

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

Р.Г. Сафин, А.С. Родионов✉, В.Г. Сотников,
Д.Ф. Зиатдинова, Н.Ф. Тимербаев

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), Россия, 420015,
Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

rodionov2014@bk.ru

Представлена технологическая схема установки производства активированного угля, узла конвективной сушки; экспериментальной установки для исследования процесса конвективной сушки. Изложены методики расчета и исходные данные. Представлены результаты математического моделирования процесса конвективной сушки для технологической линии производства активированного угля. Получены динамические кривые температуры и влажности материала, которые позволяют рекомендовать технологические параметры для установки. Проведена апробация математической модели, подтверждающая адекватность разработанной модели.

Ключевые слова: пиролиз, вторичное сырье, активированный уголь, сушка, моделирование, конвективный теплообнос

Ссылка для цитирования: Сафин Р.Г., Родионов А.С., Сотников В.Г., Зиатдинова Д.Ф., Тимербаев Н.Ф. Моделирование процесса сушки вторичного сырья в технологической линии производства активированного угля // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 117–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-117-127

Ежегодно в отходы поступает несколько десятков миллионов тонн органических коммунальных и промышленных отходов лесопромышленного (ЛПК) и агропромышленного (АПК) комплексов. Биоразлагаемые отходы чаще всего сжигают или зарывают в почву. Процессы биодеградации в почве протекают очень медленно, приводят к образованию газов и вызывают утечку токсичных веществ. Газы, сопровождающие процессы разложения, улавливаются дренажными системами лишь частично, а, смешиваясь с воздухом, способствуют развитию парникового эффекта. В связи с этим разрабатываются правовые нормы, направленные на постепенное сокращение объемов захоронения биоразлагаемых отходов, вплоть до полного запрета. Таким образом, актуальность приобретает альтернативная утилизация биоразлагаемых отходов на базе производства активированного угля из вторичного сырья [1].

Активированный уголь является адсорбентом, который используется для очистки газов и жидкостей. Его свойства обусловлены большой удельной поверхностью и сильно развитой пористой структурой (обычно микропористой), обеспечивающей отличную сорбционную способность в отношении широкого спектра веществ: как неорганических (например, ионов металлов), так и органических (спиртов и эфирных раство-

рителей). Сырьем для производства активированного угля может служить любое органическое вещество, содержащее углерод. Принимая во внимание высокую стоимость производства активированного угля из ископаемого угля, экономический и экологический аспекты, в последнее время большое внимание уделяется производству активированного угля из вторичного сырья растительного происхождения. Отходы ЛПК и АПК признаны легкодоступными, возобновляемыми и недорогими, поэтому производимый из них активированный уголь имеет высокий коммерческий потенциал [2, 3].

На кафедре переработки древесных материалов КНИТУ на основе экспериментальных исследований разработана установка термохимической переработки вторичного сырья в активированный уголь [4, 5]. Важным этапом подготовки сырья к термической переработке является его сушка топочным газом. Влага, содержащаяся в сырье, имеет высокую теплоемкость, которая заметно увеличивает время прогрева на стадии пиролиза. Для выявления оптимальных режимов конвективной сушки необходима разработка математической модели процесса, на основании которой можно проводить конструкторский расчет узла сушки.

Цель работы

Цель работы — разработка математической модели и моделирование процесса конвективной

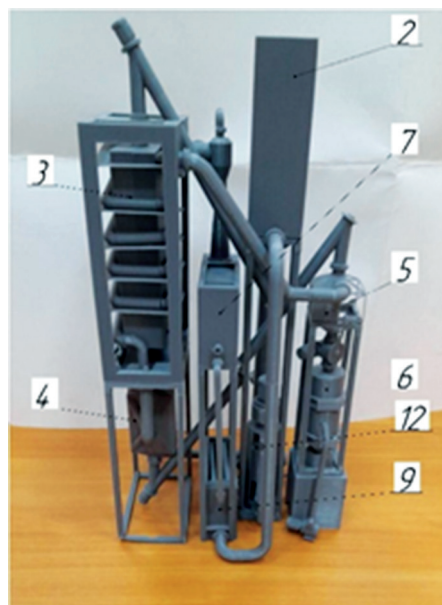
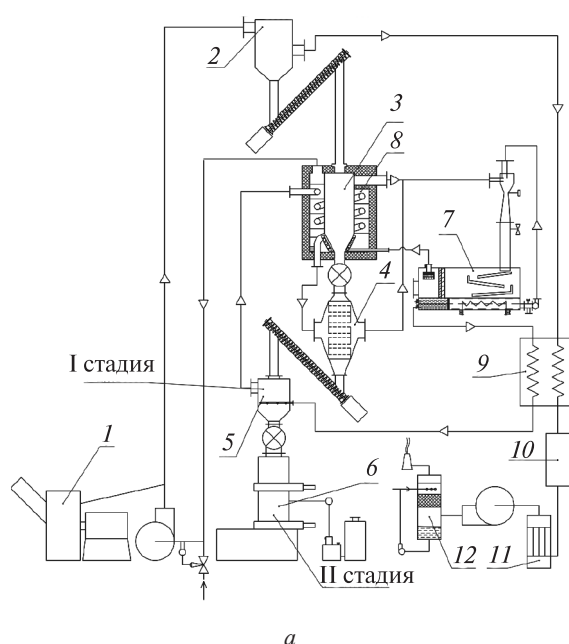


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) установки для производства активированного угля: 1 — измельчитель; 2 — узел конвективной сушки; 3 — пиролизная камера; 4 — камера активации; 5, 6 — первая и вторая стадии охлаждения активированного угля; 7 — эжекционный сепаратор; 8 — рубашка пиролизной камеры; 9 — теплообменник; 10–12 — электрический, рукавный, абсорбционный фильтры соответственно

Fig. 1. Schematic diagram (a) and appearance (б) of the plant for the production of activated carbon: 1 — shredder; 2 — convective drying unit; 3 — pyrolysis chamber; 4 — activation chamber; 5, 6 — first and second cooling stages of the activated carbon; 7 — ejection separator; 8 — jacket of pyrolysis chamber; 9 — heat exchanger; 10–12 — electric, bag and absorption filters, respectively

сушки сыпучего вторичного сырья для выявления рациональных режимов организации процесса его сушки в установке по производству активированного угля.

