

Моделирование процесса измельчения и транспортировки органических отходов для установки по производству активированного угля

В.Г. Сотников

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68,
Казань, Республика Татарстан, Россия
vcvcvc12345678@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>
Статья поступила 13.08.2021, принята 07.09.2021

На сегодняшний день все более популярной становится переработка органических отходов, таких как древесная стружка, технологическая щепка, опилки, лузга подсолнечника, автомобильные шины, скорлупа грецкого ореха, семечки различных овощей и фруктов. Промышленностью разрабатываются перспективные аппараты для переработки отходов с последующим получением полезных продуктов для хозяйственной деятельности. Попутно встает вопрос об измельчении и транспортировке этих отходов к месту переработки. В частности, для установки по производству активированного угля из сыпучих отходов необходимо спроектировать зоны измельчения и транспортировки. На основе выбранного измельчителя автором статьи смоделирован пневмотранспортный узел подачи измельченных органических отходов в установку производства активированного угля. Проведено математическое моделирование процесса перемещения отходов, позволяющее определить рациональные параметры зон подготовки сырья. Разработан алгоритм расчета вертикальной пневмотранспортной системы, который может быть использован для расчета технологических процессов, связанных с необходимостью подачи и последующего вертикального транспортирования сырья. Получены зависимости скорости витания от насыпной плотности частиц, результаты которой выявили сильное влияние толщины частицы на ее скорость витания в пневмопроводе, а также зависимость диаметра трубопровода от объемного расхода и вида сырья, которая продемонстрировала увеличение диаметра трубопровода при уменьшении насыпной плотности частиц. Результатами этих зависимостей можно оперировать при создании или модернизации вертикальных пневмотранспортных систем, рассчитанных на небольшие объемы и расстояния транспортируемого сырья.

Ключевые слова: пневмотранспорт; измельчение; отходы; математическая модель; скорость витания.

Modeling the process of grinding and transporting organic waste for an activated carbon production unit

V.G. Sotnikov

Kazan National Research Technological University; 68, K. Marks St., Kazan, Republic of Tatarstan
vcvcvc12345678@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>
Received 13.08.2021, accepted 07.09.2021

Today, the processing of organic waste such as wood chips, technological chips, sawdust, sunflower husks, car tires, walnut shells, seeds of various vegetables and fruits is becoming more and more popular. The industry is developing promising devices for processing waste with the subsequent production of useful products for economic activities. Along the way, the question arises of crushing and transporting these wastes to the place of their processing. In particular, for a plant for the production of activated carbon from bulk waste, it is necessary to design grinding and transportation zones. On the basis of the chosen grinder, a pneumatic transport unit for feeding crushed organic waste to the activated carbon production unit is modeled. Mathematical modeling of the waste movement process has been carried out, which makes it possible to determine the rational parameters of the zones for the preparation of raw materials. An algorithm for calculating a vertical pneumatic transport system has been developed, which can be used to calculate technological processes associated with the need for supply and subsequent vertical transportation of raw materials. The following dependencies are obtained: the rate of soaring on the bulk density of particles, the results of which revealed the dependence of the rate of soaring on the thickness of particles, regardless of its bulk density, as well as the dependence of the diameter of the pipeline on the volumetric flow rate and the type of raw material, which demonstrates an increase in the diameter of the pipeline with a decrease in the bulk the density of the particles transported through the pipeline. The results of these dependencies can be used when creating or modernizing vertical pneumatic conveying systems designed for small volumes and short distances of transported raw materials.

Keywords: pneumatic transport; crushing; waste; mathematical model; hovering speed.

Введение. Одной из проблем деревообрабатывающей промышленности России является низкий показатель рециклинга органических отходов. Пустив эти отходы в повторное производство, можно получить такой полезный для различных отраслей экономики продукт, как активированный уголь, производство которого в данный момент очень актуально.

Активированный уголь широко используется в химической, нефтегазодобывающей и перерабатывающей промышленности, на предприятиях энергетики, в пищевом производстве, медицине, фармацевтике и многих других отраслях. Благодаря адсорбционным свойствам активированные угли позволяют получать продукцию высокой степени очистки, способствуют интенсификации процессов и позволяют эффективно решать проблемы защиты окружающей среды от вредного воздействия производственных выбросов и сбросов сточных вод [1–3; 27; 28].

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [4; 15]. Измельчение и транспортировка отходов для этой установки требуют дополнительных исследований.

