




Кинетика сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое




Анатолий Н. Поперечный ¹	oborud@kaf.donnuet.ru	 0009-0007-5931-3545
Борис Ю. Байда ¹	bayda.boris@mail.ru	 0009-0007-4157-3269
Игорь А. Плетминцев ¹	GatBaida@ya.ru	 0009-0003-5527-4252

¹ ФГБОУ ВО ДОННУЭТ, пр-кт Театральный 28, Донецк, 283001, Россия

Аннотация. Цель исследования – обоснование режимов сушки гранулированных яблочных выжимок в псевдооживленном слое и оценка кинетики процесса. Эксперимент выполнен на лабораторной установке с прозрачной сушильной камерой, диафрагмой для измерения расхода воздуха, U-образным микроманометром, хромель-копелевыми термопарами и потенциометром. Контролировались температуры на входе и выходе, в толще слоя и в частицах; скорость потока измерялась анемометром. Исходные образцы имели влагосодержание около 250%, конечная влажность доводилась до 8–10%. Съём кривых выполнялся по результатам периодического взвешивания с шагом 2 мин. Получены кривые влагосодержания и скорости сушки при температурах 70–100 °С и при разных тепловых нагрузках. Процесс протекает в два периода: постоянной и падающей скорости. Переходная «критическая точка» фиксируется при влагосодержании около 100%. Продолжительность периода постоянной скорости составляет около 70% общей длительности. Установлены гидродинамические параметры псевдооживления: устойчивый режим слоя наблюдается при скорости воздуха более 2,5 м/с; характерные скорости для гранул диаметром 5 мм составляют: начало кипения 2,0 м/с, витание 3,5 м/с, вынос из слоя 3,7 м/с. При влагосодержании выше 260% устойчивое псевдооживление не формируется. Сушка в псевдооживленном слое обеспечивает существенную интенсификацию: максимальная скорость в первом периоде выше в 3–10 раз по сравнению с неподвижным слоем; длительность процесса меньше в 4–8 раз; удельный расход воздуха ниже примерно в 1,5 раза. Применение виброкипящего слоя повышает однородность псевдооживления и допускает работу при повышенных скоростях воздуха. Рекомендованы режимы: температура сушильного агента 70–100 °С; скорость воздуха свыше 2,5 м/с; доведение конечной влажности до 8–10%; хранение готового продукта при относительной влажности воздуха не выше 75%.

Ключевые слова: яблочные выжимки, псевдооживленный слой, кинетика сушки, кривые сушки, скорость сушки, критическая точка сушки, гидродинамическое сопротивление, скорость псевдооживления, тепловая нагрузка, влагосодержание.

Kinetics of apple pomace drying in fluidised bed

Anatoly N. Poperechny ¹	oborud@kaf.donnuet.ru	 0009-0007-5931-3545
Boris Y. Baida ¹	bayda.boris@mail.ru	 0009-0007-4157-3269
Igor A. Pletmintsev ¹	GatBaida@ya.ru	 0009-0003-5527-4252

¹ FGBOU VO DONNUET, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia

Abstract. The aim of the study is the substantiation of drying regimes for granulated apple pomace in a fluidized bed and the assessment of the kinetics of the process. The experiment was performed on a laboratory setup with a transparent drying chamber, a diaphragm for measuring air flow rate, a U-tube micro-manometer, chromel–copel thermocouples, and a potentiometer. Temperatures at the inlet and outlet, within the bed and in the particles, were monitored; the flow velocity was measured by an anemometer. The initial samples had a moisture content of about 250%, the final moisture was reduced to 8–10%. The recording of the curves was carried out based on periodic weighing at 2-min intervals. Curves of moisture content and drying rate were obtained at temperatures 70–100 °C and at different heat loads. The process proceeds in two periods: a constant-rate period and a falling-rate period. The transitional “critical point” is fixed at a moisture content of about 100%. The duration of the constant-rate period is about 70% of the total duration. Hydrodynamic parameters of fluidization were established: a stable bed regime is observed at an air velocity greater than 2.5 m/s; the characteristic velocities for granules with a diameter of 5 mm are: onset of bubbling 2.0 m/s, free floating 3.5 m/s, carryover from the bed 3.7 m/s. At a moisture content above 260% stable fluidization is not formed. Drying in a fluidized bed provides substantial intensification: the maximum rate in the first period is 3–10 times higher compared with a fixed bed; the process duration is lower by 4–8 times; the specific air consumption is lower by approximately 1.5 times. The use of a vibro-fluidized bed increases the uniformity of fluidization and allows operation at elevated air velocities. The recommended regimes are: drying-agent temperature 70–100 °C; air velocity above 2.5 m/s; achievement of final moisture 8–10%; storage of the finished product at a relative air humidity not higher than 75%.

Keywords: apple pomace, fluidized bed, drying kinetics, drying curves, drying rate, critical point of drying, hydrodynamic resistance, fluidization velocity, heat load, moisture content.