Материалы и методы исследования

Непрерывно действующая установка для производства активированного угля (рис. 1) работает следующим образом. Вторичное сырье измельчается в дисковом измельчителе 1, сушится топочными газами в узле конвективной сушки 2. В камере пиролиза 3 высушенное сырье кондуктивно пиролизуется в уголь с выделением пиролизных газов. Активация угля проходит в камере активации 4 перегретым водяным паром с выделением горючих газов активации. Активированный уголь охлаждается в две стадии: орошением водой (I стадия) с выделением водяного пара и понижением давления (II стадия). Газы, образовавшиеся в результате пиролиза, из пиролизной камеры и горючие газы активации из камеры активации сепарируются в эжекционном сепараторе 7 на жижку, воду и горючие газы, последние сжигаются в рубашке 8 пиролизной камеры. Отсепарированная вода, предварительно нагретая топочными газами в теплообменнике 9, охлаждает активированный уголь на первой ста-

дии охлаждения. Топочными газами перегревают пар с первой стадии охлаждения угля, нагревают пиролизную камеру и конвективно сушат измельченное сырье. Отработанные топочные газы последовательно очищаются в электрическом 10, рукавном 11, абсорбционном 12 фильтрах [6].

Узел конвективной сушки более подробно представлен на рис. 2. Сушка измельченного вторичного сырья происходит в два этапа — при пневмотранспортировке в трубопроводе I и в сушильной камере II. Измельченное сырье с начальной температурой T_{c_0} и влажностью U_{c_0} пневмотранспортируется и сушится сухими топочными газами с температурой $T_{г_0}$ и влажностью $\Phi_{г_0}$, нагнетаемыми газодувкой 2. Вторичное сырье, попав в сушильную камеру II, перемещается вращением S-образных лопастей 3 по перфорированным тарелкам 4, 5 с выгрузочными отверстиями в центре и на периферии 6, 7. Вследствие постоянного перемешивания высушиваемое сырье равномерно прогревается и высушивается. Лопастями S-образной формы жестко закреплены на валу 8 и приводятся в движение приводом 9. Перфорированный конус 10 отделяет влажный топочный газ с температурой $T_{гк}$ и влажностью $\Phi_{гк}$ от высушенного сырья. Высушенное сырье с температурой $T_{ск}$ и влажностью

$U_{с.к}$ выгружается шнековым питателем 11. Продолжительность сушки регулируется скоростью вращения S-образных лопастей 3 и зависит от размеров частиц высушиваемого материала и его влагосодержания. Скорость вращения S-образных лопастей 3 может изменяться частотным преобразователем или установленным вариатором [4, 7].

Для исследования процесса конвективной сушки и проверки адекватности математической модели конвективной сушки была разработана экспериментальная установка (рис. 3). Высушиваемые образцы 1, зажимаются в держателе 2, жестко закрепленном на прутке 3, и подвешиваются на захватах 4 на расстоянии 10 мм от перфорированного дна 5. Это необходимо для равномерного процесса сушки образцов 1. В качестве сушильного агента применяется воздух, который нагнетается вентилятором 6 и нагревается электронагревателем 7. Терморегулятор 8 и термомпара 9 поддерживают заданную температуру сушильного агента. Скорость потока сушильного агента изменяется регулятором оборотов 10. Для уменьшения тепловых потерь корпус сушильной камеры покрыт теплоизоляцией 11, температура в центре образца измеряется термомпарой 12 [8].

Подготовка эксперимента включала в себя изготовление образцов высушиваемого материала в виде пластин квадратной формы размерами 50×50 мм и толщиной 0,5, 2, 4 и 6 мм. Для создания точки отсчета один образец высушивался до постоянной массы в вакуумной сушилке. Далее по формуле определялась начальная влажность всех образцов

$$U_{m_0} = \frac{m_{в.м} - m_{с.м}}{m_{в.м}}, \quad (1)$$

где $m_{в.м}$ — масса влажного материала, г;

$m_{с.м}$ — масса сухого материала, г.

Зная начальную массу всех образцов, можно вычислить ожидаемую конечную массу образцов без досушки до постоянной массы и определить текущее влагосодержание образцов в процессе сушки [6].

$$m_{с.м_i} = m_{в.м_i} - m_{в.м_i} \cdot U_{m_0}. \quad (2)$$

Для определения экспериментальных значений влажности и температуры по сечению в процессе конвективной сушки древесины сосны готовили три комплекта по четыре образца: первый комплект — из четырех образцов толщиной 12,5 мм (см. рис. 3, в), собранных из двух пластин размером 50×50×6 мм с контрольным элементом между ними в виде строганного соснового шпона толщиной 0,5 мм. У шпона есть выемка по центру, в которую помещается горячий спай термомпары хромель-копель, провода термомпары прикладываются между шпоном и одной из пла-

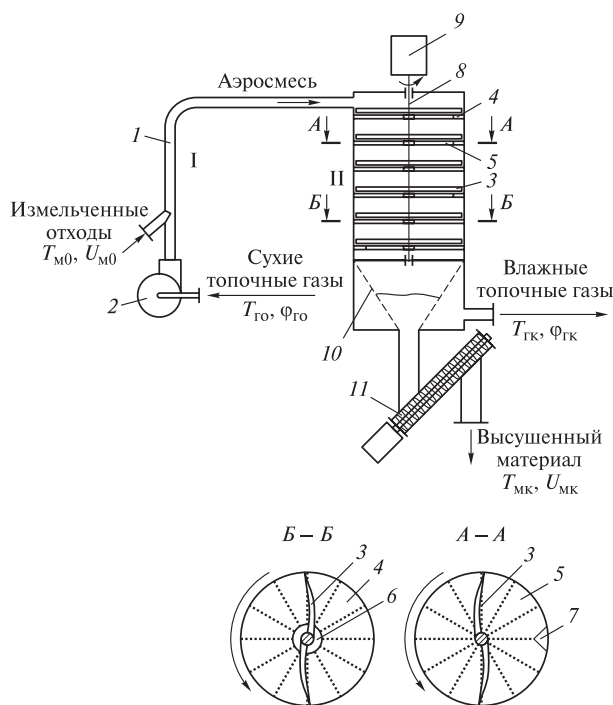


Рис. 2. Узел конвективной сушки в технологической линии производства активированного угля: I — трубопровод; II — сушильная камера; 1 — трубопровод; 2 — газодувка; 3 — S-образные лопасти; 4, 5 — четные и нечетные тарелки соответственно; 6, 7 — центральное и периферийное выгрузочное отверстие; 8 — вал; 9 — привод; 10 — перфорированный конус; 11 — шнековый питатель

Fig. 2. Unit of convective drying in the technological line of activated carbon production: I — pipeline; II — drying chamber; 1 — pipeline; 2 — gas blower; 3 — S-shaped blades; 4, 5 — even and odd plates, respectively; 6, 7 — the central and peripheral discharge holes; 8 — shaft; 9 — drive; 10 — perforated cone; 11 — screw feeder

стин. Подобным образом изготавливаются еще два комплекта из пластин толщиной 2 и 4 мм.

