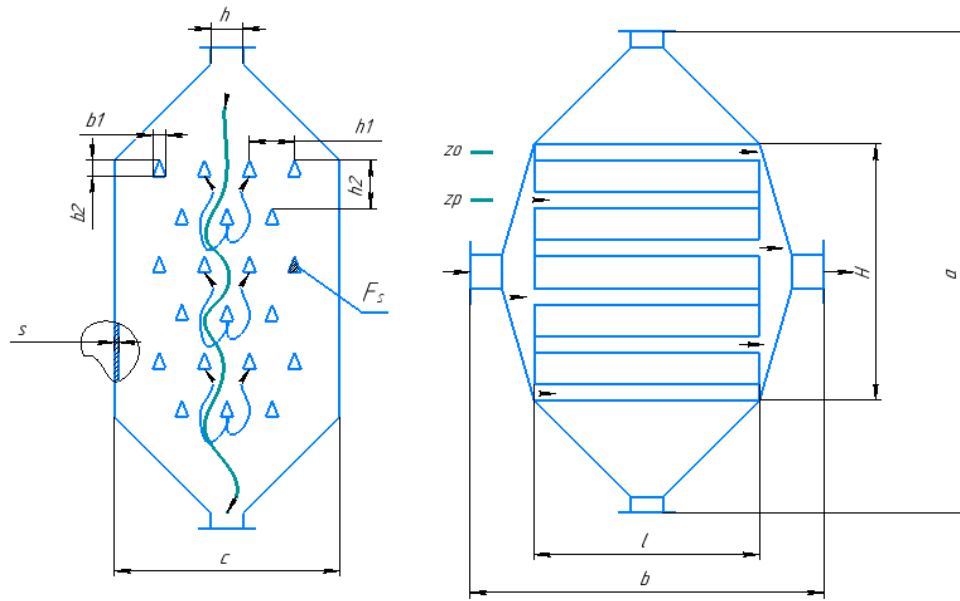


Рис. 3. Схема расположения коробов отвода и подвода теплоносителя

Перед определением конструктивных размеров камеры сушки необходимо задать параметры процесса сушки, тип дисперсных частиц, подвергаемых сушке.

Выбранное конструктивное оформление зоны сушки позволяет применить модель идеального смешения и рассмотреть процесс сушки слоя сушкой одной частицы, применив дифференциальное уравнение тепло-массопереноса А.В. Лыкова, которое записано для бесконечной пластины [15]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\varepsilon}{c_m} * \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (2)$$

Схема краевых условий для решения системы уравнений (1), (2) приведена на рис. 4.

Начальные условия для решения уравнений (1), (2) имеют вид:

$$U(x,0) = U_0, \quad (3)$$

$$T(x,0) = T_0. \quad (4)$$

Для оценки температуры на поверхности частиц древесных отходов задаем граничное условие 3-го рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha(T_I - T_{II}) \quad (5)$$

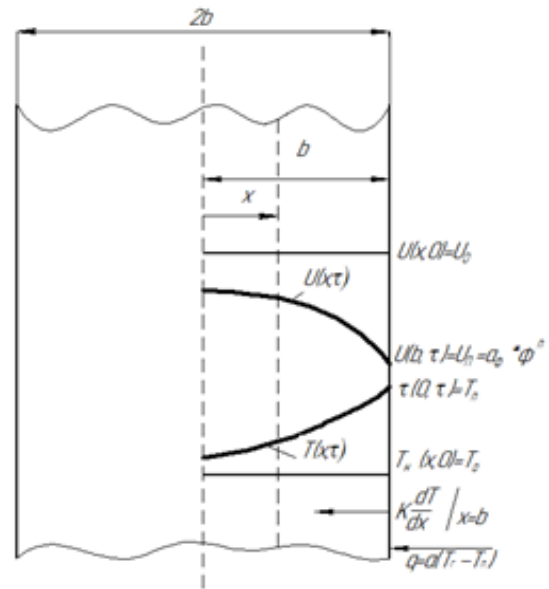


Рис. 4. Схема краевых условий сушки симметричной пластины

Примем, что влагосодержание на поверхности частиц определяется влагосодержанием топочного газа  $\varphi$  в соответствии с уравнением Фрейдлиха [15]:

$$U(b,\tau) = a_\varphi * \varphi^n. \quad (6)$$

Конструктивный расчет сушильной зоны начинают с определения ее производительности  $B_0$ , кг/с:

$$B_0 = B(1 + U_0), \quad (7)$$

где  $U_0$  — начальное влагосодержание частиц, кг/кг;  $B$  — заданная производительность установки по сухому продукту, кг/с.