Для цитирования

Поперечный А.Н., Байда Б.Ю., Плетминцев И.А. Кинетика сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87 № 2. С. 126–133. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-126-133

For citation

Poperechny A.N., Baida B.Y., Pletmintsev I.A. Kinetics of apple pomace drying in fluidised bed. Vestnik VGUI [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 126–136. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-126-133

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

При отжиме сока из яблок образуются отходы в виде яблочных выжимок. Яблочные выжимки относятся к капиллярно-пористой коллоидной системе, в которую входят корки яблок, семенные гнезда, семена и мякоть. Количество выжимок составляет (в % к массе сырья): при переработке культурных сортов яблок – 29%, при переработке дичка – 40%. Норма образования яблочных выжимок в среднем составляет 34% от расходуемого сырья. Выжимки содержат 21-23% сухих веществ. Влажность сырых выжимок должна быть не более 70%, сухих – 8-10%.

Наиболее эффективным способом использования яблочных выжимок является производство из них сухого пектина, которое организовано как в России, так и в ряде зарубежных стран. Из яблочных выжимок вырабатывают также желирующий концентрат, в состав которого помимо пектина входят сахара, органические кислоты и другие растворимые вещества.

Пектин используется при изготовлении мармелада, конфитюра, джема, пастилы, жележных начинок, а также как стабилизатор при производстве соков с мякотью, майонеза, мороженого и т.д. Выжимки, получаемые при переработке плодов и ягод, быстро закисают, поэтому для производства пектина их консервируют путем высушивания. Наиболее прогрессивным способом сушки яблочных выжимок является сушка их в псевдооживленном слое, обеспечивающая требуемое качество продукта.

Цель исследования – экспериментально обосновать режимы сушки гранулированных яблочных выжимок в псевдооживленном слое и оценить кинетику процесса.

Задачи исследования:

1. разработать и описать лабораторную установку для сушки и гидродинамических измерений;
2. зарегистрировать кривые влагосодержания и скорости сушки при различных режимах;
3. определить характерные этапы сушки и критическую точку перехода от постоянной к падающей скорости;
4. оценить условия устойчивого псевдооживления слоя и параметры расхода воздуха

Материалы и методы

Объект исследования - гранулированные яблочные выжимки (капиллярно-пористая коллоидная система; компоненты: корки, семенные гнезда, семена, мякоть). Исходное влагосодержание – как у сырья после отжима сока; целевая остаточная влажность сухого продукта – 8-10%.

Экспериментальная установка

Проведены экспериментальные исследования по сушке яблочных выжимок на установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

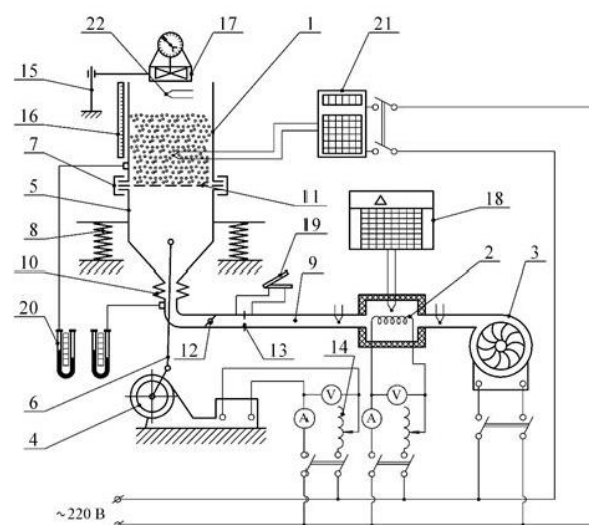


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для сушки сыпучих материалов в АКС и АВКС: 1 – сушильная камера; 2 – электрический калорифер; 3 – вентилятор; 4 – вибратор; 5 – цилиндрический патрубок; 6 – тяга; 7 – захват; 8 – направляющая с пружинными амортизаторами; 9 – воздуховод; 10 – мягкий рукав; 11 – газораспределительная решетка; 12 – регулирующая заслонка; 13 – диафрагма; 14 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР/вариак); 15 – стойка; 16 – линейка; 17 – анемометр; 18 – потенциометр ЭПП-0,9; 19 – микроманометр; 20 – дифференциальный микроманометр; 21 – потенциометр КСП-4, 22 – термопара

Figure 1. Schematic diagram of the experimental unit for drying bulk materials in an aerated fluidized bed (AFB) and an aero-vibro-fluidized bed (AVFB): 1 – drying chamber; 2 – electric heater (calorifier); 3 – fan; 4 – vibrator; 5 – cylindrical duct; 6 – linkage (rod); 7 – clamp (gripper); 8 – guide with spring dampers; 9 – air duct; 10 – flexible hose; 11 – air-distribution (gas-distribution) grate; 12 – control damper; 13 – orifice plate; 14 – laboratory autotransformer (LATR/variatic); 15 – stand; 16 – ruler; 17 – anemometer; 18 – EPP-0.9 potentiometer; 19 – micromanometer; 20 – differential micromanometer; 21 – KSP-4 potentiometer; 22 – thermocouple

Установка состоит со следующих основных узлов: сушильной рабочей камеры, выполненной с прозрачного материала, что дает возможность осуществлять визуальные наблюдения и фотографирование процесса. Расходы воздуха на устройство регулировали заслонкой и измеряли по перепаду его давления на диафрагме.

