

Моделирование процесса измельчения и транспортирования органических отходов в установке производства активированного угля

Р.Г. Сафин^{1a}, Р.Р. Зиятдинов^{1b}, В.Г. Сотников^{1c}, Д.Г. Рябушкин^{1d}, Д.Р. Гумеров^{1e}, С.В. Чжан^{2f}

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, К. Маркса, 68, Казань, Россия

²Братский государственный университет, Макаренко, 40, Братск, Россия

^a safin@mail.ru, ^b radis226@rambler.ru, ^c vcvcvc12345678@gmail.com, ^d tabalcao@yandex.ru,

^e gumerov@mail.ru, ^f Schzan@rambler.ru

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

^c <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-9708-8990>

Статья поступила 9.04.2021, принята 14.04.2021

На сегодняшний день все более популярной становится переработка органических отходов, таких как древесная стружка, технологическая щепка, опилки, лужга подсолнечника, автомобильные шины, скорлупа грецкого ореха, семечки различных овощей и фруктов. В настоящее время, разрабатываются перспективные аппараты для переработки отходов с последующим получением полезных продуктов для хозяйственной деятельности. Попутно встает вопрос по измельчению и транспортированию этих отходов к месту их переработки. В частности, для установки производства активированного угля из сыпучих отходов необходимо спроектировать зоны измельчения и транспортирования. В работе на основе выбранного измельчителя 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 последующим вертикальным транспортированием сырья. Получена зависимость скорости витания от насыпной плотности частицы, результаты которой выявили значительное 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 частицы. Результатами этих зависимостей можно оперировать при создании или модернизации вертикальных пневмотранспортных систем, рассчитанных на небольшие объемы транспортируемого сырья.

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

Modeling the process of grinding and transporting organic waste in the installation designed for activated carbon production

R.G. Safin^{1a}, R.R. Ziatdinov^{1b}, V.G. Sotnikov^{1c}, D.G. Ryabushkin^{1d}, D.R. Gumerov^{1e}, S.V. Chzhan^{2f}

¹Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marks St., Kazan, Russia

²Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a safin@mail.ru, ^b radis226@rambler.ru, ^c vcvcvc12345678@gmail.com, ^d tabalcao@yandex.ru,

^e gumerov@mail.ru, ^f Schzan@rambler.ru

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

^c <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>,

^e <https://orcid.org/0000-0002-6202-5487>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-9708-8990>

Received 09.04.2021, accepted 14.04.2021

To date, organic waste is becoming increasingly popular, such as wood chips, technological chips, sawdust, sunflower husk, car tires, walnut shell, seeds of various vegetables and fruits. Currently, promising waste recycling devices are being developed with the subsequent receipt of useful products for economic activities. Along the way, the question arises in grinding and transporting this waste to the place of their processing. In particular, it is necessary to design zones of grinding and transportation for the installation of activated carbon from bulk waste. At work on the basis of the selected chopper, a pneumatic transport node of the supply of crushed organic waste into the installation of the production of activated carbon is modeled. Mathematical modeling of waste movement process, allowing to determine the rational parameters of the raw materials preparation zones. An algorithm for calculating a vertical pneumatic transport system has been developed, which can be used to calculate the technological processes associated with the need for feeding and subsequent vertical transportation of raw materials. The dependence of the thread rate from the bulk density of the particles was obtained, the results of which revealed a significant effect of the particle thickness at its rotation speed in the pneumatic conductor, as

well as the dependence of the diameter of the pipeline from the volume flow and the type of raw materials, which demonstrated an increase in the diameter of the pipeline with a decrease in the bulk density of the particles. The results of these dependencies can be operated when creating or upgrading vertical pneumatic transport systems, designed for small amounts 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 во многих других отраслях. Благодаря адсорбционным свойствам активированные угли дают возможность 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 [1-4].

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [5-10].

Измельчение и транспортирование отходов для этой установки требует дополнительных исследований.

Целью работы является 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 из накопителя 8 через барабанные питатели 9а-д в зоны сушки - 1, пиролиза - 2, активации - 3, охлаждения - 4 с превращением их в активированный уголь [11,12].

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 газодувкой 3, транспортируются вертикально вверх в накопитель, затем из накопителя дозируются в камеру сушки.