Целью работы являются моделирование процесса транспортирования сыпучих органических отходов на примере отходов деревопереработки, построение математической модели вертикального транспортирования сыпучих частиц различных типоразмеров с разработкой алгоритма расчета вертикальной пневмотранспортной системы и получением расчетных зависимостей, влияющих на технико-экономические показатели работы зоны измельчения и транспортировки отходов.

Материалы и методы исследования. Непрерывно действующая энерго- и ресурсосберегающая установка для производства активированного угля (рис. 1) состоит из зоны измельчения 5, 6, 7 и вертикальной реторты, в которой за счет гравитационных сил происходит движение органических отходов через зоны сушки 1, пиролиза 2, активации 3, охлаждения 4 с превращением их в активированный уголь, системы сепарации образующихся газов 15, 16, топочного устройства 17, системы газоочистки 12, рекуперативных теплообменников 14 [4; 15; 16].

Перед сушкой отходы необходимо измельчить. На рис. 2 показана зона измельчения и транспортирования, где древесные отходы измельчаются в измельчительной машине 1 и подаются в транспортный трубопровод 2, по которому частицы под воздействием воздуха, подаваемого вентилятором 3, транспортируются вертикально вверх в накопитель, затем из накопителя дозируются в камеру сушки.

Ключевыми параметрами для выбора измельчительного аппарата являются размеры частицы $a \cdot b \cdot h$, мм; объемный расход отходов, подаваемых на сушку $Q_m = V/\tau$, м³/ч.

Зная эти параметры, можно выбрать оборудование для измельчения по табл. 1.

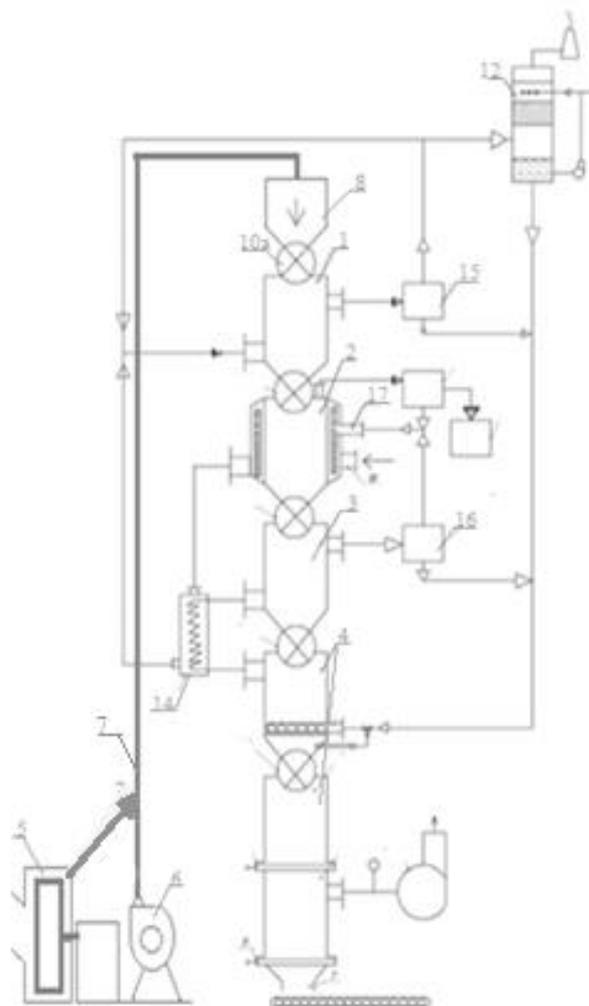


Рис. 1. Установка для производства активированного угля

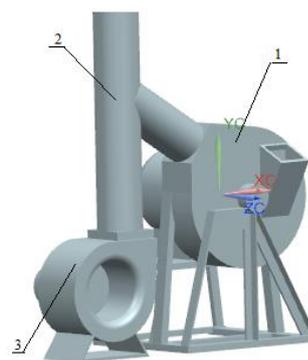


Рис. 2. Схема зоны измельчения и транспортировки отходов

Таблица 1. Измельчительные машины

Наименование оборудования	Производительность Q, м ³ /ч	Размер получаемых частиц, мм
ВРМх-350	от 1 до 2	1–35
ЩДС-4	от 2 до 4	5–30
ЩДС-6	от 4 до 6	5–30
ВРМх-1000	от 5.5 до 11	1–35

В табл. 1 представлены дисковые рубительные машины. Выбор данного типа оборудования обусловлен тем, что они имеют высокую производительность при низкой себестоимости по сравнению с другими аппаратами для измельчения отходов. Для того, чтобы не было простоев в установке, при выборе измельчительной машины должна выдерживаться зависимость $Q_m < Q$. После измельчения отходов их подают в транспортный трубопровод и транспортируют в зону сушки.