Подготовленные 12 образцов из указанных пластин скрепляли под прессом заклепками, с торцов закрасивали. Комплекты образцов помещали в прогретую экспериментальную установку (см. рис. 3, а), обрабатывали сушильным агентом с температурой 235 °С при скорости теплоносителя 2 м/с и фиксировали текущую температуру в центре сечения образцов. Влажность внутри образцов определяли путем поочередного извлечения одного образца с каждого комплекта с интервалом 5 мин с дальнейшим взвешиванием контрольного шпона.

Отработанные топочные газы из пиролизной зоны (см. рис. 1) имеют температуру 250 °С и используются для пневмотранспортирования влажного вторичного сырья с начальной влажностью 60 %, от измельчителя в сушильную камеру (см. рис. 2). В результате тепловых потерь при пневмотранспортировании температура топочного газа снижается до 235 °С, поэтому при

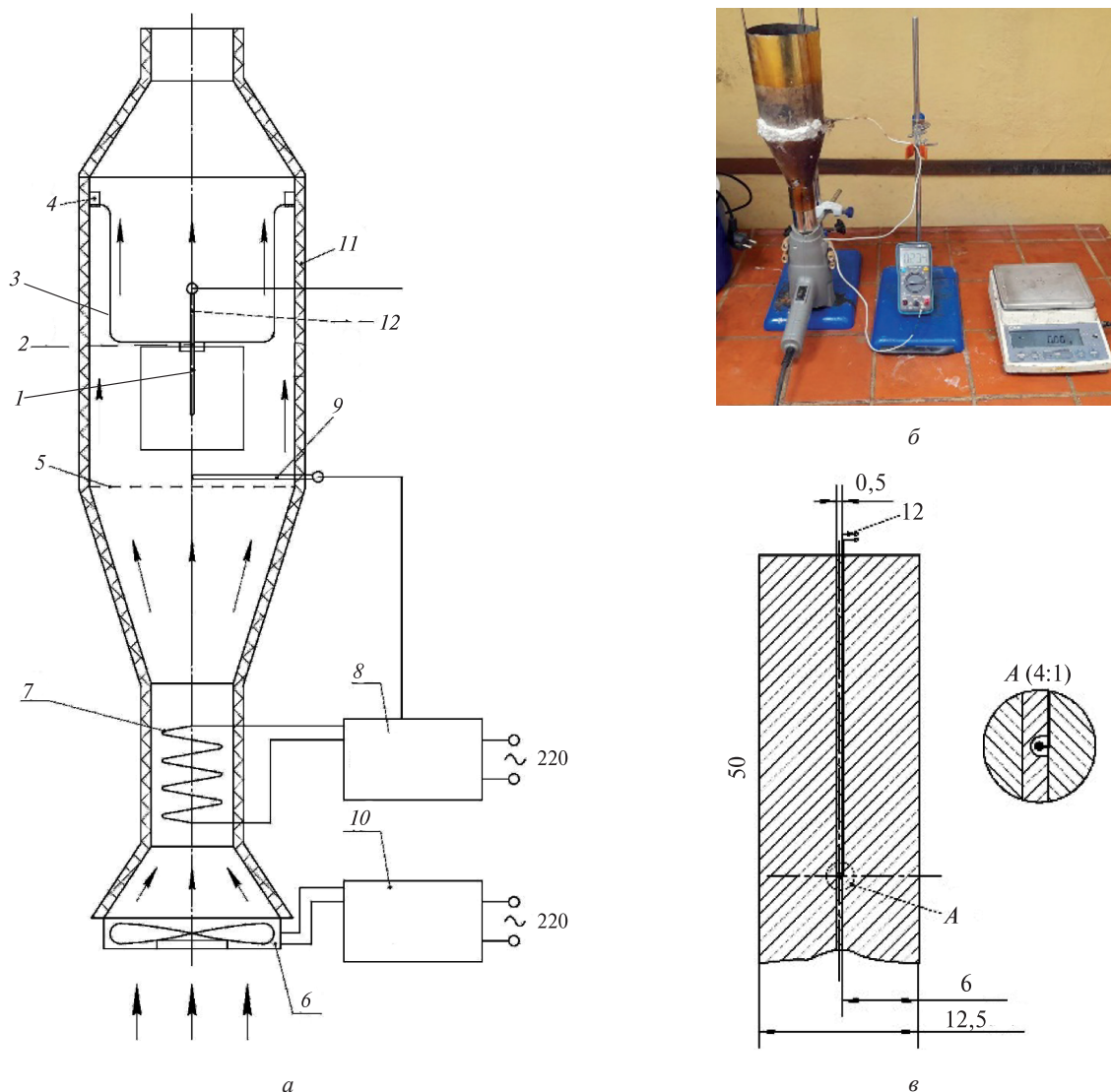


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования процесса конвективной сушки: *a* — схема; *б* — внешний вид; *в* — образец толщиной 4 мм: 1 — высушиваемый материал; 2 — держатель; 3 — пруток; 4 — захваты; 5 — перфорированное дно; 6 — вентилятор; 7 — электронагреватель; 8 — терморегулятор; 9 — термопара для измерения температуры сушильного агента; 10 — регулятор оборотов лопастей вентилятора; 11 — теплоизоляция; 12 — термопара для измерения температуры внутри образца

Fig. 3. Experimental unit to study the process of convective drying: *a* — scheme; *б* — external view; *в* — sample of 4 mm thickness: 1 — material to be dried; 2 — holder; 3 — rod; 4 — grips; 5 — perforated bottom; 6 — fan; 7 — electric heater; 8 — thermostat; 9 — thermocouple for measuring temperature of drying agent; 10 — fan blade speed controller; 11 — thermal insulation; 12 — thermocouple for measuring temperature inside sample

проведении экспериментального исследования температура сушильного агента составила 235 °С. Скорость теплоносителя 2 м/с определялась из априорной информации, исходя из расхода топочного газа и выбранного сечения сушильной камеры.