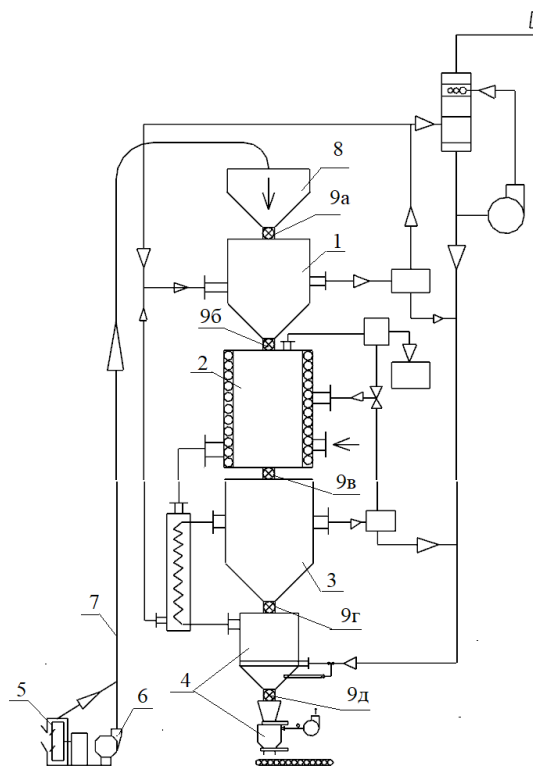


Рис. 1. Установка для производства активированного угля

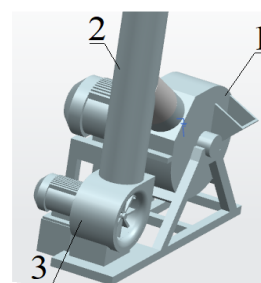


Рис. 2. Зоны измельчения и транспортирования отходов

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

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

Таблица 1. Измельчительные машины.

Наименование оборудования	Производительность Q, м ³ /ч	Размер получаемой частицы, 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 измельчения отходов. Для того чтобы не было простоев в установке, при выборе измельчительной машины должно выдерживаться условие $Q_m < Q$. После измельчения отходов их подают в транспортный трубопровод и транспортируют в зону сушки.

В вертикальном трубопроводе скорость потока частиц при установившемся движении аэросмеси рассчитывается по соотношению 1 [13]

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

где

w_T - скорость транспортируемых частиц;

w - скорость движения газа;

w_b - 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 [14].

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

где

w_b – скорость витания щепы;

p - насыпная плотность частиц, кг/м³;

p_g - плотность воздуха (газа), кг/м³;

h - толщина частицы, мм.

Φ - коэффициент формы частицы [14].

Размеры и коэффициент формы частиц представлены в таблицах 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 Φ .

Тип частицы	Числовое значение, 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 [13].

Таблица 4. Скорость движения газа в вертикальном трубопроводе

Тип частицы	w , м/с
Опилки	14-16
Стружка	17-18
Технологическая щепа	25-30

Диаметр трубопровода рассчитывается по формуле

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

где

Q_v - расход газа на транспортирование [м³/с];

затем выбирается его стандартное значение по ГОСТу.

Найдем расход газа Q_v по соотношению

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

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, в частности, для пневмотранспортных установок низкого давления оно составляет $X_m=0.1-1.5$ кг/кг. Данная концентрация также различается в зависимости от типа транспортируемых отходов, рекомендуемые значения приведены в табл. 5 [14].

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: вид газа, с какой температурой и плотностью он поступает в трубопровод. В нашем случае транспортирующим агентом является воздух, подаваемый воздуходувкой, с температурой 20°C и плотностью $\rho_g=1.2$ кг/м³.

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

$$w_d = Q_v / S \quad (5)$$

Действительная скорость газа должна совпадать с расчетной или превышать ее не более чем на 8% [13].

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

При подборе газодувки нужно знать высоту, на которую транспортируются частицы L_t , м.

Рассчитав скорость транспортирования и диаметр трубопровода, можно произвести подбор воздуходувки, различные типы которых приведены в табл. 6. Основными параметрами, которыми стоит руководствоваться при выборе воздуходувки, является 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 газодувки	Избыточное давление P, кПа	Производительность V, м³/мин
Ротационные серии DR	от 10 до 110	От 0,3 до 500
Центробежные (компрессоры) ЭФ200	от 10 до 80	От 13 до 45
ВЦ-ССМ	от 30 до 103	От 0,6 до 37,5