В вертикальном трубопроводе скорость потока частиц при установившемся движении аэросмеси рассчитывается соотношением (1) [6]:

$$w_T = w - w_g, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где w_T — скорость транспортируемых частиц; w — скорость движения газа; w_g — скорость витания частиц.

Скорость витания зависит от насыпной плотности и толщины частиц, с уменьшением толщины эта зависимость выражается слабее. Для частиц толщиной от 0,4 мм и более можно пользоваться при определении скорости витания формулой С.Н. Святкова [7]:

$$w_g = 0.14 \sqrt{\frac{p}{(0,02 + \frac{\phi}{h}) * p_g}} \text{ м/с}, \quad (2)$$

где w_g — скорость витания щепы; p — насыпная плотность частиц, кг/м^3 ; p_g — плотность воздуха (газа), кг/м^3 ; h — толщина частицы, мм ; ϕ — коэффициент формы частицы [6].

Размеры и коэффициент формы частиц представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Размеры древесных частиц

Тип отхода	Толщина h , мм
Опилки	0,5÷1,0
Стружка	1÷2
Щепа	2÷15

Таблица 3. Коэффициент формы частицы

Тип частицы	ϕ
Бесконечная пластина	0
Прямоугольное сечение	0.9
Бесконечный цилиндр	1
Квадратное или округленное сечение	1.1
Шар	2

Исходя из соотношения (1), скорость движения газа в вертикальном трубопроводе должна быть выше скорости витания частицы. Рекомендуемая скорость движения газа в вертикальном трубопроводе для разных типов отходов приведена в табл. 4 [6].

Таблица 4. Скорость движения газа в вертикальном трубопроводе

Тип частицы	w , м/с
Опилки	14–16
Стружка	17–18
Технологическая щепа	20–28

Диаметр трубопровода рассчитывается по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_v}{\pi w}}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где Q_v — расход газа на транспортирование, $\text{м}^3/\text{с}$. Затем выбирается его стандартное значение по ГОСТ.

Найдем расход газа Q_v по соотношению:

$$Q_v = \frac{Q_m}{p X_m}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где Q_m — массовый расход частиц, кг/ч ; p — давление воздуха, кПа ; X_m — массовая концентрация аэросмеси, кг/кг .

Значение массовой концентрации аэросмеси X_m для разных типов установок различается и составляет, в частности, для пневмотранспортных установок низкого давления $X_m = 0.1–1.5$ кг/кг . Данная концентрация также различается в зависимости от типа транспортируемых отходов, рекомендуемые значения приведены в табл. 5 [7].

Таблица 5. Массовая концентрация аэросмеси

Тип частицы	X_m , кг/кг
Опилки	0,2–0,6
Стружка	0,2–0,7
Технологическая щепа	1–6

Для нахождения расхода газа необходимо также знать, как и какой газ, с какой температурой и плотностью поступает в трубопровод. В нашем случае газом является подаваемый вентилятором воздух с температурой 20 °С и плотностью $p_g = 1.2$ кг/м^3 .

После нахождения расчетного диаметра выбирается его стандартное значение по ГОСТ. Действительное значение скорости газа w_d определяется стандартным сечением трубопровода S :

$$w_d = Q_v / S, \text{ м/с}. \quad (5)$$

Действительная скорость газа должна совпадать с расчетной или превышать ее не более чем на 8 %:

$$\frac{w}{w_d} = 1 \text{ или не менее } 0.92. \quad (6)$$

Перед подбором вентилятора нужно знать высоту, на которую транспортируются частицы L_T , м. Расчет ведем для вертикальной пневмотранспортной системы $L_T < 200$ м, расчет потерь газа через неплотности в трубопроводе проводить не требуется [6].

Рассчитав скорость транспортирования и диаметр трубопровода, можно произвести подбор вентилятора, их различные типы приведены в табл. 6. Основные параметры, которыми стоит руководствоваться при выборе вентилятора, это производительность Q_v , которая не должна быть ниже расхода газа на транспортирование частицы, и создаваемое им избыточное давление P , не превышающее 0.11 МПа.