Масса высушиваемого материала  $m_n$ , кг:

$$m_n = B_0 * \tau_c, \quad (8)$$

где  $\tau_c$  — время сушки, с, определяется решением системы уравнений тепломассопереноса (1), (2).

Объем отходов, подаваемых на сушку  $V_n$ , м<sup>3</sup>:

$$V_n = \frac{m_n}{\rho_n}, \quad (9)$$

где  $\rho_n$  — насыпная плотность частиц отходов подаваемых на сушку [м<sup>3</sup>/кг]

Массовая производительность шахтной сушилки по испаренной влаге  $B_x$ , кг/с:

$$B_x = B_0 * [(U_0 - U_k) / (100 - U_k)]. \quad (10)$$

Массовая производительность шахтной сушилки по сушильному агенту  $B_{тг}$ , кг/с:

$$B_{тг} = B_x / (X_k - X_0), \quad (11)$$

где  $X$  — влагосодержание топочного газа, кг/кг.

Объемная производительность шахтной установки по сушильному агенту  $B_{тгV}$ , м<sup>3</sup>/с:

$$B_{тгV} = \frac{B_{тг}}{\rho_{m2}}, \quad (12)$$

где  $\rho_{m2}$  — плотность теплоносителя [м<sup>3</sup>/кг]

Скорость теплоносителя  $w_{тг}$  должна быть меньше скорости витания частиц  $w_B$ , м/с. Для частиц толщиной 0,4 мм и более можно пользоваться при определении скорости витания формулой С.Н. Святкова [16]:

$$w_B = 0.14 \sqrt{\frac{\rho_n}{(0.02 + \frac{\phi}{100}) * \rho_{m2}}}, \quad (13)$$

где  $h$  — толщина частицы, м;  $\phi$  — коэффициент формы частицы, определен как 1.1 [16].

Скорость движения топочных газов находится по формуле:

$$w_{тг} = k_w * w_B, \quad (14)$$

где  $k_w$  — коэффициент скорости газа (0.8–0.9).

Определение диаметра загрузочного отверстия  $h$ , м, камеры сушки заключается в экспериментальном нахождении диаметра сводообразования  $D_{св}$ , м, с учетом коэффициента, отражающего способность материала к сводообразованию  $\kappa_{св}$  (1.1–1.3):

$$h = D_{св} * \kappa_{св}. \quad (15)$$

Для сушильного аппарата шахтного типа определяется живое сечение всех коробов  $\sum Fc$ , м<sup>2</sup>, по которым подводится и отводится теплоноситель:

$$\sum Fc = (B_{тгV}) / w_{тг}. \quad (16)$$

Короб теплоносителя имеет треугольную форму. Его высота  $b_2$ , м, определяется по формуле:

$$b_2 = 1/2 b_1 * \text{ctg} \alpha, \quad (17)$$

где  $b_1$  — заданная ширина короба теплоносителя, м;  $\alpha$  — угол естественного откоса короба, [°], определяется экспериментально.

Сечение короба теплоносителя  $Fc$ , м<sup>2</sup>, определяется соотношением:

$$Fc = 1/2 b_1 * b_2 = 1/2 b_1^2 * \text{ctg} \alpha. \quad (18)$$

Число подводящих коробов  $n$  определяется как:

$$n = \sum Fc / Fc. \quad (19)$$

Для равномерного распределения топочного газа по камере сушки сумма живых сечений коробов подвода теплоносителя  $\sum Fc$  должны быть меньше сечения патрубка подвода теплоносителя  $F$  [м<sup>2</sup>], т. е. должно выполняться условие.

$$F = \sum_i^n Fc * k_n, \quad (20)$$

где  $k_n$  — коэффициент избыточного давления в коробе подвода теплоносителя (1.1–1.2).