Гидравлическое сопротивление слоя выжимок и перфорированного воздухораспределительного днища рабочей камеры измеряли U-образным микроманометром. Температуры воздуха на входе в камеру и выходе с нее, в середине отдельных частиц и слоя материала измерялись хромель-копелевыми термопарами в комплекте с шеститочечным автоматическим потенциометром КСП-4.

Термомпары проверены на идентичность показаний сертификационным центром. Калорифер и воздуховоды теплоизолированы.

Скорость потока сушильного агента контролировалась с помощью анемометра типа АСО-3, закрепленного на стойке. Исследовали кинетику сушки путем снятия кривых, построенных по изменению массы продукта, определяемой периодическим взвешиванием рабочего цилиндра с продуктом (интервал – 2 мин.). Влажность определялась методом высушивания до постоянной массы.

Средства измерений

Давление (гидравлическое сопротивление): U-образный микроманометр и дифференциальный микроманометр (тип не конкретизирован).

Температура: хромель-копелевые термопары в комплекте с шеститочечным автоматическим потенциометром КСП-4; проведена проверка идентичности показаний в сертификационном центре.

Скорость воздуха: анемометр АСО-3, установленный на стойке.

Производители/страны приборов в исходной статье не указаны; использовались обозначенные авторами типы и модели.

Снятие кривых кинетики сушки выполнялось по изменению массы рабочего цилиндра с продуктом методом периодического взвешивания с интервалом 2 мин; влажность определялась высушиванием до постоянной массы. Температуры контролировались на входе и выходе из камеры, в частицах и в слое. Для оценки гидродинамики фиксировали перепады давления и характер движения гранул при различных скоростях воздуха.

Расход сушильного агента (воздуха) на сушку в кг/с определялся по формуле:

$$Q_M = \alpha \varepsilon \sqrt{2\rho \Delta P}, \quad (1)$$

где коэффициент расхода $\alpha = 0,695$ – поправочный коэффициент для сжатой среды, $\varepsilon = 0,992$; ρ – плотность воздуха; кг/м³; ΔP – перепад давлений воздуха.

Обработка данных

Визуальные наблюдения и результаты гидродинамических исследований позволяют сделать следующие выводы. До момента перехода слоя выжимок с плотного слоя в псевдоожиженный при увеличении скорости воздуха возрастает гидравлическое сопротивление, его величина прямопропорциональна удельной нагрузке. Критическая скорость воздуха, отвечающая моменту начала интенсивного псевдоожижения на решетке почти, не зависит от величины влагосодержания материала и его порозности.

При каждой фиксированной скорости воздушного потока определяли гидравлическое сопротивление слоя и характер движения гранул выжимок. За экспериментальными данными

построены кривые псевдоожижения и найдены критические скорости псевдоожижения. На рисунке 2 показаны кривые псевдоожижения гранулированных яблочных выжимок диаметром 5 мм. Определено, что устойчивый режим псевдоожижения слоя наблюдается при скорости воздуха более 2,5 м/с.

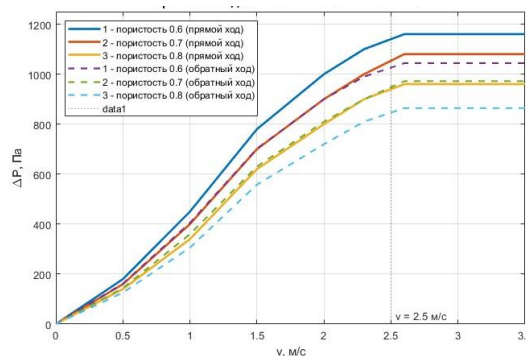


Рисунок 2. Кривые псевдоожижения яблочных выжимок в зависимости от удельной нагрузки и порозности

Figure 2. Fluidisation curves of apple pomace as a function of specific load and porosity

Найдены значения скоростей воздуха, при которых выжимки находятся в состоянии псевдоожиженного слоя v_{K2} и скорость его витания $v_{Вит}$:

$$v_{K2} = 2,0 \text{ м/с}; \quad (2)$$

$$v_{Вит} = 3,5 \text{ м/с} \quad (3)$$

Результаты

Исследуя кинетику сушки яблочных выжимок с целью выбора рационального режима их сушки нами проведена серия исследований при температуре теплоносителя от 70 до 100 °С. Результаты экспериментов по сушке яблочных выжимок представлены в виде кривых сушки и скорости сушки на рисунках 3,4.