Математическое моделирование процесса конвективной сушки сыпучего вторичного сырья предполагает нахождение нестационарного поля влагосодержания сырья по сечению материала на основе решения системы дифференциальных уравнений теплопереноса, записанных для бесконечной пластины [9, 10]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = K \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + K \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{\tau} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где U — влажность высушиваемого материала, кг/кг;
 τ — время, с;
 K — коэффициент влагопроводности, м²/с;
 δ — термоградиентный коэффициент, кг/(кг·К);
 T — температура высушиваемого материала, °С;
 a_{τ} — коэффициент температуропроводности, м/с²

Начальные условия системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса задаются исходными значениями влажности U_{c_0} и температуры высушиваемого материала T_{c_0} [11]

$$U(x; 0) = U_{c_0}; \quad (5)$$

$$T(x; 0) = T_{c_0}. \quad (6)$$

Условия на границе высушиваемой частицы можно записать граничным условием 3-го рода и уравнением Фрейндлиха соответственно

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(T_{т.г} - T_{п}); \quad (7)$$

$$U(\tau; 0) = U_{п} = a\varphi_{г}^n, \quad (8)$$

где λ — теплопроводность, Вт/м²·°С;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;
 $T_{т.г}$ — температура топочного газа, °С;
 $T_{п}$ — температура топочного газа на поверхности, °С;
 $U_{п}$ — влагосодержание на поверхности, %;
 a, n — экспериментальные коэффициенты;
 $\varphi_{г}$ — влагосодержание топочного газа.

Схема краевых условий для решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса представлена на рис. 4.

Из краевых условий видно, что при конвективной сушке влага стремится к поверхности, а тепловой поток от сушильного агента — в глубь материала, оказывая сопротивление движению влаги.

Исходные данные для математического моделирования процесса сушки соснового шпона представлены в таблице [12].

Анализ литературных данных [13] показал, что коэффициент температуропроводности древесины зависит от его влажности (рис. 5).

Как следует из рис. 5, с уменьшением влажности древесины сосны коэффициент температуропроводности увеличивается и, как следствие, интенсифицируется процесс прогрева. Методом наименьших квадратов [14] было получено уравнение регрессии, установившее эту зависимость:

$$a_{т} = -6 \cdot 10^{-15} U^3 + 2 \cdot 10^{-12} U^2 - 2 \cdot 10^{-10} U + 1,46 \cdot 10^{-7}. \quad (9)$$

Также анализ литературных данных показал что коэффициент влагопроводности зависит от температуры (рис. 6).

На основании графика, представленного на рис. 6, можно предположить, что по мере прогрева процесс удаления влаги ускоряется [15–18]. Кроме того, обработка линейной зависимости позволила получить уравнение регрессии:

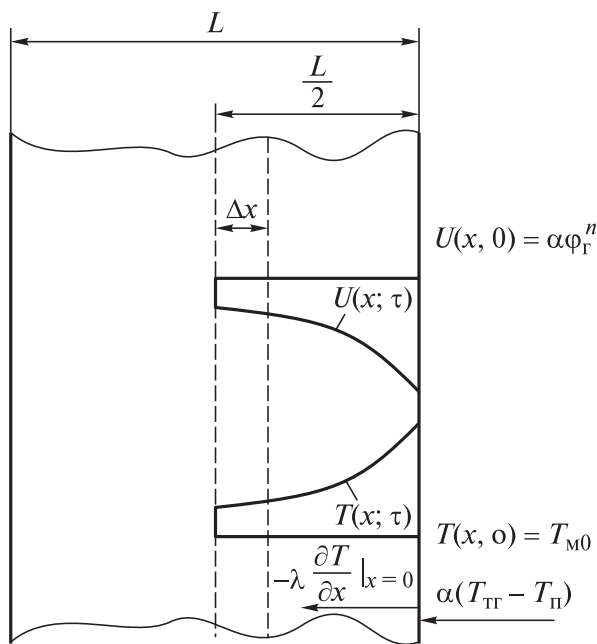


Рис. 4. Схема начальных и граничных условий конвективной сушки сыпучего вторичного сырья

Fig. 4. Scheme of initial and boundary conditions of convective drying of bulk secondary raw materials

Вводные параметры для математического моделирования процесса конвективной сушки соснового шпона

Input parameters for mathematical modeling of convective drying of pine peeled veneer

Исходные данные	Числовое значение
Шаг по координате Δx , м	0,006
Шаг по времени Δt , с	10
Коэффициент теплоотдачи, для ламинарного движения топочного газа α , Вт/м ² ·°С	30
Термоградиентный коэффициент δ , кг/(кг·К)	0,05
Теплопроводность λ , Вт/м ² ·°С	0,15
Коэффициент уравнения Фрейндлиха a	1,35
Коэффициент уравнения Фрейндлиха n	1

$$K = 6,875 \cdot 10^{-14} \cdot T + 0,375. \quad (10)$$

Полученные уравнения 9, 10 используются для расчета коэффициентов при математическом моделировании.

Результаты исследования

Получены расчетные и экспериментальные кривые температуры и влажности древесины сосны с начальной влажностью 60 % при сушке теплоносителем с температурой 235 °С и влажностью 5,3 % при скорости обтекания 2 м/с (рис. 7).