Расстояние между коробами в одном ряду  $h_1$ , м, определяется суммой диаметра загрузочного отверстия  $h$  и ширины короба  $b_1$ :

$$h_1 = h + b_1. \quad (21)$$

Сопротивление слоя древесных частиц  $\Delta p_{сл}$ , Па, должно быть больше полного давления  $p$ , Па, создаваемого газодувкой. Условие может быть записано в виде:

$$\Delta p_{сл} = k_n * p \quad (22)$$

Расстояние между рядами коробов  $h_2$  [м] находится по формуле

$$h_2 = \frac{\Delta p_{сл}}{p_{нq}} \quad (23)$$

Шахтные сушильные аппараты имеют квадратное либо прямоугольное сечение. Выберем квадратное сечение. Тогда, зная ширину сушильной камеры как сумму расстояний между коробами  $h_1$ , длина короба теплоносителя  $l$ , м, приравнивается к ширине  $\sum h_1$ :

$$l = \sum h_1 \quad (24)$$

Сечение рабочей зоны камеры сушки  $S$ , м<sup>2</sup>, определяется произведением суммы расстояний между коробами  $h_1$  и длины короба  $l$ :

$$S = l * \sum h_1. \quad (25)$$

Объем всех коробов подвода и отвода теплоносителя  $\sum_i^n V_k$  [м<sup>3</sup>] находится по соотношению:

$$\sum_i^n V_k = \sum_i^n Fc * l * k_e \quad (26)$$

где  $\sum_i^n Fc$  — сумма сечений коробов подвода и отвода теплоносителя [м<sup>2</sup>];  $k_e$  — коэффициент запаса.

Рабочий объем камеры сушки  $V_o$ , м<sup>3</sup>, есть сумма объема всех коробов теплоносителя, м<sup>3</sup>, и объема отходов  $V_n$ :

$$V_o = \sum_i^n V_k + V_n \quad (27)$$

По известным объему камеры сушки  $V_0$  и ее сечению  $S$  найдем рабочую высоту камеры сушки  $H$ , м:

$$H = V_0 / S \quad (28)$$

Число рядов коробов  $z$  округляется до ближайшего четного значения:

$$Z = H/h_2 \quad (29)$$

Средой, в которой постоянно работает сушильная камера, являются топочные газы, поэтому изготовить корпус камеры конвективной сушки следует из стали, устойчивой к водородной коррозии, например, 08X21Н6М2Т, 15Х25Т, 08Х17Т. Эти стали применяются в химической промышленности для изготовления сварных конструкций, работающих в агрессивных средах.

Зона сушки представляет из себя прямоугольный резервуар без ребер жесткости, в котором постоянно находится определенный объем отходов и сушильного агента. Определение толщины стенок  $s$  камеры сушки, м, ведется по уравнению [17]:

$$s = a_s * \sqrt{\frac{k * b_s * a}{2 * [\sigma]}} + kc, \quad (30)$$

где  $a_s$ - короткая сторона стенки [м]

$b_s$ - длинная сторона стенки [м]

$a$ - высота аппарата [м]

$[\sigma]$ - допускаемое напряжение [Н/м<sup>2</sup>]

$kc$ - прибавка на коррозию

$k$ - коэффициент формы резервуара определяется по формуле [17]:

$$k = \frac{0.7}{1 + 1.61 + \left(\frac{a_s}{b_s}\right)^2} \quad (31)$$

Производительность шлюзового питателя  $Q_n$ , кг/ч, рассчитывается из соотношения:

$$Q_n = V_0 / \rho_n \quad (32)$$

Мощность  $N$ , Вт, электродвигателя газодувки определяется по выражению [18]:

$$N = K(p * B_{т.в} / \eta), \quad (33)$$

где  $K$  — коэффициент запаса (1.05–1.6);  $p$  — полное давление, создаваемое газодувкой, Па;  $\eta$  — КПД газодувки (0.7–0.9).

На рис. 5 представлен алгоритм расчета зоны сушки. В первом блоке алгоритма вводятся исходные данные, необходимые для построения инженерной методики расчета.

Во втором блоке приводится математическое моделирование процесса конвективной сушки.

В третьем блоке рассчитываются количественные параметры по сырью и топочному газу.

В четвертом блоке ведется расчет геометрических параметров камеры сушки.

В пятом блоке выбирается аппаратное оформление стандартных узлов.

Разработанный алгоритм позволяет рассчитывать шахтные сушильные аппараты для дисперсных отходов.