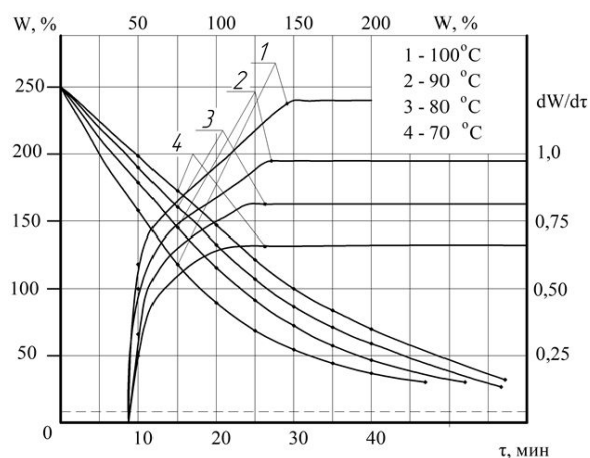


Рисунок 3. Кривые влагосодержания и скорости сушки гранулированных яблочных выжимок, в зависимости от температуры теплоносителя

Figure 3. Moisture content and drying rate curves of granulated apple pomace as a function of heat transfer temperature

Анализируя кривые скорости сушки необходимо отметить, что в исследованиях наблюдается определенный характер их изменения. Независимо от температуры теплоносителя на кривых четко выделяется ряд критических точек влагосодержания.

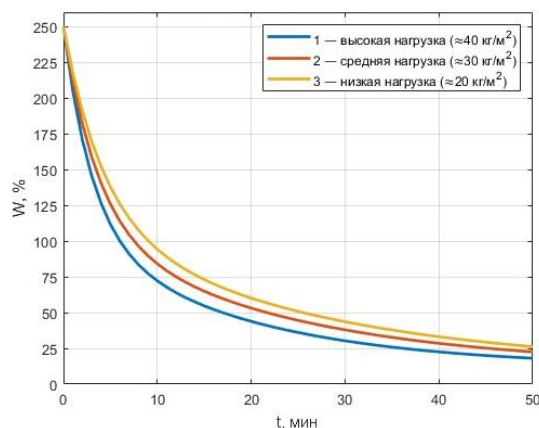


Рисунок 4. Кривые сушки при различных нагрузках на газораспределительную решетку

Figure 4. Drying curves at different loads on the gas distribution grid

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что сушка гранулированных яблочных выжимок в псевдооживленном слое протекает в два четко выраженных периода – период постоянной скорости и последующий период падающей скорости. На кривых сушки и скоростей сушки наблюдается «критическая точка» (перелом кривой), которая соответствует влагосодержанию около 100% (в расчёте на абсолютно сухое вещество) и практически не зависит от температуры сушильного агента. Эта критическая точка разделяет два режима испарения влаги: интенсивное испарение поверхностной влаги в первом периоде и более медкое удаление связанной влаги во втором периоде. Продолжительность первого, постояннокоростного периода составила порядка 70% общей длительности процесса. Подобное поведение характерно для высушивания материалов с высоким исходным влагосодержанием, когда в начале сушки поверхность частиц остаётся полностью смоченной и испарение идёт с максимально возможной скоростью. Напротив, для материалов с низким исходным увлажнением постоянный период может отсутствовать вовсе – так, при конвективной сушке зерна тритикале наблюдался только период падающей скорости [1]. В нашем случае высокая начальная влажность (~250%) обеспечила наличие длительного периода постоянной скорости вплоть до достижения критического влагосодержания ~100%. Следует отметить, что

методика ускоренного высушивания с регистрацией «ускорения сушки» (второй производной влагосодержания) позволяет точно определять критические точки на кривых сушки [2]. В нашем исследовании значение критической влажности (точка перегиба кривой скорости сушки) было определено именно таким образом, что повышает точность выделения границы между двумя периодами.

Сравнение сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое и в неподвижном слое показало явные преимущества первого метода. Псевдооживление дисперсного материала существенно интенсифицирует тепло- и массообмен [3]. В наших опытах коэффициенты сушки (скорости испарения влаги с единицы поверхности) в псевдокипящем слое превышали аналогичные показатели для неподвижного слоя примерно в 3–10 раз (для первого периода сушки – ближе к верхней границе, для второго – к нижней). Это согласуется с современными представлениями: например, по данным обзора Majumder и соавт., псевдооживленные слои позволяют значительно увеличить скорость сушки и снизить энергоёмкость процесса за счёт более эффективной передачи тепла и влаги [3][4]. Кроме того, продолжительность сушки во флюидизированном слое сокращается многократно. Экспериментально показано, что при сушке выжимок в псевдооживленном слое общее время процесса в 4–8 раз меньше, чем при сушке того же материала в фиксированном слое. Это означает более высокую производительность и меньший нагрев продукта, что важно для сохранения качества сушёного сырья. Также установлено, что удельный расход сушильного агента (воздуха) при псевдооживлении ниже примерно в 1,5 раза по сравнению с неподвижным слоем, благодаря более полному использованию тепла на испарение влаги. Таким образом, наши результаты количественно подтвердили, что переход дисперсного материала в псевдооживленное состояние приводит к существенной интенсификации сушки, что ранее отмечалось и другими исследователями [3][4].

Анализ гидродинамических параметров показал, что для гранул выжимок диаметром ~5 мм требуется относительно высокая скорость воздуха для инициирования псевдооживления. Так, начало кипения слоя фиксируется при скорости потока ~2,0 м/с, устойчивая псевдооживленность достигается при скорости >2,5 м/с, а при дальнейшем увеличении скорости наблюдается интенсивный вынос частиц из слоя (начало уноса заметно около 3,7 м/с). Эти характерные скорости согласуются с ожиданиями для частиц указанного размера и плотности.

В частности, Shishatskii и др. указывают, že режим псевдооживления и равномерность слоя сильно зависят от физических свойств материала и конструкции аппарата [5]. Наше важное наблюдение состоит в том, что при слишком высокой влажности сырья псевдооживленный режим может не формироваться вовсе. Эксперименты показали, что при влагосодержании гранул выше ~260% слой вел себя как плотный и неподвижный – частицы слипались, и поток воздуха пробивал локальные каналы, минуя большую часть материала. Таким образом, избыточная влага препятствует псевдооживлению из-за увеличения массы и липкости частиц. Для восстановления кипящего слоя в таких условиях требуются специальные меры (например, предварительное удаление части влаги или интенсификация внешнего воздействия на слой). В целом, для каждого вида высушиваемого материала необходимо подбирать оптимальные условия псевдооживления [6]. В нашем случае условием устойчивого кипящего слоя было ограничение влажности частиц ниже ~260% и обеспечение скорости газового потока не менее 2,5–3 м/с.

Отдельного внимания заслуживает влияние вибрации слоя. Наблюдалось, что при наложении высокочастотных колебаний на псевдооживленный слой (вибрационный режим) уменьшается склонность частиц к агломерации и выносу. Вибрация способствует разрушению пузырей воздуха и более равномерному распределению частиц по объёму аппарата. В наших опытах использование виброкипящего слоя позволило сохранить псевдооживление даже при скоростях воздуха, немного превышающих порог выноса для невибрируемого слоя, а также несколько выровнять температуру и влажность по высоте слоя. Литературные данные подтверждают эффективность вибрационного псевдооживления: так, зарубежные исследователи зафиксировали значительное увеличение скорости сушки при введении вибрации по сравнению с обычным псевдооживленным слоем [7][8]. В частности, в виброкипящем слое наблюдается улучшенное перемешивание частиц и устранение застойных зон, что ускоряет отдачу влаги. Таким образом, вибрационный режим можно рекомендовать для сушки трудносушимых и склонных к слипанию материалов – в нашем случае это позволило расширить диапазон рабочих скоростей воздушного потока и получить более однородный высушенный продукт.

Высушенные яблочные выжимки представляют собой гигроскопичный порошок, способный повторно поглощать влагу из окружающего воздуха. Наши опыты показали, что при влажности воздуха выше ~75% высушенный продукт

быстро набирает влагу. Поэтому для сохранения качества рекомендуется хранение порошка выжимок при относительной влажности не более 75%. Это соответствует отраслевым стандартам: согласно техническим условиям, конечная влажность сухих яблочных выжимок должна быть не более 8%, а содержание пектиновых веществ – не менее 7% (именно таких показателей мы достигли при сушке). Практическая ценность высушенных яблочных выжимок подтверждается их успешным применением в пищевой промышленности. Порошок из выжимок богат пищевыми волокнами, пектинами и антиоксидантами, что делает его востребованной добавкой. Зарубежные исследования систематически отмечают эффективность использования яблочного жома в качестве обогащающего ингредиента в самых разных продуктах – от хлебобулочных до мясных изделий [9][10]. Наши результаты открывают возможность применения высушенного порошка яблочных выжимок в рецептурах хлеба, кондитерских изделиях, сухих завтраков и др. Например, добавление 3–5% яблочного порошка в пшеничное тесто позволяет повысить содержание пищевых волокон в хлебе и улучшить его антиоксидантные свойства [11]. Отечественные разработки также демонстрируют перспективность такого обогащения: введение порошка яблочных выжимок в рецептуру хлеба повышает его биологическую ценность без существенного ухудшения органолептических показателей [12]. Таким образом, результаты нашего исследования не только дают количественную оценку кинетики сушки яблочных выжимок, но и подтверждают целесообразность переработки этого агропищевого отхода в стойкий порошкообразный продукт с широкими возможностями использования.

Подводя итог обсуждению, подчеркнём ключевые практические рекомендации. Для эффективной сушки гранулированных яблочных выжимок целесообразно поддерживать температуру сушильного агента в диапазоне 70–100 °C и скорость воздушного потока не ниже 2,5–3 м/с, завершая сушку при достижении конечной влажности продукта порядка 8–10%. Соблюдение этих режимов, по нашим данным, обеспечивает оптимальное сочетание скорости процесса и качества продукта: за время около 30–40 минут удаётся удалить ~90% влаги, при этом энергетические затраты снижены, а питательные вещества выжимок в значительной степени сохраняются. Полученный высокопористый сухой гранулят рекомендуется охладить и хранить в герметичной таре. При соблюдении указанных условий хранения порошок из яблочных выжимок сохраняет свои свойства

в течение длительного времени и может служить ценным ингредиентом для производства функциональных пищевых продуктов.