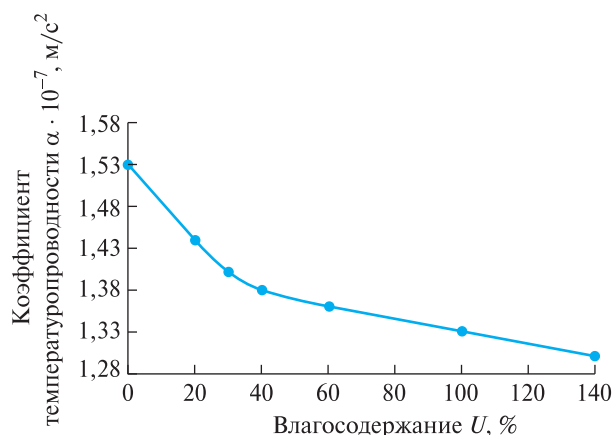


Рис. 5. Зависимость коэффициента температуропроводности древесины сосны от влажности

Fig. 5. Dependence of pine wood thermal conductivity coefficient on humidity

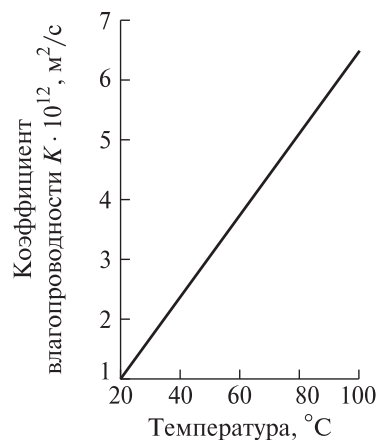


Рис. 6. Зависимость коэффициента влаготеплопроводности от температуры шпона сосны

Fig. 6. Dependence of the coefficient of moisture conductivity on the temperature of pine peeled veneer

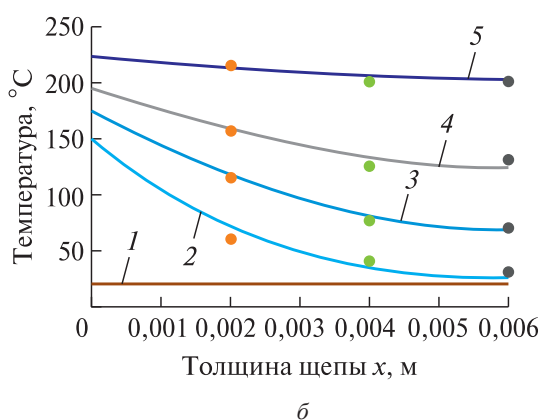
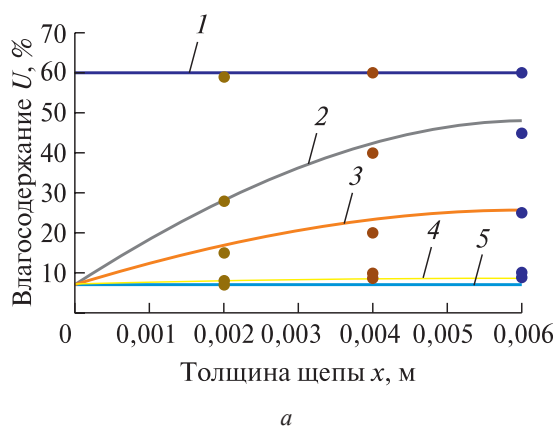


Рис. 7. Диаграмма влаготеплопроводности (а) и температуры (б) соснового шпона: время τ , мин: 1 — 0; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15; 5 — 20

Fig. 7. Moisture content diagram (a) and temperature diagram (b) for pine veneer: time τ , min: 1 — 0; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 15; 5 — 20

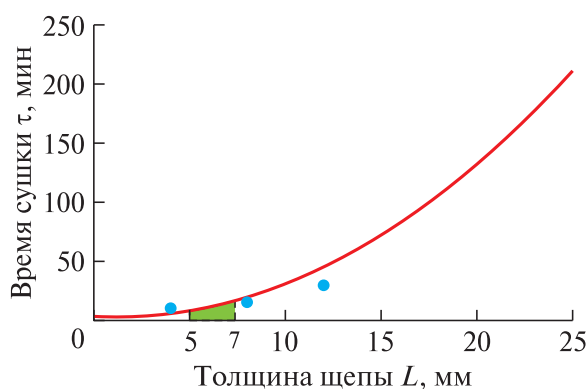


Рис. 8. Зависимость продолжительности процесса сушки от толщины древесных частиц

Fig. 8. Dependence of drying process duration on thickness of wood particles

С помощью метода конечных разностей с использованием языка визуального и объектно-ориентированного программирования Visual Basic for Applications.

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 15 %, что позволяет моделировать процесс сушки вторичного сырья с помощью представленной модели.

Анализ температурных зависимостей (см. рис. 7, б) показывает, что через 15 мин температура поверхности образца достигает 180 °C и начинается переход от процесса сушки к процессу термомодификации с выделением горючих газов. В связи с этим через 15 мин, для сокращения выбросов продуктов разложения древесины следует понизить температуру теплоносителя до 180 °C, т. е. сырье с влажностью 60 % на верхней нечетной тарелке (см. рис. 2) не может находиться более 15 мин. Это приведет, в дальнейшем, к снижению градиента температуры, препятствующего движению влаги и повышению скорости локального изменения влажности материала [19–23].

На рис. 8 представлена зависимость продолжительности сушки древесины сосны от толщины частиц вторичного сырья.

Данная зависимость (см. рис. 8) позволяет определить рациональное время нахождения древесных отходов в зоне сушки и рекомендовать режимы сушки.

Анализ кривой показывает, что при толщине древесных частиц свыше 7 мм заметно увеличивается требуемое время сушки, поэтому удаление влаги в предлагаемой тарельчатой сушилке целесообразно проводить при толщине вторичного сырья в пределах 5...7 мм.

Результаты моделирования позволяют рекомендовать режимы сушки вторичного сырья в виде древесных отходов на технологической линии по производству активированного угля и конструктивные размеры аппаратного оформления зоны сушки. Установлено, что при сушке древесных отходов толщиной менее 5 мм можно использовать высокотемпературный режим удаления влаги с температурой сушильного агента более 250 °С. При толщине вторичного сырья более 7 мм целесообразно применять сушильный агент с температурой менее 250 °С [24–27].

Выводы

В результате моделирования процесса конвективной сушки древесного сырья в технологической линии производства активированного угля, установлена возможность использования отработанного топочного газа из пиролизной камеры для предварительного обезвоживания влажного вторичного сырья. При этом время его нахождения на первой нечетной тарелке сушильной камеры определяется размерами измельченных частиц и не должно превышать 15 мин. Разработанную конструкцию тарельчатой сушильной камеры целесообразно использовать при толщине измельченного сырья в пределах 5...7 мм, при толщине частиц более 7 мм рекомендуется применение сушилок шахтного типа.