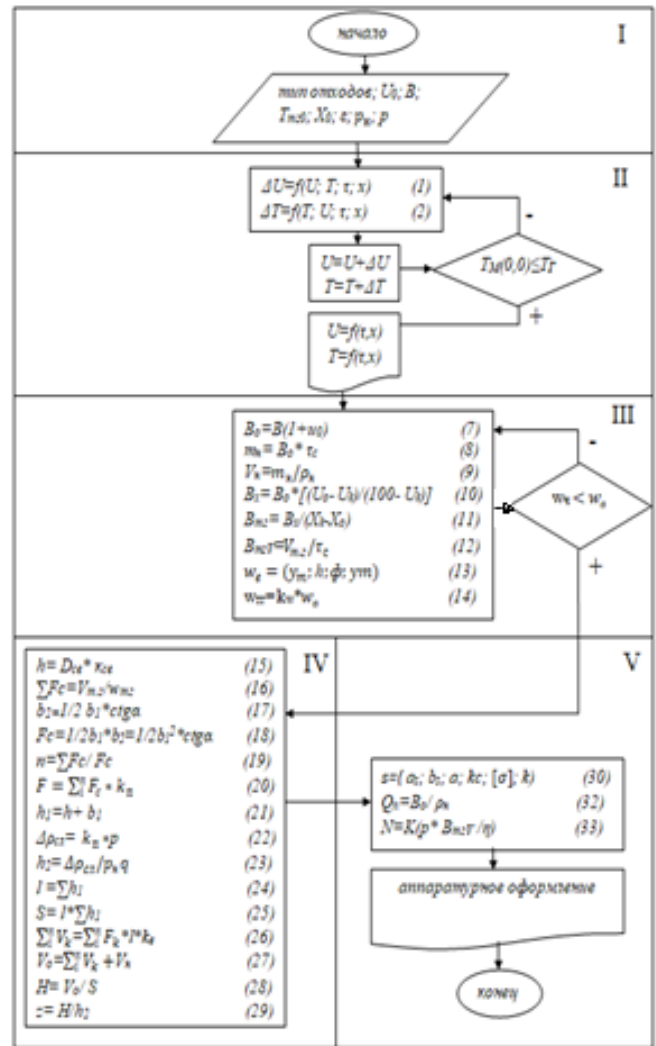


Рис. 5. Алгоритм расчета зоны сушки

**Результаты моделирования.** Расчет конструктивных параметров сушильной зоны в непрерывно действующей установке проводился для древесных отходов.

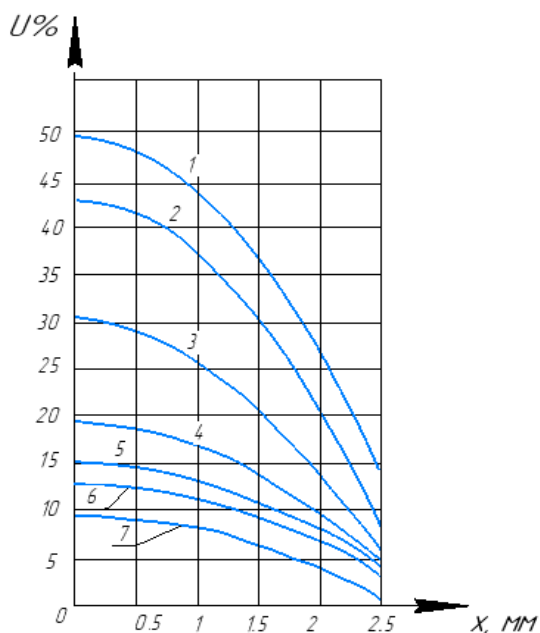
На рис. 6 представлено распределение влагосодержания в различных временных слоях по сечению щепы толщиной 5 мм, начальным влагосодержанием 50 %, с температурой сушильного агента 250 °С (рис. 7).

По этому распределению определяется время сушки, необходимое для полного удаления влаги из частицы.

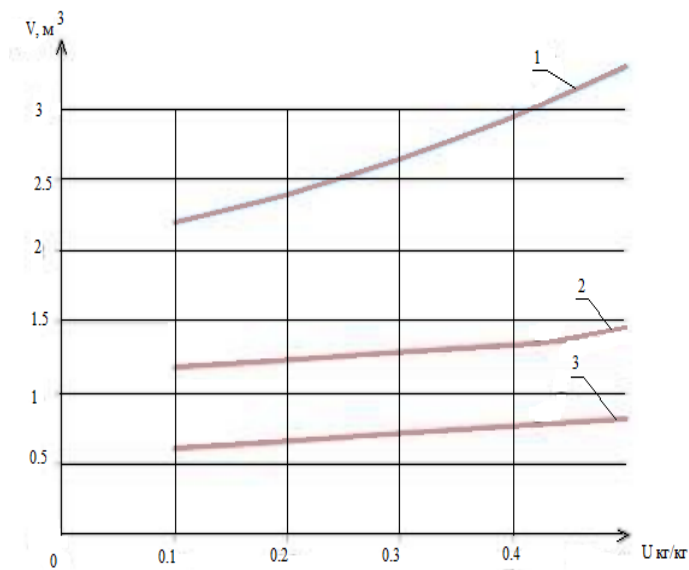
На рис. 7 приведены результаты моделирования по расчету объема камеры сушки в зависимости от исходного влагосодержания для различных видов органических отходов.