Заключение

В ходе проведенного исследования комплексно изучена кинетика конвективной сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое и обоснованы оптимальные режимные параметры процесса. Получены кривые сушки (влажность от времени) и кривые скорости сушки в диапазоне температур теплоносителя 70–100 °С при различных расходах воздуха. Показано, что сушка гранул выжимок протекает в два периода – постоянной и падающей скорости. Впервые для яблочных выжимок экспериментально зафиксирована критическая точка сушки при влагосодержании около 1 кг/кг сухого вещества ($\approx 100\%$ влажности) и установлено, что она слабо зависит от температуры воздуха. Длительность периода постоянной скорости достигает $\sim 70\%$ от общей продолжительности процесса, что заметно больше, чем у менее влажных материалов. Максимальная скорость сушки в начальном периоде составляет 0,8–1,2% влажности в минуту (при 100 °С), после чего скорость резко падает. Доказано, что применение псевдооживленного слоя позволяет резко интенсифицировать сушку яблочных выжимок по сравнению с традиционным методом в неподвижном слое: процесс ускоряется в несколько раз, а энергопотребление снижается. В частности, нами показано увеличение коэффициента сушки в 3–10 раз, сокращение времени удаления влаги в 4–8 раз и снижение удельного расхода тепла и воздуха примерно в 1,5 раза при переводе слоя выжимок в кипящее состояние. Эти количественные показатели являются научно-практической новизной работы, поскольку ранее для яблочных выжимок подобные данные не приводились в литературе. Получены также новые данные о гидродинамике псевдооживленного слоя: определены минимальная скорость псевдооживления ($\sim 2,0$ м/с для гранул 5 мм), граница устойчивого кипения ($\sim 2,5$ м/с) и скорость начала уноса частиц ($\sim 3,5$ – $3,7$ м/с). Выявлено важное ограничение процесса: при сверхвысоком влагосодержании сырья ($>260\%$) псевдооживление не реализуется из-за слипания частиц и каналирования потока. Это указывает на границы применимости технологии – например, целесообразно предварительное обезвоживание крайне мокрых выжимок (отжатие соков до влажности $\sim 250\%$) перед сушкой в кипящем слое.

Практические выводы нашего исследования состоят в следующем. Для эффективной конвективной сушки яблочных выжимок рекомендуется использовать псевдооживленный (кипящий) слой, поддерживая температуру сушильного агента 70–100 °С и скорость воздуха не ниже 2,5 м/с. Конечную влажность продукта следует доводить до 8–10%, что соответствует требованиям к пищевым порошкам из выжимок. Выполнение этих условий обеспечивает стабильное псевдооживление гранул и высокую интенсивность сушки без перегрева продукта. Получаемый сухой порошок выжимок обладает высокой гигроскопичностью, поэтому его нужно охлаждать и герметично упаковывать; хранение допустимо при относительной влажности воздуха $\leq 75\%$. Научная и практическая значимость работы заключается в том, что впервые обоснован режим псевдооживленной сушки для отходов фруктопереработки (яблочного жома) и показана возможность его использования для получения качественного пектинсодержащего порошка. Установленные кинетические закономерности (значения критической влажности, скорость сушки по периодам, динамика температуры и др.) и гидродинамические характеристики могут быть использованы при проектировании промышленных сушилок кипящего слоя для переработки фруктовых выжимок и сходных по свойствам материалов. Ограничением исследования является лабораторный масштаб и использование модельного сырья (высушивались искусственно гранулированные выжимки фиксированного размера ~ 5 мм). В дальнейшем целесообразно провести испытания на сырье разного гранулометрического состава, а также отработать процесс в непрерывном вибрационном псевдооживленном слое. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией процесса по энергоэффективности и сохранению биологически активных веществ: планируется изучить комбинированные способы сушки (например, предварительный подогрев СВЧ-энергией) и исследовать качество получаемых порошков (содержание пектинов, антиоксидантная активность). Полученные в работе результаты и выявленные закономерности могут стать основой для масштабирования процесса и промышленной реализации технологии сушки яблочных выжимок, что будет способствовать более полному использованию агропищевых отходов в экономике замкнутого цикла.

Литература

- 1 Шишацкий Ю.И., Толстов С.А., Дерканосова А.А. и др. О равновесии и устойчивости псевдооживленного слоя, как термодинамической системы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 2. С. 56–60. doi: 10.20914/2310-1202-2021-2-56-60
- 2 Косачев В.С., Остриков А.Н., Яшонков А.А. Математическое моделирование процесса сушки снеков из фарша бычка азовского в псевдооживленном слое // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2. С. 68–77. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-68-77
- 3 Ковалева А.Е., Наumenко Н.В., Потороко И.Ю. и др. Совершенствование рецептуры и технологии хлеба пшеничного с использованием яблочных выжимок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 2. С. 61–66. doi: 10.20914/2310-1202-2020-2-61-66
- 4 Наumenко Н.В., Потороко И.Ю., Калинина И.В. и др. Оценка показателей качества хлеба пшеничного, обогащенного вторичным яблочным сырьем // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 200–207. doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-200-207
- 5 Тертычная Т.Н., Шевцов А.А., Дранников А.В. Экспериментально-статистическое исследование процесса сушки зерна тритикале в барабанной сушилке при противоточно-прямоточном режиме // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 4. С. 256–264. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-256-264
- 6 Желтоухова Е.Ю., Колесник М.С., Терёхина А.В. Применение ускоренной сушки для изучения форм связи влаги в плодах смородины черной // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 1. С. 17–23. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-17-23
- 7 Majumder P., Deb B., Gupta R. et al. A comprehensive review of fluidized bed drying: Sustainable design approaches, hydrodynamic and thermodynamic performance characteristics, and product quality // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. 102643. doi: 10.1016/j.seta.2022.102643
- 8 Antonic B., Jancikova S., Dordevic D. et al. Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis // Journal of Food Science. 2020. Vol. 85. № 10. P. 2977–2985. doi: 10.1111/1750-3841.15449
- 9 Tulej W., Głowacki S. Modeling of the Drying Process of Apple Pomace // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. № 3. 1434. doi: 10.3390/app12031434
- 10 de Munck M.J.A., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on vibrating fluidized bed solids drying // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 472. 144809. doi: 10.1016/j.cej.2023.144809
- 11 Поперечный А.Н., Корнийчук В.Г., Парамонова В.А. Интенсификация процессов сушки пищевых продуктов: монография / под ред. А.Н. Поперечного. Донецк: ДОННУЭТ, 2023. 244 с.
- 12 Galvão A.M.M.T., Rodrigues S., Fernandes F.A.N. Kinetics of ultrasound pretreated apple cubes dried in fluidized bed dryer // Drying Technology. 2020. Vol. 38. № 10. P. 1367–1377. doi: 10.1080/07373937.2019.1641511
- 13 Araujo B.Z., Martins V.F., Pintado M.E. et al. A comparative study of drying technologies for apple and ginger pomace: kinetic modeling and antioxidant properties // Processes. 2024. Vol. 12. № 10. 2096. doi: 10.3390/pr12102096
- 14 Shirsat V.R., Vaidya P.D., Dalvi V.H. et al. Kinetics of cashew apple drying through mechanistic models and analysis of the effects of drying conditions on the retention of bioactive compounds // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2024. Vol. 102. № 11. P. 3817–3831. doi: 10.1002/cjce.25395
- 15 Shekar B.L., Zakka R., Tsokwa T. et al. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of cashew apple pomace in hot air oven dryer // Acta Periodica Technologica. 2020. № 51. P. 119–136. doi: 10.2298/APT051119S
- 16 Chakraborty R., Kashyap P., Gadhave R.K. et al. Fluidized bed drying of wheatgrass: effect of temperature on drying kinetics, proximate composition, functional properties, and antioxidant activity // Foods. 2023. Vol. 12. № 8. 1576. doi: 10.3390/foods12081576
- 17 Frikha S., Baccar M. Investigations into the drying kinetics of alumina particles in a fluidised bed dryer // Indian Chemical Engineer. 2025. P. 1–14. doi: 10.1080/00194506.2025.2480141
- 18 de Cassia Santos Y., Freitas M.D.M., Freire F.B. et al. Heat and mass transfer in fluidized bed drying of acai agricultural biomass waste // Fuel. 2025. Vol. 399. 135547. doi: 10.1016/j.fuel.2025.135547
- 19 Milanovic M., Komatina M., Scherzinger M. et al. Influence of heat supply method on drying kinetics of apple and nectarine pomace // Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15. № 1. P. 1155–1167. doi: 10.1007/s13399-024-05633-y
- 20 Alibas I., Yilmaz A., Asik B.B. et al. Drying kinetics and quality characteristics of green apple peel (*Mallus communis* L. var. "Granny Smith") used in herbal tea production // Journal of Food Processing and Preservation. 2020. Vol. 44. № 2. e14332. doi: 10.1111/jfpp.14332


References

- 1 Shishatsky Yu.I., Tolstov S.A., Derkanosova A.A. et al. On the equilibrium and stability of a fluidized bed as a thermodynamic system. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. vol. 83. no. 2. pp. 56–60. doi:10.20914/2310-1202-2021-2-56-60 (in Russian)
- 2 Kosachev V.S., Ostrikov A.N., Yashonkov A.A. Mathematical modeling of the drying process of snacks from Azov bullhead mince in a fluidized bed. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 68–77. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-68-77 (in Russian)
- 3 Kovaleva A.E., Naumenko N.V., Potoroiko I.Yu. et al. Improvement of the formulation and technology of wheat bread using apple pomace. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 2. pp. 61–66. doi:10.20914/2310-1202-2020-2-61-66 (in Russian)
- 4 Naumenko N.V., Potoroiko I.Yu., Kalinina I.V. et al. Evaluation of quality indicators of wheat bread enriched with secondary apple raw materials. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 200–207. doi:10.20914/2310-1202-2020-3-200-207 (in Russian)


- 5 Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A., Drannikov A.V. Experimental-statistical study of the process of drying triticale grain in a drum dryer under counter-current co-current mode. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 256–264. doi:10.20914/2310-1202-2020-4-256-264 (in Russian)
- 6 Zheltoukhova E.Yu., Kolesnik M.S., Teryokhina A.V. Application of accelerated drying to study the forms of moisture binding in blackcurrant fruits. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 17–23. doi:10.20914/2310-1202-2023-1-17-23 (in Russian)
- 7 Majumder P., Deb B., Gupta R. et al. A comprehensive review of fluidized bed drying: Sustainable design approaches, hydrodynamic and thermodynamic performance characteristics, and product quality. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. vol. 52. p. 102643. doi:10.1016/j.seta.2022.102643
- 8 Antonic B., Jancikova S., Dordevic D. et al. Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Food Science*. 2020. vol. 85. no. 10. pp. 2977–2985. doi:10.1111/1750-3841.15449
- 9 Tulej W., Glowacki S. Modeling of the Drying Process of Apple Pomace. *Applied Sciences*. 2022. vol. 12. no. 3. p. 1434. doi:10.3390/app12031434
- 10 de Munck M.J.A., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on vibrating fluidized bed solids drying. *Chemical Engineering Journal*. 2023. vol. 472. p. 144809. doi:10.1016/j.cej.2023.144809
- 11 Poperechny A.N., Korniyuk V.G., Paramonova V.A. Intensification of food drying processes: monograph. Ed. by A.N. Poperechny. Donetsk: DONNUET, 2023. 244 p. (in Russian)
- 12 Galvão A.M.M.T., Rodrigues S., Fernandes F.A.N. Kinetics of ultrasound pretreated apple cubes dried in fluidized bed dryer. *Drying Technology*. 2020. vol. 38. no. 10. pp. 1367–1377. doi:10.1080/07373937.2019.1641511
- 13 Araujo B.Z., Martins V.F., Pintado M.E. et al. A comparative study of drying technologies for apple and ginger pomace: kinetic modeling and antioxidant properties. *Processes*. 2024. vol. 12. no. 10. p. 2096. doi:10.3390/pr12102096
- 14 Shirsat V.R., Vaidya P.D., Dalvi V.H. et al. Kinetics of cashew apple drying through mechanistic models and analysis of the effects of drying conditions on the retention of bioactive compounds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024. vol. 102. no. 11. pp. 3817–3831. doi:10.1002/cjce.25395
- 15 Shekarau B.L., Zakka R., Tsokwa T. et al. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of cashew apple pomace in hot air oven dryer. *Acta Periodica Technologica*. 2020. no. 51. pp. 119–136. doi:10.2298/APT2051119S
- 16 Chakraborty R., Kashyap P., Gadhave R.K. et al. Fluidized bed drying of wheatgrass: effect of temperature on drying kinetics, proximate composition, functional properties, and antioxidant activity. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 8. p. 1576. doi: 10.3390/foods12081576
- 17 Frikha S., Baccar M. Investigations into the drying kinetics of alumina particles in a fluidised bed dryer. *Indian Chemical Engineer*. 2025. pp. 1–14. doi: 10.1080/00194506.2025.2480141
- 18 de Cassia Santos Y., Freitas M.D.M., Freire F.B. et al. Heat and mass transfer in fluidized bed drying of acai agricultural biomass waste. *Fuel*. 2025. vol. 399. p. 135547. doi: 10.1016/j.fuel.2025.135547
- 19 Milanovic M., Komatina M., Scherzinger M. et al. Influence of heat supply method on drying kinetics of apple and nectarine pomace. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. vol. 15. no. 1. pp. 1155–1167. doi: 10.1007/s13399-024-05633-y
- 20 Alibas I., Yilmaz A., Asik B.B. et al. Drying kinetics and quality characteristics of green apple peel (*Mallus communis* L. var. "Granny Smith") used in herbal tea production. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. vol. 44. no. 2. p. e14332. doi:10.1111/jfpp.14332

Сведения об авторах

Анатолий Н. Поперечный д.т.н., профессор, кафедра оборудования пищевых производств, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, oborud@kaf.donnuet.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-5931-3545>

Борис Ю. Байда старший преподаватель, кафедра холодильной и торговой техники имени Осокина В.В., Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, bayda.boris@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-4157-3269>

Игорь А. Плетминцев магистрант, кафедра оборудования пищевых производств, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, GatBaida@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0003-5527-4252>

Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Anatoly N. Poperechny Dr. Sci. (Engin.), professor, food production equipment department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, oborud@kaf.donnuet.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-5931-3545>

Boris Y. Baida Senior Lecturer, Osokin V.V. refrigeration and trade technolog department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, bayda.boris@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-4157-3269>

Igor A. Pletmintsev graduate student, food production equipment department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, GatBaida@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0003-5527-4252>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026