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

$$\tau_{тр} = L_T / w_T \quad (7)$$

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

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

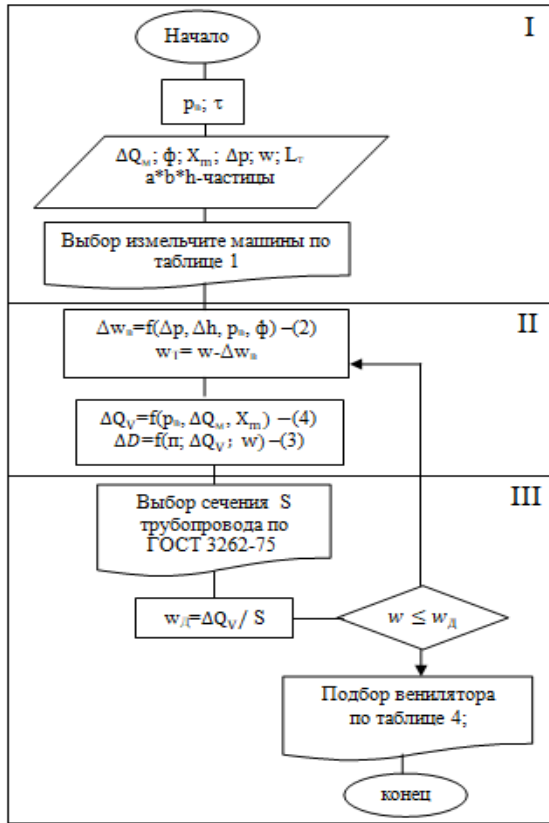


Рис. 3. Алгоритм расчета зон измельчения и транспортирования частиц

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 происходит сверка расчетных данных и выдача рекомендаций по выбору аппаратного оформления для пневмотранспортного узла.

Разработанный алгоритм позволяет проводить расчеты для вертикальных пневмотранспортных систем с различными дисперсными материалами.

Результаты моделирования. Моделирование проводилось с целью нахождения рациональных парамет-

ров оборудования для зон измельчения и транспортировки.

Результатом моделирования скорости витания частицы w_e от насыпной плотности ρ стало построение в пакете Matkhad 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.

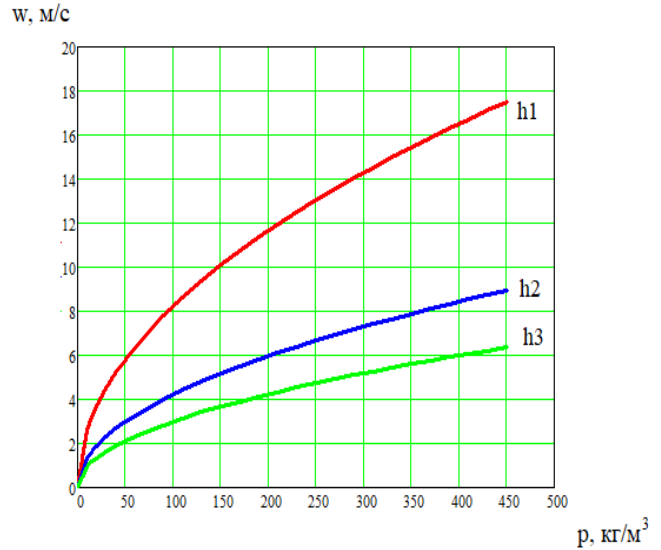


Рис. 4. Зависимость скорости витания от насыпной плотности частиц $h1=5$ мм- щепа; $h2=1$ мм- стружка; $h3=0,5$ мм- опилки

Из зависимости диаметра трубопровода от объемного расхода газа (рис. 5) видно, что при равных объемных расходах сырья 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 и за счет этого имеют более высокие числовые значения диаметра трубопровода.

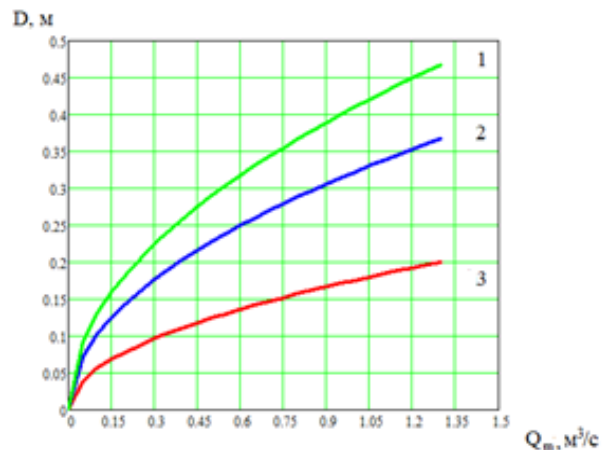


Рис. 5. Зависимость диаметра трубопровода от объемного расхода сырья на транспортировку: 1- опилки; 2-стружка; 3-щепа

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_6 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 транспортирования сыпучих органических отходов по пневмотранспортной системе, на при-

мере отходов деревопереработки. По результатам расчета модели спроектированы зоны измельчения и транспортирования отходов для непрерывно действующей установки производства активированного угля и выстроен алгоритм расчета пневмотранспортных систем.