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

Список литературы


[1] Сафин Р.Г. Пирогенетическая переработка органических отходов. Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. 104 с.
 [2] Загиров А.Н., Сотников В.Г., Сафин Р.Г. Переработка органических отходов в пиролизное топливо. Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. 92 с.
 [3] Степанова Т.О. Пирогенетическая переработка древесных отходов в активированный уголь: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Казань, 2021. 138 с.
 [4] Патент № 2780782 Российская Федерация, МПК F23G 5/027 (2006.01), В09В 3/30 (2022.01), В09В 3/40 (2022.01), В09В 3/10 (2022.01). Способ переработки твердых бытовых отходов / Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Хайруллин И.Ф., Родионов А.С., Ильясов И.Р., зая-

витель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ», № 2021138318; заявл. 22.12.2021; опубл. 30.09.2022, Бюл. № 28. 8 с.
 [5] Патент № 2 783 823 Российская Федерация, МПК C10B 49/10 (2006.01) C10G 9/00 (2006.01) B01J 8/00 (2006.01). Установка для производства пиролизного топлива / Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Загиров А.Н., Родионов А.С., Мифтахов Р.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ», № 2021138320; заявл. 22.12.2021; опубл. 18.11.2022. Бюл. № 22. 7 с.
 [6] Патент № 2 789 699 Российская Федерация, МПК C01B 32/324 (2017.01) C10B 53/00 (2006.01) Способ получения активированного угля / Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Родионов А.С., Хайруллин И.Ф., Загиров А.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ», № 2021135547; заявл. 03.12.2021; опубл. 07.02.2023. Бюл. № 4. 9 с.
 [7] Гороховский А.Г. Аналитическое определение величины параметров влагопереноса при сушке древесины // Хвойные бореальной зоны, 2018. № 4. С. 344–349.
 [8] Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 423 с.
 [9] Хасаншин Р.Р. Термическое модифицирование древесного наполнителя в производстве композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. Казань, 2020. 424 с.
 [10] Максименко В.А., Евдокимов В.С., Калита В.С. Разработка метода низкотемпературной сушки древесины // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 26–29 февраля 2020 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 176–177.
 [11] Кантышев А.В., Колесников Г.Н. Продолжительность и скорость конвективной сушки древесины осины / Повышение эффективности лесного комплекса // Материалы V Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводский государственный университет, 22 мая 2019 г. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2019. С. 45–47.
 [12] Брагин Д.М., Позолотин А.П., Будин А. Г. Продолжительность и скорость конвективной сушки древесины осины // Общество. Наука. Инновации (НИК–2018): Сб. статей XVIII Всерос. науч.-практ. конф.: в 3 т., Киров, Вятский государственный университет, 02–28 апреля 2018 г. Киров: Изд-во Вятского ГУ, 2018. С. 1173–1176.
 [13] Платонов А.Д., Платонова А.С. Особенности нестационарного теплообмена в термохимически обработанной древесине // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2015. Т. 3. № 7-2 (18-2). С. 349–353.
 [14] Башкинова Е.В., Егорова Г.Ф., Заусаева А.А. Численные методы и их реализация в Microsoft Excel. Ч. 1: Лабораторный практикум по информатике. Самара: Изд-во Самарского ГТУ, 2009. 44 с.
 [15] Пономарев В.С., Кашеварова Г.Г. Численное моделирование процесса сушки древесины // Современные технологии в строительстве. Теория и практика, 2022. Т. 1. С. 429–434.
 [16] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Аналитическое определение величины параметров влагопереноса при сушке древесины // Хвойные бореальной зоны, 2018. Т. 36. № 4. С. 344–349.
 [17] Костарев С.Н., Серeda Т.Г. Безопасные технологии управления сушкой древесины // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, Юрга, Национальный

- исследовательский Томский политехнический университет, Юргинский технологический институт, 22–24 ноября 2018 г. Юрга: Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2018. С. 75–79.
- [18] Кантышев А.В., Колесников Г.Н. Моделирование сушки древесины ивы как биотоплива // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: Сб. статей XVII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч.; Пенза, 27 мая 2019 г. Ч. 1. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 185–188.
- [19] Ампилогов В.А. Математическое моделирование процессов тепло-массопереноса при сушке древесины // Технические науки: проблемы и решения: Сб. статей по материалам LX Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 17 мая 2022 года. Т. 5 (55). М.: Интернаука, 2022. С. 33–43. DOI 10.32743/2587862X.2022.5.55.338405
- [20] Колесников Г.Н., Кантышев А.В., Зайцева М.И., Гаврилов Т.А., Никонова Ю.В. Конвективная сушка осинового заготовок малой толщины: модель и эксперименты // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 3. С. 87–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-87-94
- [21] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления сушкой пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 1 (49). С. 98–103.
- [22] Сычевский В.А. Моделирование технологического процесса конвективной сушки пиломатериалов // Изв. Национальной академии наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук, 2018. Т. 63. № 4. С. 424–434.
- [23] Зайцева М.И., Никонова Ю.В., Колесников Г.Н. Моделирование изменений влажности древесины при атмосферной сушке // Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: Сб. статей по Материалам региональной науч.-практ. конф., Петрозаводск, 30 апреля 2020 г. Петрозаводск: Петропресс, 2020. С. 11–14.
- [24] Панова Т.В., Панов М.В. Теоретическое обоснование температурного поля в сушилке шахтного типа // Вклад науки и практики в обеспечение продовольственной безопасности страны при техногенном ее развитии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 18–19 марта 2021 г. Брянск: Изд-во Брянского государственного аграрного университета, 2021. С. 148–152.
- [25] Голубкович А.В., Чижиков А.Г., Машковцев М.Ф. Сушилки шахтного типа производства ПНР. М.: Россельхозиздат, 1986. 46 с.
- [26] Куцов С.В., Куцова А.Е., Саранов И.А., Ветров А.В. Усовершенствование конвективной сушилки шахтного типа // Вестник Евразийского технологического университета, 2018. № 3(32). С. 19–24.
- [27] Гаврилова В.Е. Сушка зерна в сушилках шахтного и барабанного типа // В мире научных открытий: матер. II Междунар. студ. науч. конф., Ульяновск, 23–24 мая 2018 года. Т. III. Ч. 1. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2018. С. 115–117.