Таблица 6. Параметры вентиляторов

Тип вентилятора	Избыточное давление P, кПа	Производительность V, м³/мин
Ротационные воздуходувки серии DR	от 10 до 110	от 0.3 до 500
Центробежные воздуходувки (компрессоры) ЭФ200	от 10 до 80	от 13 до 45
Воздуходувки ВЦ-ССМ	от 30 до 103	от 0.6 до 37.5

Найдем время транспортирования $\tau_{тр}$ по соотношению:

$$\tau_{тр} = L_m / w_T \quad (7)$$

За это время нарезанные частицы пройдут путь от измельчительной машины до накопителя.

Сформированная математическая модель представлена в виде алгоритма на рис. 3.

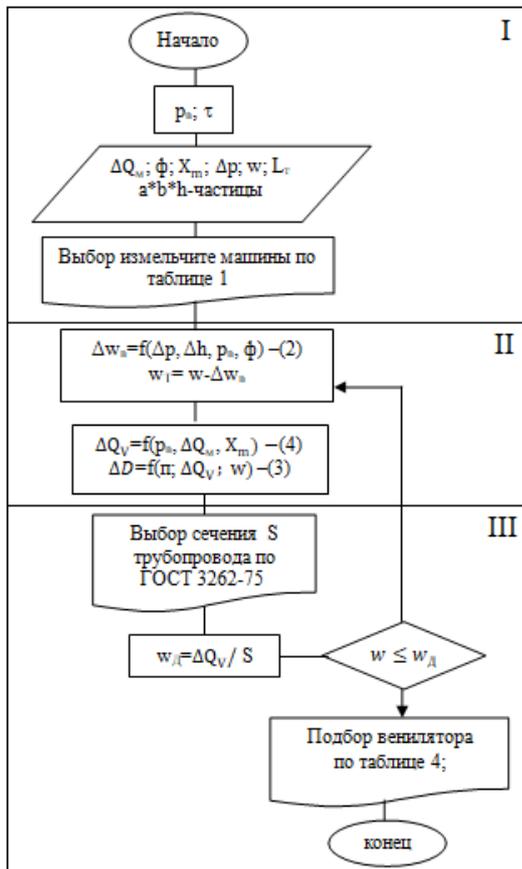


Рис. 3 Алгоритм расчета зон измельчения и транспортирования частиц

Алгоритм состоит из трех блоков. В первом блоке вводятся исходные данные, константы и табличные величины. Во втором блоке моделируется процесс, происходящий в трубопроводе при транспортировании частиц. В третьем блоке происходят сверка расчетных данных и аппаратное оформление для пневмотранспортного узла.

Разработанный алгоритм позволяет проводить расчеты для вертикальных пневмотранспортных систем с

различными дисперсными материалами. Результаты расчетов, произведенных для различных типов древесных отходов, приведены в табл. 7.

Результаты моделирования. Моделирование проводилось с целью нахождения рациональных параметров оборудования для зон измельчения и транспортировки.

Результатом моделирования скорости витания частицы w_6 от насыпной плотности ρ стало построение в пакете Mathcad зависимости, изображенной на рис. 4. Данная зависимость показывает, что при относительно высоких значениях толщины частицы требуется более высокая скорость витания при одной и той же насыпной плотности.

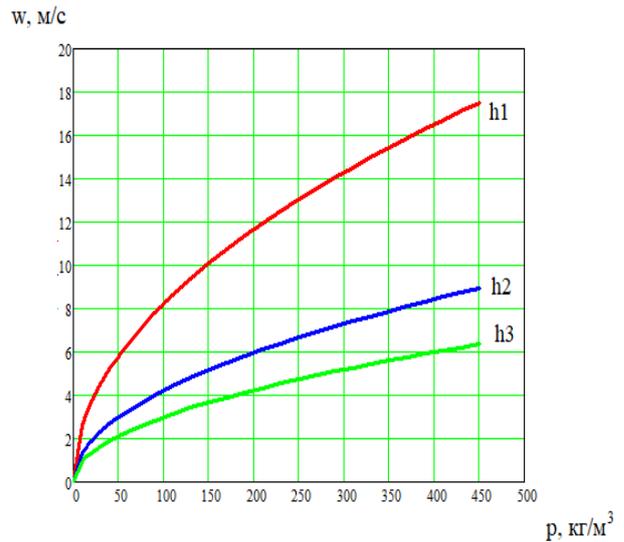


Рис. 4 Зависимость скорости витания от насыпной плотности частиц: h1 = 5 мм — щепя; h2 = 1 мм — стружка; h3 = 0,5 мм — опилки