В ходе исследований получены зависимости скорости витания от насыпной плотности частиц и диаметра трубопровода от объемного расхода сырья на транспортирование 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.
- 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.
- Зиятдинов Р.Р., Степанова Т.О., Зиятдинова 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.
- Зиятдинов Р.Р., Сафин Р.Г., Степанова Т.О., Зиятдинова 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., Зиятдинова 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., Зиятдинов 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 // 2020 Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387.
- Сафин Р.Г. Способ получения активированного угля: пат. Рос. Федерация № 2694347, 11.07.2019 МПК С 10 В 53/00.; заяв. 12.23.2019; опубл. 09.07.2020.
- Степанова Т.О., Сафин Р.Г., Рябушкин Д.Г. Шахтная установка пирогенетической переработки древесных отходов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы- 2018 (МНТК «ИМТОМ-2018»): материалы IX Междунар. науч.-технической конф. Казань: ООО «Фолиант», 2018. Ч. 2. С. 107-111.
- Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств. 4-е изд., испр. и перераб. СПб.: Лань, 2020. 752 с.
- 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. Бюл. науч.-технической и экологической информ. 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.) / отв. за вып.: А.П. Тюрин, А.Н. Домбрачев. 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.
- 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 Z. 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. (3). 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).
29. Hartman M., Phořelý M., Trnka O. Transport velocities of different particulate materials in pneumatic conveying- Chemical Papers. 2006. V. 60. P. 74-77.
 30. 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.
 31. Fraige F., Langston P. Horizontal pneumatic conveying: a 3d distinct element model. Granular Matter 2006. № 8. P. 67-80.

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 // Forestry Bulletin. 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. 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 // Derevoobrabatativaushaya 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 // Derevoobrabatativaushaya 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 processing process // Proceedings of the higher 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. Design calculation of the pyrolysis zone of the activated carbon production plant // Derevoobrabatativaushaya 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 // 2020 Proceedings of the 5 th international Conference on Industrial Engineering: Lecture Notes in Mechanical Engineering 387.
11. Safin R.G. Method for producing activated carbon: pat. Ros. Federaciya № 2694347, 11.07.2019 MPK S 10 B 53/00.; zayav. 12.23.2019; opubl. 09.07.2020.
12. Stepanova T.O., Safin R.G., Ryabushkin D.G. Mine plant for pyrogenetic processing of wood waste // Innovacionnye mashinostroitel'nye tekhnologii, oborudovanie i materialy- 2018 (MNTK «IMTOM-2018»): materialy IX Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. Kazan': OOO «Foliant», 2018. CH. 2. P. 107-111.
13. Safin R.G. Technological processes and equipment of wood-working industries. 4-e izd., ispr. i pererab. SPb.: Lan', 2020. 752 p.
14. Kuznecov V.S., Denisov S.V. Pneumatic transport in wood-working factories. External pneumatic conveying installations. Bratsk: BrGU, 2007. 67 p.
15. Voronin YU.B. Pneumatic transport of shredded wood. M.; Lesnaya prom-st', 1977. 208 p.
16. Zeman D.A., SHishkin S.F., SHishkin A.S., Barakovskih D.S. Experimental determination of the relative velocity of particles in pneumatic transport conditions // Vestn. BGТУ im. V.G. SHuhova. 2017. № 6. P. 110-114.
17. Drozdov B.S., Stefanenko V.T. Pneumotransport systems // Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information. 2016. № 6. P. 67-69.
18. 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.) / otv. za vyp.: A.P. Tyurin, A.N. Dombrachev. Izhevsk, 2015. P. 865-869.
19. 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.
20. Kuznecov YU.M. Pneumatic transport: theory and practice. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. 60 p.
21. 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.
22. Gandhidasan P., Ramamurthy K.N. Thermal performance analysis of pneumatic structures Energy, 1988. V. 13. iss. 5. P. 413-419.
23. David Huang K., Sheng-Chung Tzeng. Development of a hybrid pneumatic-power vehicle Applied Energy. 2005. V. 80. iss. 1. P. 47-59.
24. Kamiński Z. A simplified lumped parameter model for pneumatic tubes // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2017. V. 23. iss. 5. P. 523-535.
25. Yan Shi, Guanwei Jia, Maolin Cai, Weiqing Xu. Study on the Dynamics of Local Pressure Boosting Pneumatic System Mathematical Problems in Engineering. 2015. (3). P. 1-11.
26. 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.
27. 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.
28. 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).
29. Hartman M., Phořelý M., Trnka O. Transport velocities of different particulate materials in pneumatic conveying- Chemical Papers. 2006. V. 60. P. 74-77.
30. 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.
31. Fraige F., Langston P. Horizontal pneumatic conveying: a 3d distinct element model. Granular Matter 2006. № 8. P. 67-80.