Анализ зависимостей показывает, что объем сушильной камеры при сушке щепы почти в 3 раза превышает объем сушильной камеры для сушки опилок и в 2.5 раза — для стружки. Обусловлено это длительностью процесса сушки щепы по сравнению с опилками и стружкой.

На рис. 8 приведены расчетные кривые сечения патрубка подвода теплоносителя сушильной камеры от начального влагосодержания и типа отходов.



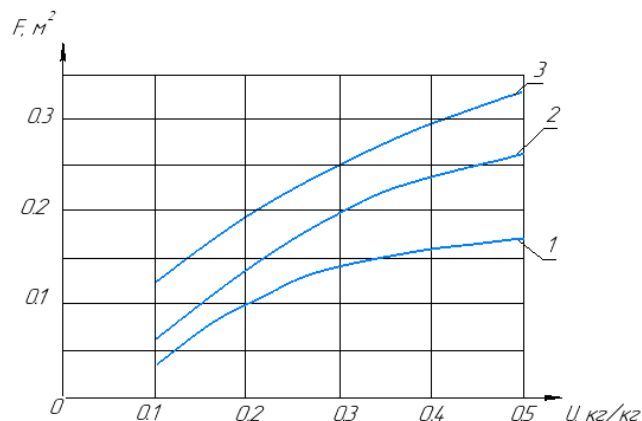
**Рис. 6.** Распределение влагосодержания по сечению частицы в различных временных слоях: 1 —  $\tau = 4$  мин; 2 —  $\tau = 8$  мин; 3 —  $\tau = 20$  мин; 4 —  $\tau = 32$  мин; 5 —  $\tau = 46$  мин; 6 —  $\tau = 50$  мин; 7 —  $\tau = 60$  мин



**Рис. 7.** Зависимость объема камеры сушки от влагосодержания и типа высушиваемых отходов: 1 — для щепы; 2 — для стружки; 3 — для опилок

Из анализа представленных зависимостей видно, что конструктивные размеры камеры сушки сильно зависят от начального влагосодержания и типа сырья.

Анализ зависимостей показал, что конструктивные размеры узла сушки в установке по производству активированного угля определяются не только производительностью по требуемому сырью, но и типом отходов и их начальным влагосодержанием.



**Рис. 8.** Зависимость требуемого сечения патрубка подвода теплоносителя сушильной камеры от начального влагосодержания и типа отходов: 1 — для щепы; 2 — для стружки; 3 — для опилок

По полученным данным рассчитана зона сушки, предназначенная для удаления влаги из щепы с насыпной плотностью  $375 \text{ м}^3/\text{кг}$ , влагосодержанием 50 % и начальной температурой  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  при производительности по сухим отходам  $B = 100 \text{ кг/ч}$ .

Сушильный агент — топочные газы с начальной температурой  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотностью  $\rho_{m,z}=0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Угол естественного откоса для щепы  $\alpha = 45^\circ$ . Размеры расчета: время сушки 1 ч, объемная производительность по влажным отходам  $V_B = 0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ , массовая производительность шахтной сушилки по испаренной влаге  $B_x = 50 \text{ кг/ч}$ . Массовая производительность шахтной сушилки по сушильному агенту  $B_{тг} = 385 \text{ кг/ч}$ . Объемная производительность шахтной установки по сушильному агенту  $B_{тгV} = 550 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$ , скорость витания частиц щепы  $w_B = 13 \text{ м/с}$ . Скорость движения топочных газов на входе  $w_{тг} = 3 \text{ м/с}$ .

Скорость движения топочных газов через короб подвода теплоносителя  $w_{тг} = 10,4 \text{ м/с}$ . Диаметр загрузочного отверстия  $h = 0,2 \text{ м}$ . Живое сечение всех коробов  $\sum Fc = 0,56 \text{ м}^2$ . Заданная ширина короба теплоносителя  $b_1 = 0,075 \text{ м}$ . Высота короба теплоносителя  $b_2 = 0,075 \text{ м}$ . Сечение короба теплоносителя  $Fc = 0,006 \text{ м}^2$ . Число подводящих коробов  $n = 9$ , сечение патрубка подвода теплоносителя  $F = 0,07 \text{ м}^2$ .

Диаметр патрубка подвода теплоносителя  $D_F = 0,22 \text{ м}$

Расстояние между коробами в одном ряду  $h_1 = 0,275 \text{ м}$ . Расстояние между рядами коробов  $h_2 = 0,2 \text{ м}$ . Высота рабочей части камеры сушки  $H = 1 \text{ м}$ .

По известному объему найдем рабочую ширину камеры сушки  $l = 0,411 \text{ м}$ , рабочий объем камеры сушки  $V_0 = 0,41 \text{ м}^3$ . Число рядов коробов  $z = 6$ , по 3 ряда подвода и отвода теплоносителя, число коробов в одном ряду 3, толщина стенки камеры сушки  $s = 0,005 \text{ м}$ . Габаритные размеры камеры сушки  $a, b, c = 1 \text{ 595; 0,961; 0,835 м}$ .



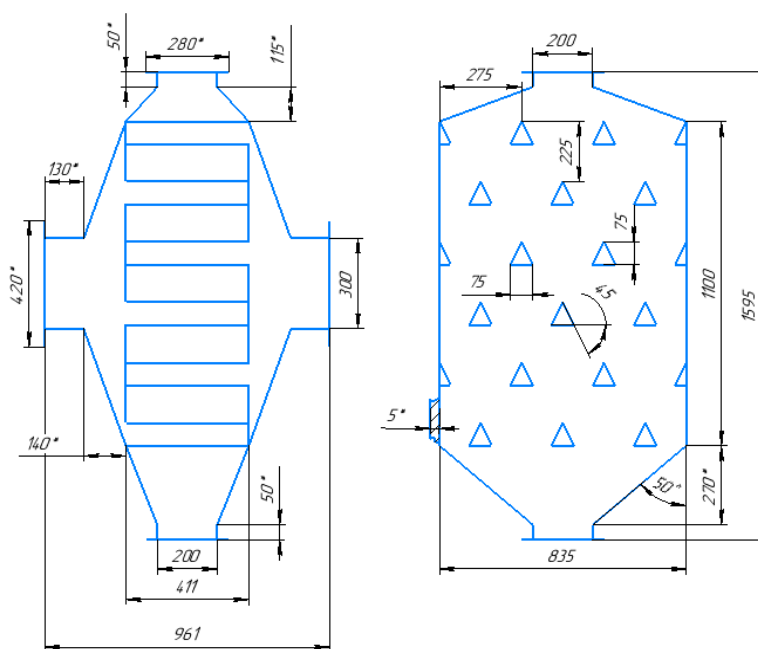


Рис. 9. Камера сушки. Размеры даны в мм; \* — размеры для справки

**Заключение.** В результате исследований разработана инженерная методика расчета зоны сушки для непрерывно действующей установки по производству активированного угля. Данная методика позволяет решить конструкторское оформление и размеры промышленной установки в зависимости от производительности, вида сырья и его характеристик.

Построенное распределение влагосодержания по сечению частицы в различных временных слоях позволяет определить время сушки, от которого зависят конструктивные параметры камеры сушки.

Приведенные размеры расчета могут быть использованы при проектировании аппаратов большей производительности.

#### Литература

- Юрьев Ю.Л., Орлов В.П., Панюта С.А., Штеба Т.В. Проблемы аппаратного оформления процессов переработки измельченной древесины в активные угли // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2000. № 5-6. С. 52-57.
- Богданович Н.И. Адсорбенты из отходов лесопромышленных предприятий для решения экологических проблем // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 1997. № 4. С. 92-96.
- Чу Конг Ньги, Спицын А.А., Пономарев Д.А., Чухчин Д.Г., Сазанов Ю.Н., Федорова Г.Н. Получение и активирование биоуглерода из бамбука // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2018. Вып. 225. С. 226-236.
- Мухин В.М., Курилкин А.А., Воропаева Н.Л., Лексюкова К.В., Учанов П.В. Место активных углей в экологии и экономике, новые технологии их производства // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 3. С. 346-353.
- Зиатдинов Р.Р., Степанова Т.О., Зиатдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Ахметова Д.А. Конвективная сушка измельченной древесины перед термохимическим процессом переработки древесных материалов // Деревообрабатывающая пром-сть. 2019. № 1. С. 66-73.
- Зиатдинов Р.Р., Сафин Р.Г., Степанова Т.О., Зиатдинова Д.Ф., Ахметова Д.А., Терехин Н.М. Непрерывно действующая установка переработки древесных отходов в активированный уголь // Деревообрабатывающая пром-сть. 2019. № 4. С. 90-98.
- Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Зиатдинова Д.Ф., Степанова Т.О. Конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. С. 29-37.
- Сафин Р.Г., Степанова Т.О., Зиатдинов Р.Р., Рябушкин Д.Г., Петров В.И., Сотников В.Г. Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля // Деревообрабатывающая пром-сть. 2020. № 3. С. 45-55.
- Timerbaev N.F., Safin R.G., Mazarov I.Yu., Stepanova T.O. Thermochemical processing of organic waste IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 643. 2019.
- Safin R.G., Prosvirnikov D.V., Stepanova T.O. Processing of Renewable Wood Biomass into Thermally Modified Pellets with Increased Combustion Value // Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387. 2020.
- Сафин Р.Г. Способ получения активированного угля: пат. РФ № 2694347, 11.07.2019 МПК С 10 В 53/00; заяв. 01.09.2019; опубл. 07.11.2019.
- Сафин Р.Г., Зиатдинов Р.Р., Сотников В.Г., Рябушкин Д.Г., Гумеров Д.Р. Моделирование процесса измельчения и транспортирования органических отходов в установке производства активированного угля // Системы Методы Технологии. 2021. № 2. С. 152-157.
- Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств. 4-е изд., испр. и перераб. СПб.: Лань, 2020. 752 с.
- Нестеров А.В. Промышленная сушка: моногр. СПб.: Лань, 2021. 304 с.
- Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
- Кузнецов В.С., Денисов С.В. Пневмотранспорт деревообрабатывающих предприятий. Внешние пневмотранспортные установки. Братск: БрГУ, 2007. 67 с.
- Лацинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1970. 752 с.

18. Елфимов С.В. Компрессоры, вентиляторы и тягодутьевые машины. Самара, 2012. Ч. I. 32 с.
19. Peng Y., Wang Y., Zhang R., Wang W., Cao J. Improvement of wood against UV weathering and decay by using plant origin substances: Tannin acid and tung oil // *Industrial Crops and Products* 2021.
20. Lebedev V.A., Krupenya E.Y., Shishkina A.P., Basenko G.V. Finishing characteristics of machinery parts with granular organic substance made from natural materials in vibration technological systems // *Materials Today: Proceedings* c1993-1996, 38 2021.
21. Aksenov A.A., Malyukov S.V. Microwave modification of wood: Determination of mechanical properties of softwood // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 595 (1). 2020.
22. Bahar R., Ouertani S., Azzouz S., El Ayeb M.T., El Cafci A. Mechanical properties changes in oak (*Quercus canariensis*) and stone pine (*Pinus pinea*) wood subjected to various convective drying conditions // *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 24 (13), 2020. P. 2117-2129.
23. Zohrabi S., Aghbashlo M., Seiedlou S.S., Scaar H., Mellmann J. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation // *Journal of Cleaner Production* 257, 2020. P. 120394.
24. Simo-Tagne M., Bennamoun L., Léonard A., Rogaume Y. Modeling, numerical simulation and validation of a convective dryer in steady conditions: case study of tropical woods // *International Journal of Modelling and Simulation* 40 (2). 2020. P. 143-161.
25. Korchuk Y.A., Orlov A.A., Popov A.A. Improvement of the design and heat supply system of a convective dehumidification chamber based on the heat engineering method // *Journal of Physics: Conference Series* 1399 (4). 2019. P. 044037.
- educational institutions. *Energy Sector Problems*. 2019. V. 21. P. 29-37.
8. Safin R.G., Stepanova T.O., Ziatdinov R.R., Ryabushkin D.G., Petrov V.I., Sotnikov V.G. Constructive calculation of the pyrolysis zone of the activated carbon production unit // *Derevoobrabatival'naya promishlennost'* (Woodworking industry). 2020. № 3. P. 45-55.
9. Timerbaev N.F., Safin R.G., Mazarov I.Yu., Stepanova T.O. Thermochemical processing of organic waste *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 643. 2019.
10. Safin R.G., Prosvirnikov D.V., Stepanova T.O. Processing of Renewable Wood Biomass into Thermally Modified Pellets with Increased Combustion Value // *Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering* 387. 2020.
11. Safin R.G. Method for producing activated carbon: pat. RF № 2694347, 11.07.2019 MPK S 10 B 53/00; zayav. 01.09.2019; opubl. 07.11.2019.
12. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G., Ryabushkin D.G., Gumerov D.R. Modeling the process of grinding and transporting organic waste in an activated carbon production unit // *Systems Methods Technologies*. 2021. № 2. P. 152-157.
13. Safin R.G. Technological processes and equipment of wood-working industries. 4-e izd., ispr. i pererab. SPb.: Lan', 2020. 752 p.
14. Nesterov A.V. *Industrial drying: monogr.* SPb.: Lan', 2021. 304 p.
15. Lykov A.V. *Drying theory.* M.: Energiya, 1968. 472 p.
16. Kuznecov V.S., Denisov S.V. *Pneumatic transport of wood-working enterprises. External pneumatic conveying units.* Bratsk: BrGU, 2007. 67 p.
17. Lashchinskij A.A., Tolchinskij A.R. *Fundamentals of design and calculation of chemical equipment.* L.: Mashinostroenie, 1970. 752 p.
18. Elfimov S.V. *Compressors, Fans and Draft Machines.* Samara, 2012. CH. I. 32 p.
19. Peng Y., Wang Y., Zhang R., Wang W., Cao J. Improvement of wood against UV weathering and decay by using plant origin substances: Tannin acid and tung oil // *Industrial Crops and Products* 2021.
20. Lebedev V.A., Krupenya E.Y., Shishkina A.P., Basenko G.V. Finishing characteristics of machinery parts with granular organic substance made from natural materials in vibration technological systems // *Materials Today: Proceedings* s1993-1996, 38 2021.
21. Aksenov A.A., Malyukov S.V. Microwave modification of wood: Determination of mechanical properties of softwood // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 595 (1). 2020.
22. Bahar R., Ouertani S., Azzouz S., El Ayeb M.T., El Cafci A. Mechanical properties changes in oak (*Quercus canariensis*) and stone pine (*Pinus pinea*) wood subjected to various convective drying conditions // *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 24 (13), 2020. P. 2117-2129.
23. Zohrabi S., Aghbashlo M., Seiedlou S.S., Scaar H., Mellmann J. Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation // *Journal of Cleaner Production* 257, 2020. P. 120394.
24. Simo-Tagne M., Bennamoun L., Léonard A., Rogaume Y. Modeling, numerical simulation and validation of a convective dryer in steady conditions: case study of tropical woods // *International Journal of Modelling and Simulation* 40 (2). 2020. P. 143-161.
25. Korchuk Y.A., Orlov A.A., Popov A.A. Improvement of the design and heat supply system of a convective dehumidification chamber based on the heat engineering method // *Journal of Physics: Conference Series* 1399 (4). 2019. P. 044037.

#### References

1. YU'ev YU.L., Orlov V.P., Panyuta S.A., SHteba T.V. Problems of hardware design of the processes of processing crushed wood into active coals // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2000. № 5-6. P. 52-57.
2. Bogdanovich N.I. Adsorbents from wastes of timber industry enterprises for solving ecological problems // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 1997. № 4. P. 92-96.
3. CHu Kong N'gi, Spicyn A.A., Ponomarev D.A., CHuhchin D.G., Sazanov YU.N., Fedorova G.N. Obtaining and activating biocarbon from bamboo // *Izvestia SPbLTA*. 2018. Vyp. 225. P. 226-236.
4. Muhin 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 // *Sorption and chromatographic processes*. 2016. V. 16. № 3. P. 346-353.
5. Ziatdinov R.R., Stepanova T.O., Ziatdinova D.F., Safin R.G., Ahmetova D.A. Convective drying of chopped wood before the thermochemical process of processing wood materials // *Derevoobrativaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2019. № 1. P. 66-73.
6. Ziatdinov R.R., Safin R.G., Stepanova T.O., Ziatdinova D.F., Ahmetova D.A., Terekhin N.M. Continuously operating plant for processing wood waste into activated carbon // *Derevoobrativaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2019. № 4. P. 90-98.
7. Timerbaev N.F., Safin R.G., Ziatdinova D.F., Stepanova T.O. Convective drying of dispersed materials Before the thermochemical process of processing // *Proceedings of the higher*