Из зависимости диаметра трубопровода от объемного расхода газа (рис. 5) видно, что при равных объемах сырь на частицы с меньшей толщиной приходится больший диаметр трубопровода. Это обусловлено тем, что тонкие частицы имеют меньшую насыпную плотность и, как следствие, меньшую концентрацию аэромеси, за счет чего имеют более высокие числовые значения диаметра трубопровода.

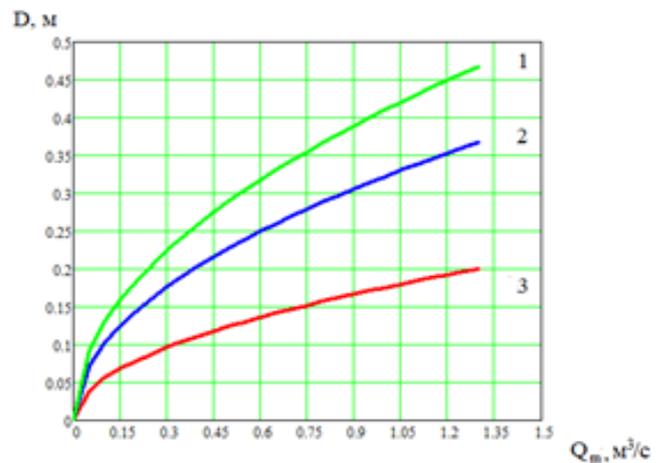


Рис. 5 Зависимость диаметра трубопровода от объемного расхода сырья на транспортировку: 1 — опилки; 2 — стружка; 3 — щепя

В табл. 7 приведены результаты расчетов, параметров транспортирования различных видов древесных отходов.

Таблица 7. Расчет параметров пневмотранспорта для древесных отходов

Тип отходов	Размеры частицы, мм	ρ , кг/м ³	w_0 , м/с	w_T , м/с	Q, м ³ /с	D, мм
Опилки	2*0.5*0.5	186	6,4	7.6	0.48	165
Стружка	6*1*0.5	120	8,2	8.8	0.46	155
Щепа	20*20*5	239	13,7	9,3	0.42	150

Заключение. В результате исследований смоделирован процесс перемещения сыпучих органических

отходов по пневмотранспортной системе, на примере отходов деревопереработки. По результатам расчета модели спроектированы зоны измельчения и транспортировки отходов для непрерывно действующей установки и выстроен алгоритм расчета пневмотранспортных систем.

В ходе исследований построены зависимости скорости витания от насыпной плотности частиц и диаметра трубопровода от объемного расхода сырья на транспортировку частиц, по этим зависимостям можно выбрать рациональные параметры оборудования при проектировании пневмотранспортных систем для сыпучих отходов.