Сведения об авторах

Сафин Рушан Гареевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), safin@kstu.ru

Родионов Алексей Сергеевич  — инженер кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), rodionov2014@bk.ru

Сотников Виктор Георгиевич — аспирант кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), vcvcvc12345678@gmail.com

Зиятдинова Диляра Фаритовна — д-р техн. наук, профессор кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), Ziatdinova2804@gmail.com

Тимербаев Наиль Фаритович — д-р техн. наук, профессор кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ), crekgeu@gmail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023.

Одобрено после рецензирования 22.03.2023.

Принята к публикации 25.05.2023.

MATHEMATICAL MODELING OF SECONDARY RAW MATERIALS DRYING PROCESS IN ACTIVATED CARBON PRODUCTION LINE

R.G. Safin, A.S. Rodionov✉, V.G. Sotnikov,
D.F. Ziatdinova, N.F. Timerbayev

Kazan National Research Technological University, 68, K. Marx st., Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

rodionov2014@bk.ru

Mathematical modeling of the convective drying process for the activated carbon production line, which is an effective and inexpensive adsorbent, is presented. At the Department of Wood Materials Processing of Kazan National Research Technological University (KNITU), a pyrogenetic processing unit for secondary raw materials into activated carbon was developed. An important stage in the preparation of raw materials for thermal processing is its drying, which reduces the energy costs of heating the material. To identify the optimal technological parameters of the convective drying process, numerical mathematical modeling of changes in the moisture content and temperature of wood particles was carried out by solving a system of heat and mass transfer equations recorded for an infinite plate. Dynamic curves of temperature and humidity of the material have been obtained, which will allow us to recommend technological parameters for the installation. The approbation of the mathematical.

Keywords: pyrolysis, secondary raw materials, activated carbon, drying, modeling, convective heat and mass transfer

Suggested citation: Safin R.G., Rodionov A.S., Sotnikov V.G., Ziatdinova D.F., Timerbayev N.F. *Modelirovanie protsesssa cushki vtorichnogo syr'ya v tekhnologicheskoy linii proizvodstva aktivirovannogo uglya* [Mathematical modeling of secondary raw materials drying process in activated carbon production line]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 117–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-117-127

References

- [1] Safin R.G. *Pirogeneticheskaya pererabotka organicheskikh otkhodov* [Pyrogenetic processing of organic waste]. Kazan': KNRTU, 2022, 104 p.
- [2] Zagirov A.N., Sotnikov V.G., Safin R.G. *Pererabotka organicheskikh otkhodov v piroliznoe toplivo* [Processing of organic waste into pyrolysis fuel]. Kazan': KNRTU, 2022, 92 p.
- [3] Stepanova T.O. *Pirogeneticheskaya pererabotka drevesnykh otkhodov v aktivirovannyi ugol'* [Pyrogenetic processing of wood waste into activated carbon]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.03. Kazan', 2021, 138 p.
- [4] Pat. 2780782 Russian Federation, IPC F23G 5/027 (2006.01), B09B 3/30 (2022.01), B09B 3/40 (2022.01), B09B 3/10 (2022.01). *Sposob pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov* [Method of processing solid domestic wastes], Safin R.G., Sotnikov V.G., Khairullin I.F., Rodionov A.S., Ilyasov I.R., applicant and patent holder FGBOU VO «KNRTU», no. 2021138318; dec. 12/22/2021; publ. 09/30/2022, bull. no. 28, 8 p.
- [5] Pat. 2 783 823 Russian Federation, IPC C10B 49/10 (2006.01) C10G 9/00 (2006.01) B01J 8/00 (2006.01). *Ustanovka dlya proizvodstva piroliznogo topliva* [Installation for the production of pyrolysis fuel], Safin R.G., Sotnikov V.G., Zagirov A.N., Rodionov A.S., Miftakhov R.A.; applicant and patent holder FGBOU VO «KNRTU», no. 2021138320; dec. 12/22/2021; publ. 11/18/2022, bull. no. 22, 7 p.
- [6] Pat. 2 789 699 Russian Federation, IPC C01B 32/324 (2017.01) C10B 53/00 (2006.01) *Sposob polucheniya aktivirovannogo uglya* [Method for producing activated carbon], Safin R.G., Sotnikov V.G., Rodionov A.S., Khairullin I.F., Zagirov A.N.; applicant and patent holder FGBOU VO «KNRTU», no. 2021135547; dec. 03.12.2021; publ. 02/07/2023, bull. no. 4, 9 p.
- [7] Gorokhovskiy A.G. *Analiticheskoe opredelenie velichiny parametrov vlagoperenosa pri sushke drevesiny* [Analytical determination of the value of moisture transfer parameters during wood drying]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zone], 2018, no. 4, pp. 344–349.
- [8] Lykov M.V. *Sushka v khimicheskoy promyshlennosti* [Drying in the chemical industry]. Moscow: Chemistry, 1970, 423 p.
- [9] Khasanshin R.R. *Termicheskoe modifitsirovanie drevesnogo napolnitelya v proizvodstve kompozitsionnykh materialov* [Thermal modification of wood filler in the production of composite materials]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.05. Kazan, 2020, 424 p.
- [10] Maksimenko V.A., Evdokimov V.S., Kalita V.S. *Razrabotka metoda nizkotemperaturnoy sushki drevesiny* [Development of a method for low-temperature drying of wood]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: Materialy 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Omsk, 26–29 fevralya 2020 goda. [Technique and technology of petrochemical and oil and gas production: Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference], Omsk, February 26–29, 2020. Omsk: Publishing house of OmSTU, 2020, pp. 176–177.
- [11] Kantyshev A.V., Kolesnikov G.N. *Prodolzhitel'nost' i skorost' konvektivnoy sushki drevesiny osiny / Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa* [Duration and speed of convective drying of aspen wood. Improving the efficiency of the forest complex]. *Materialy V Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the V All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation], Petrozavodsk State University, May 22, 2019. Petrozavodsk: PetrGU, 2019, pp. 45–47.
- [12] Bragin D.M., Pozolotin A.P., Budin A. G. *Prodolzhitel'nost' i skorost' konvektivnoy sushki drevesiny osiny* [Duration and speed of convective drying of aspen wood]. *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK–2018): Sbornik statey XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Society. The science. Innovations (NPK-2018): Collection of articles of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference], in 3 volumes, Kirov, Vyatka State University, April 02–28, 2018. Kirov: Vyatky State University, 2018, pp. 1173–1176.