Литература

- Юрьев Ю.Л., Орлов В.П., Панюта С.А., Штеба Т.В. Проблемы аппаратного оформления процессов переработки измельченной древесины в активные угли // 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.
- Сафин Р.Г. Способ получения активированного угля: пат. РФ № 2694347; заявл. 2019.12.23; опублик. 2020.09.07.
- Степанова Т.О., Гумеров Д.Р., Асаева Л.Ш., Шакиров А.Р. Экспериментальная установка для активации древесного угля // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: тр. Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. (14-16 мая 2019 г.). Новокузнецк, 2019. С. 376-378.
- Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств. 2-е изд. М.: Изд-во МГУЛ, 2002. С. 238-252.
- Кузнецов В.С. Денисов С.В. Пневматический транспорт на деревообрабатывающих предприятиях. Внешние пневмотранспортные установки. Братск: БрГУ, 2007. 67 с.
- Воронин Ю.Б. Пневмотранспорт измельченной древесины. М.; Лесная пром-сть, 1977. 208 с.
- Земан Д.А., Шишкин С.Ф., Шишкин А.С., Бараковских Д.С. Экспериментальное определение относительной скорости частиц в условиях пневмотранспорта // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 6. С. 110-114.
- Дроздов Б.С., Стефаненко В.Т. Системы пневмотранспорта // Черная металлургия. Бюллетень науч.-технической и экономической информации. 2016. № 6. С. 67-69.
- Молчанова А.А. Поиск наиболее рациональной системы пневмотранспорта в деревообрабатывающем цехе // Молодые ученые - ускорению науч. технического прогресса в XXI в.: сб. материалов III Всерос. науч.-технической конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием (22-23 апр. 2015 г.). Ижевск, 2015. С. 865-869.
- Виноградов А.В. Повышение надежности механизмов пневмотранспорта для перевозки сыпучих грузов в АПК: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 16 с.
- Кузнецов Ю.М. Пневмотранспорт: теория и практика. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 60 с.
- Narimatsu C.P., Ferreira M.C. Vertical pneumatic conveying in dilute and dense-phase flows: experimental study of the influence of particle density and diameter on fluid dynamic behavior // Published in Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2001. V. 18. P. 221-232.
- Сафина А.В., Сайфутдинов Д.М., Хайрутдинова А.Р., Валеев К.В. Комплексная переработка биомассы березы // Деревообрабатывающая пром-сть. 2017. № 4. С. 11-17.
- Шайхутдинова Д.А., Хайрутдинова А.Р., Ризванова Л.М., Сайфутдинов Д.М., Валеев К.В. Совершенствование аппаратного оформления деревообрабатывающих производств с применением тепловых труб // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. 2018. № 2. С. 161-163.
- Gandhidasan P., Ramamurthy K.N. Thermal performance analysis of pneumatic structures Energy. 1988. V. 13, iss. 5. P. 413-419.
- David Huang K., Sheng-Chung Tzeng. Development of a hybrid pneumatic-power vehicle Applied Energy. 2005. V. 80, iss. 1. P. 47-59.
- Kamiński Zbigniew. A simplified lumped parameter model for pneumatic tubes // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2017. V. 23, iss. 5. P. 523-535.
- Yan Shi, Guanwei Jia, Maolin Cai, Weiqing Xu. Study on the Dynamics of Local Pressure Boosting Pneumatic System. Mathematical Problems in Engineering. 2015. V. 2015. P. 1-11.
- Mukhopadhyay S. Parameter estimation from flowing fluid temperature logging data in unsaturated fractured rock using multiphase inverse modeling, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2009. CA94720. P. 57.
- Schuster T., Bradley M.S.A., Reed A.R. The dependence of power consumption of pneumatic conveying systems upon bulk material properties, pipeline bore and routing, and mode of flow. Proc. Instn Mech. Engrs, 1995. 209 (E1). P. 69-75.
- Hayes J.W., Reed A.R., Bradley M.S.A. Economics of pneumatic conveying systems-a case study. In Proceedings of the Fourth IEAust Conference on Bulk Materials Storage, Transport and Flow, Wollongong, New South Wales, Australia, July 1992. P. 49-53. (Institution of Engineers, Australia, Barton, Australia Capital Territory).
- Hartman M., Phořelý M., Trnka O. Transport velocities of different particulate materials in pneumatic conveying // Chemical Papers. 2006. V. 60. P. 74-77.
- Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F., Leung L.S. An overview of pneumatic conveying systems and performance. In: Pneumatic Conveying of Solids. Powder Technology Series. 1997. V. 8. Springer, Dordrecht.
- Fraige F., Langston P. Horizontal pneumatic conveying: a 3d distinct element model. Granular Matter 8, 67-80 (2006). URL: <https://doi.org/10.1007/s10035-005-0221-2>.

27. 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.
 28. Сафин Р.Г. Установка для комплексной переработки древесины лиственницы: пат. РФ № 2655757; заявл. 2017.07.05; опубл. 2018.05.29.
- 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 // Forest Journal . 2000. № 5-6. P. 52-57.
 2. Bogdanovich N.I. Adsorbents from wastes of forestry 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 activation of biocarbon from bamboo // Izvestia SPbLTA. 2018. Vyp. 225. P. 226-236.
 4. Safin R.G. Method for producing activated carbon: pat. RF № 2694347; yayavl. 2019.12.23; opubl. 2020.09.07.
 5. Stepanova T.O., Gumerov D.R., Asaeva L.SH., SHakirov A.R. Experimental setup for activating wood coal // Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: tr. Vseros. nauch. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. (14-16 maya 2019 g.). Novokuzneck, 2019. P. 376-378.
 6. Safin R.G. Technological processes and equipment of wood-working industries. 2-e izd. M.: Izd-vo MGUL, 2002. P. 238-252.
 7. Kuznecov V.S. Denisov S.V. Pneumatic transport in wood-working factories. External pneumatic conveying installations. Bratsk: BrGU, 2007. 67 p.
 8. Voronin YU.B. Pneumatic transport of shredded wood. M.; Lesnaya prom-st', 1977. 208 p.
 9. Zeman D.A., SHishkin S.F., SHishkin A.S., Barakovskih D.S. Experimental determination of the relative velocity of particles in pneumatic transport conditions // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. № 6. P. 110-114.
 10. Drozdov B.S., Stefanenko V.T. Pneumotransport systems // Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information. 2016. № 6. P. 67-69.
 11. Molchanova A.A. Search for the most rational pneumatic transport system in the woodworking shop // Molodye uchenye - uskoreniyu nauch. tekhnicheskogo progressa v HKHI v.: sb. materialov III Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. aspirantov, magistrantov i molodyh uchenyh s mezhdunar. uchastiem (22-23 apr. 2015 g.). Izhevsk, 2015. P. 865-869.
 12. Vinogradov A.V. Increasing the reliability of pneumatic transport mechanisms for the transportation of bulk cargo in the agro-industrial complex: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2005. 16 p.
 13. Kuznecov YU.M. Pneumatic transport: theory and practice. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. 60 p.
 14. Narimatsu C.P., Ferreira M.C. Vertical pneumatic conveying in dilute and dense-phase flows: experimental study of the influence of particle density and diameter on fluid dynamic behavior // Published in Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2001. V. 18. P. 221-232.
 15. Safina A.V., Sajfutdinov D.M., Hajrutdinova A.R., Valeev K.V. Complex processing of birch biomass // Derevoobrabatival'naya promishlennost' (Woodworking industry). 2017. № 4. P. 11-17.
 16. SHajhutdinova D.A., Hajrutdinova A.R., Rizvanova L.M., Sajfutdinov D.M., Valeev K.V. Improving the hardware design of wood processing industries using heat pipes // Inzhenernye kadry - budushchee innovacionnoj ekonomiki Rossii. 2018. № 2. P. 161-163.
 17. Gandhidasan P., Ramamurthy K.N. Thermal performance analysis of pneumatic structures Energy. 1988. V. 13, iss. 5. P. 413-419.
 18. David Huang K., Sheng-Chung Tzeng. Development of a hybrid pneumatic-power vehicle Applied Energy. 2005. V. 80, iss. 1. P. 47-59.
 19. Kamiński Zbigniew. A simplified lumped parameter model for pneumatic tubes // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2017. V. 23, iss. 5. P. 523-535.
 20. Yan Shi, Guanwei Jia, Maolin Cai, Weiqing Xu. Study on the Dynamics of Local Pressure Boosting Pneumatic System. Mathematical Problems in Engineering. 2015. V. 2015. P. 1-11.
 21. Mukhopadhyay S. Parameter estimation from flowing fluid temperature logging data in unsaturated fractured rock using multiphase inverse modeling, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2009. SA94720. P. 57.
 22. Schuster T., Bradley M.S.A., Reed A.R. The dependence of power consumption of pneumatic conveying systems upon bulk material properties, pipeline bore and routing, and mode of flow. Proc. Instn Mech. Engrs, 1995. 209 (E1). P. 69-75.
 23. Hayes J.W., Reed A.R., Bradley M.S.A. Economics of pneumatic conveying systems-a case study. In Proceedings of the Fourth IEAust Conference on Bulk Materials Storage, Transport and Flow, Wollongong, New South Wales, Australia, July 1992. P. 49-53. (Institution of Engineers, Australia, Barton, Australia Capital Territory).
 24. Hartman M., Phořelý M., Trnka O. Transport velocities of different particulate materials in pneumatic conveying // Chemical Papers. 2006. V. 60. P. 74-77.
 25. Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F., Leung L.S. An overview of pneumatic conveying systems and performance. In: Pneumatic Conveying of Solids. Powder Technology Series. 1997. V. 8. Springer, Dordrecht.
 26. Fraige F., Langston P. Horizontal pneumatic conveying: a 3d distinct element model. Granular Matter 8, 67-80 (2006). URL: <https://doi.org/10.1007/s10035-005-0221-2>.
 27. 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.
 28. Safin R.G. Installation for the integrated processing of larch wood: pat. RF № 2655757; yayavl. 2017.07.05; opubl. 2018.05.29.