- [13] Platonov A.D., Platonova A.S. *Osobennosti nestatsionarnogo teploobmena v termokhimicheski obrabotannoy drevesine* [Features of non-stationary heat transfer in thermochemically treated wood]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 7-2 (18-2), pp. 349–353.
- [14] Bashkinova E.V., Egorova G.F., Zausaeva A.A. *Chislennyye metody i ikh realizatsiya v Microsoft Excel. Ch.1: Laboratornyy praktikum po informatike* [Numerical methods and their implementation in Microsoft Excel. Part 1: Laboratory workshop on informatics]. Samara: Samara GTU, 2009, 44 p.
- [15] Ponomarev V.S., Kashevarova G.G. *Chislennoe modelirovanie protsessa sushki drevesiny* [Numerical modeling of wood drying process]. Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika [Modern technologies in construction. Theory and Practice], 2022, vol. 1, pp. 429–434.
- [16] Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. *Analiticheskoe opredelenie velichiny parametrov vlagoperenosa pri sushke drevesiny* [Analytical determination of the value of moisture transfer parameters during wood drying]. Khvoynyye boreal'noy zony [Coniferous boreal zone], 2018, v. 36, no. 4, pp. 344–349.
- [17] Kostarev S.N., Sereda T.G. *Bezopasnyye tekhnologii upravleniya sushkoy drevesiny* [Safe technologies for wood drying control]. Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennyye problemy i puti resheniya: sb. tr. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov [Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions: Sat. tr. All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students, Yurga, National Research Tomsk Polytechnic University], Yurga Technological Institute, November 22–24, 2018. Yurga: National Research Tomsk Polytechnic University, 2018, pp. 75–79.
- [18] Kantyshev A.V., Kolesnikov G.N. *Modelirovanie sushki drevesiny ivy kak biotopliva* [Modeling the drying of willow wood as a biofuel]. Innovatsionnyye nauchnye issledovaniya: teoriya, metodologiya, praktika: sbornik statey XVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative scientific research: theory, methodology, practice: collection of articles of the XVII International Scientific and Practical Conference], 2 p, Penza, May 27, 2019 Part 1. Penza: Science and Education, 2019, pp. 185–188.
- [19] Ampilogov V.A. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplo-massoperenosa pri sushke drevesiny* [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes during wood drying]. Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya: Sbornik statey po materialam LX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Technical sciences: problems and solutions: Collection of articles based on the materials of the LX international scientific and practical conference], Moscow, May 17, 2022, vol. 5 (55). Moscow: Internauka, 2022, pp. 33–43. DOI 10.32743/2587862X.2022.5.55.338405
- [20] Kolesnikov G.N., Kantyshev A.V., Zaitseva M.I., Gavrilov T.A., Nikonova Yu.V. *Konvektivnaya sushka osinovykh zagotovok maloy tolshchiny: model' i eksperimenty* [Convective seasoning of small thickness aspen workpieces: model and experiments]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 87–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-87-94
- [21] Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. *Sintez optimal'noy po bystrodeystviyu sistemy upravleniya sushkoy pilomaterialov* [Synthesis of a speed-optimal control system for drying lumber]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. [Sistemy. Methods. Technologies], 2021, no. 1 (49), pp. 98–103.
- [22] Sychevskiy V.A. *Modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa konvektivnoy sushki pilomaterialov* [Simulation of the technological process of convective drying of sawn timber]. Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences], 2018, v. 63, no. 4, pp. 424–434.
- [23] Zaytseva M.I., Nikonova Yu.V., Kolesnikov G.N. *Modelirovanie izmeneniy vlazhnosti drevesiny pri atmosferynoy sushke* [Modeling of changes in wood moisture during atmospheric drying]. Resursoberegayushchie tekhnologii, materialy i konstruksii: sb. statey po materialam regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Resource-saving technologies, materials and structures: coll. articles based on the materials of the regional scientific and practical conference], Petrozavodsk, April 30, 2020. Petrozavodsk: Petropress, 2020, pp. 11–14.
- [24] Panova T.V., Panov M.V. *Teoreticheskoe obosnovanie temperaturnogo polya v sushilke shakhtnogo tipa* [Theoretical substantiation of the temperature field in a shaft-type dryer]. Vklad nauki i praktiki v obespechenie prodovol'stvennoy bezopasnosti strany pri tekhnogennom ee razvitii: sb. nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Contribution of science and practice to ensuring the food security of the country with its technogenic development: Sat. scientific papers of the International Scientific and Practical Conference], Bryansk, March 18–19, 2021. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2021, pp. 148–152.
- [25] Golubkovich A.V., Chizhikov A.G., Mashkovtsev M.F. *Sushilki shakhtnogo tipa proizvodstva PNR* [Dryers of mine type of production of Poland]. Moscow: Rosselkhozizdat, 1986, 46 p.
- [26] Kutsov S.V., Kutsova A.E., Saranov I.A., Vetrov A.V. *Usovershenstvovanie konvektivnoy sushilki shakhtnogo tipa* [Improvement of the shaft-type convective dryer]. Vestnik Evraziyskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Eurasian Technological University], 2018, no. 3(32), pp. 19–24.
- [27] Gavrilova V.E. *Sushka zerna v sushilkakh shakhtnogo i barabannogo tipa* [Drying of grain in dryers of shaft and drum type]. V mire nauchnykh otkrytiy: mater. II Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii [In the world of scientific discoveries: mater. II International Student Scientific Conference], Ulyanovsk, May 23–24, 2018. T. III. Part 1. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agrarian University P.A. Stolypin, 2018, pp. 115–117.

*The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation
No. 23-26-00036, <https://rscf.ru/project/23-26-00036/>*

Authors' information

Safin Rushan Gareevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head Department of Wood Materials Processing of Kazan National Research Technological University, safin@kstu.ru

Rodionov Aleksey Sergeevich [✉] — Engineer, Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, rodionov2014@bk.ru

Sotnikov Viktor Georgievich, — pg. of the Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, vcvcvc12345678@gmail.com

Ziatdinova Dilyara Farilovna, — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, Ziatdinova2804@gmail.com

Nail Farilovich Timerbayev — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, cpekgeu@gmail.ru

Received 14.02.2023.

Approved after review 22.03.2023.

Accepted for publication 25.05.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest