

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-243-247>

УДК 664.8.047

Определение энергосберегающих режимов сушки в аппарате виброкипящего слоя

Кандидаты техн. наук, доценты М. М. Кожевников¹⁾, В. И. Никулин¹⁾, магистр С. Н. Адамов¹⁾

¹⁾Могилевский государственный университет продовольствия (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Традиционная технология производства пектина – высокозатратная, энергоемкая и экологически небезопасная. Одним из возможных способов совершенствования технологического процесса производства пектина является сушка непосредственно пектинового гидролизата до его осаждения этиловым спиртом. Наиболее эффективный способ сушки пектинового гидролизата – сушка в виброкипящем слое инертного материала, обеспечивающая высокую производительность по испаренной влаге с единицы объема камеры и качеству получаемого сухого продукта. В данной работе предложена методика оптимизации процесса сушки пектинового гидролизата в аппарате виброкипящего слоя инертного материала, позволяющая определить значения режимных параметров, при которых процесс сушки протекает с минимальными затратами на тепловую и электрическую энергию. Методика основана на полученной экспериментально зависимости между удельной производительностью сушильной установки и следующими режимными параметрами процесса сушки: скоростью движения воздуха в сушильной камере, начальной температурой воздуха, удельной нагрузкой, отнесенной к площади газораспределительной решетки, начальной концентрацией по сухим веществам. На основе этой экспериментальной зависимости формализованы критерии оценки приведенных затрат на тепловую и электрическую энергию. Сформулирован комплексный критерий оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое, минимизация которого позволяет повысить эффективность ведения процесса сушки. Сформулированы ограничения на диапазоны изменения режимных параметров процесса сушки. Поставленная задача оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое решена численно с использованием метода последовательного квадратичного программирования, сформулированы рекомендации по значениям режимных параметров для ведения процесса в оптимальном режиме.

Ключевые слова: технологический процесс, сушка, модернизация, методика, оптимальный режим, режимные параметры, показатели качества, приведенные затраты, критерий оптимизации, ограничения, энергоэффективность, производительность, сушильная камера, эмпирическая зависимость, управляемые переменные

Для цитирования: Кожевников, М. М. Определение энергосберегающих режимов сушки в аппарате виброкипящего слоя / М. М. Кожевников, В. И. Никулин, С. Н. Адамов // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-243-247>

Determination of Energy-Saving Drying Modes in Vibrofluidized Bed Apparatus

М. М. Kozhevnikov¹⁾, V. I. Nikulin¹⁾, S. N. Adamov¹⁾

¹⁾Mogilev State University of Food Technologies (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. The traditional pectin production technology is highly energy-intensive and environmentally unsafe. One of the possible ways to improve the technological process of pectin production is to dry directly the pectine hydrolyzate before it is precipitated with ethyl alcohol. The most effective method of drying pectin hydrolyzate is drying in a vibrofluidized layer of an inert material, which provides high productivity in terms of evaporated moisture per unit volume of the chamber and the quality of the resulting dry product. This paper proposes a method for optimizing the drying process of pectin hydrolyzate

Адрес для переписки

Кожевников Михаил Михайлович
Могилевский государственный университет продовольствия
просп. Шмидта, 3,
212027, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 240-75-99
kmmk@mail.ru

Address for correspondence

Kozhevnikov Mikhail Mikhailovich
Mogilev State University of Food Technologies
3, Shmidta Ave.,
212027, Mogilev, Republic of Belarus
Tel. +375 29 240-75-99
kmmk@mail.ru

in the apparatus of a vibrofluidized layer of an inert material, which makes it possible to determine the values of regime parameters at which the drying process proceeds with minimal costs for thermal and electrical energy. The technique is based on the experimentally obtained relationship between the specific productivity of the drying unit and the following operating parameters of the drying process: the air velocity in the drying chamber, the initial air temperature, the specific load related to the area of the gas distribution grid, the initial concentration for dry substances. On the basis of this experimental dependence, the criteria for assessing the reduced costs for heat and electric energy are formalized. A complex criterion for optimizing the drying process in a vibrofluidized bed is formulated, the minimization of which makes it possible to increase the efficiency of the drying process. Restrictions on the ranges of variation of the operating parameters of the drying process are formulated as well. The posed problem of optimization of the drying process in a vibrofluidized bed is solved numerically using the method of sequential quadratic programming and recommendations are formulated on the values of operating parameters for conducting the process in the optimal mode.

Keywords: technological process, drying, modernization, technique, optimal mode, operating parameters, quality indicators, reduced costs, optimization criterion, limitations, energy efficiency, productivity, drying chamber, empirical dependence, controlled variables

For citation: Kozhevnikov M. M., Nikulin V. I., Adamov S. N. (2023) Determination of Energy-Saving Drying Modes in Vibrofluidized Bed Apparatus. *Science and Technique*. 22 (3), 243–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-243-247> (in Russian)

Введение

Технологический процесс производства пектина является энергоемким и экологически небезопасным. Такой процесс традиционно включает этапы промывания яблочных выжимок, экстрагирования пектина методом кислотного гидролиза, выделения твердой фракции с последующей обработкой этиловым спиртом и сушки [1]. В промышленных условиях требуются большие объемы этилового спирта, а также существенные энергозатраты на его регенерацию. Одно из перспективных направлений технологического процесса производства пектина – сушка гидролизата непосредственно до осаждения его этиловым спиртом.

Перспективным направлением модернизации технологического процесса производства пектина является использование интенсивного способа сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое из инертных гранул [2]. Проведение процесса сушки в виброкипящем слое инертного материала сопряжено с повышенными затратами на тепловую и электрическую энергию. В связи с этим актуальной задачей – поиск оптимальных значений режимных параметров процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое, при которых минимизируются приведенные затраты, включающие стоимость пара и стоимость электроэнергии. При этом в процессе оптимизации необходимо учитывать ряд ограничений на режимные параметры сушки, обусловленные спецификой технологического процесса [3–6].

Цель проведенных в данной работе исследований заключалась в разработке методики оптимизации процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое, исходя из кри-

терия минимизации приведенных затрат на энергоносители. Предложенная методика основана на полученной экспериментально зависимости, определяющей ограничения на изменение режимных параметров процесса сушки. Разработанная методика позволила определить значения режимных параметров процесса сушки, при которых достигаются минимальные затраты на энергоносители.

Методика и результаты исследований

Предельная производительность сушильной установки виброкипящего слоя существенно зависит от параметров пектинового гидролизата, в том числе его начальной концентрации по сухим веществам, и изменяется при варьировании температуры и скорости воздуха в сушильной камере [3, 4]. Также важным фактором, влияющим на производительность установки, является ее удельная нагрузка. С целью выявления зависимости, связывающей перечисленные режимные параметры процесса сушки, разработана экспериментальная сушильная установка, включающая в себя следующие элементы (рис. 1): сушильную камеру 1, вентилятор 2, эксцентриковый вибропривод 3, калорифер 4. Вибропривод обеспечивает вертикальные колебательные движения сушильной камеры. На газораспределительной решетке сушильной камеры размещаются кубические гранулы из фторопласта. Псевдооживление этих гранул обеспечивается за счет как колебаний газораспределительной решетки, так и подачи в сушильную камеру горячего воздуха. Контроль и регулирование температуры производится электронным потенциометром в комплекте с малоинерционной термопарой. Перед подачей

продукта в сушильную камеру его предварительно подогревают с использованием теплообменника 6. Из емкости 8 пектиновый гидролизат перекачивается насосом 7 в пневматическую форсунку, распыляющую гидролизат в слое гранул. Расход воздуха на распыл во всех опытах составлял $11 \text{ м}^3/\text{ч}$. Продукт осажается на поверхности инертных гранул, образуя тонкую пленку. Для уменьшения вязкости продукта перед подачей в слой инертного материала его предварительно нагревали в теплообменнике 6 горячей водой, поступающей из термостата. После высыхания продукт теряет связь с инертными гранулами и перемещается с воздухом в циклон 5, который обеспечивает отделение высушенного продукта от воздушного потока.

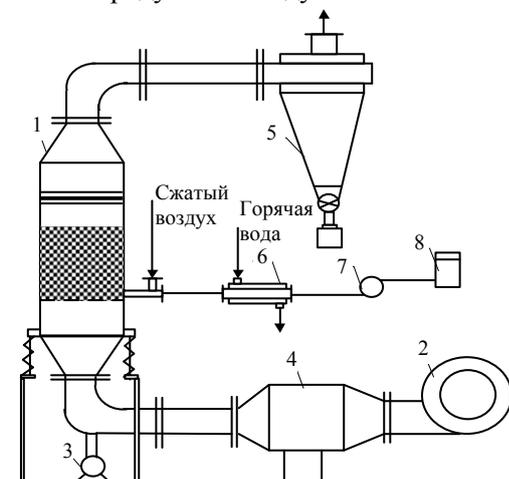


Рис. 1. Схема экспериментальной сушильной установки виброкипящего слоя

Fig. 1. Scheme of experimental vibrofluidized bed drying installation

В ходе предварительного экспериментального исследования показано, что процесс сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое протекает непрерывно. При увеличении расхода продукта растет неоднородность кипения псевдосжиженного слоя и наблюдаются слипшиеся гранулы, при этом поверхность гранул не полностью покрывается продуктом. Поэтому для увеличения производительности использована вибрирующая газораспределительная решетка, позволяющая разбивать агломераты гранул. В проведенных экспериментах частота вертикальной вибрации составила $7,5 \text{ Гц}$, амплитуда 8 мм . Сушку начинали с низкой производительностью с дальнейшим ступенчатым увеличением подачи пектинового гидролизата с интервалом 30 мин .

В ходе проведенных экспериментов в качестве факторов выступали следующие режимные параметры процесса сушки: скорость движения воздуха в сушильной камере v , м/с, начальная температура воздуха t_1 , °С, удельная нагрузка G , кг, отнесенная к площади газораспределительной решетки F_p , м^2 , начальная концентрация по сухим веществам C_1 , %. Соответственно при проведении экспериментов использован ортогональный план из четырех перечисленных факторов, варьируемых на четырех уровнях. План построен на базе двух упорядоченных и двух латинских квадратов размером 4×4 [4, 5]. По результатам этих экспериментов получена эмпирическая зависимость между производительностью установки и управляемыми переменными процесса

$$U_p = 1,47 \cdot 10^{-7} (1,159G_p - 0,23) \times (0,38v - 0,026)(1,99t_1 - 41,63)(-3,12C_1 + 210,8), \quad (1)$$

где $U_p = U/F_p$, U – предельная производительность установки, кг/ч; F_p – площадь газораспределительной решетки, м^2 ; $G_p = G/F_p$, G – удельная нагрузка, кг; v – скорость движения воздуха, м/с; t_1 – начальная температура воздуха, °С; C_1 – начальная концентрация по сухим веществам, %.

Полученная зависимость (1), а также рекомендации, изложенные в работах [6, 7], позволяют формализовать следующие два показателя эффективности процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое.

Первый показатель представляет собой приведенные затраты на тепловую энергию, потребляемую установкой виброкипящего слоя:

$$J_1 = 3600P_s C_a \rho_a \times (100 - W_2 - C_1)(t_1 - t_0) / U_p \eta_k r_s \rightarrow \min, \quad (2)$$

где P_s – стоимость пара, руб./кг; C_a – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); ρ_a – плотность воздуха на входе в сушильную камеру, кг/м³; W_2 – влажность сухого продукта, %; t_0 – температура окружающей среды, °С; η_k – коэффициент полезного действия калорифера; r_s – удельная теплота фазового превращения пара, кДж/кг.

Второй показатель представляет собой приведенные затраты на электроэнергию, потребляемую установкой виброкипящего слоя:

$$J_2 = P_e v (100 - W_2 - C_1) (G_p g - \Delta p) / U_p \eta_p r_d \rightarrow \min, \quad (3)$$

где P_e – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч; g – ускорение свободного падения, м/с²; Δp – сопротивление воздушной трассы сушилки, Па; η_v – коэффициент полезного действия вентилятора; η_d – то же электродвигателя.

В соответствии с методом скалярной свертки [8, 9] объединим (2) и (3) в следующий комплексный критерий оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое:

$$J = J_1 + J_2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Таким образом, с учетом (4) задача оптимизации процесса сушки в виброкипящем слое сводится к поиску значений режимных параметров, входящих в формулу (1), обеспечивающих минимум затрат на тепловую и электрическую энергию, при максимальной удельной производительности с единицы площади газораспределительной решетки.

При минимизации критерия оптимизации (4) на диапазоны изменения режимных параметров процесса сушки в виброкипящем слое t_1 , v , G_p и C_1 налагаются следующие ограничения на:

– температуру воздуха на входе в сушильную камеру

$$t_{1\min} \leq t_{1\max} \leq t_{1\max}, \quad (5)$$

где $t_{1\min} = 100$ °С; $t_{1\max} = 120$ °С – минимальная и максимальная температуры воздуха на входе в сушильную камеру, значения которых выбраны по приведенным в работе [2] условиям;

– скорость воздуха в аппарате виброкипящего слоя

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, \quad (6)$$

где $v_{\min} = 4,0$ м/с; $v_{\max} = 5,5$ м/с – минимальная и максимальная скорости воздуха в аппарате виброкипящего слоя, значения выбраны по данным работы [2];

– удельную нагрузку гранул инертного материала

$$G_{p\min} \leq G_p \leq G_{p\max}, \quad (7)$$

где $G_{p\min} = 140$ кг/м²; $G_{p\max} = 170$ кг/м² – минимальная и максимальная удельные нагрузки фторопластовых гранул кубической формы с размером ребра 4 мм;

– концентрацию по сухим веществам

$$C_{1\min} \leq C_1 \leq C_{1\max}, \quad (8)$$

где $C_{1\min} = 5$ %; $C_{1\max} = 15$ % – минимальная и максимальная концентрации по сухим веществам по данным работы [7].

Дополнительно вводится ограничение на конечную влажность сухого продукта W_2

$$W_{2\min} \leq W_2 \leq W_{2\max}, \quad (9)$$

где $W_{2\max} = 9$ %; $W_{2\min} = 5$ % – минимально и максимально допустимые по технологическим условиям влажности сухого продукта.

Также по технологическим условиям температура продукта в процессе сушки не должна превышать величину 75. °С учетом того, что температура продукта при сушке в псевдооживленном слое практически совпадает с температурой отработанного воздуха, имеет место условие $t_2 \leq t_{2d}$, где $t_{2d} = 75$ °С. При этом температура отработанного воздуха t_2 связана с температурой воздуха на входе в сушильную камеру t_1 уравнением теплового баланса. В этом уравнении допустимо пренебречь затратами теплоты на нагрев гидролизата из-за их малости в сравнении с затратами на выпаривание влаги. Уравнение такого теплового баланса имеет вид

$$U_p = 3600 K_p \rho_a C_a v (t_1 - t_2) / r, \quad (10)$$

где K_p – коэффициент тепловых потерь; r – удельная теплота испарения.

Величину удельной теплоты испарения определяем по формуле

$$r = r_0 + C_s t_2 - C_w \theta + \Delta r, \quad (11)$$

где C_w – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К); θ – температура продукта, К; C_s – удельная теплоемкость пара, кДж/(кг·К); Δr – удельная теплота преодоления связи влаги с материалом, кДж/кг; $r_0 = 2500$ кДж/кг.

Таким образом, задача оптимизации режима процесса сушки в виброкипящем слое сводится к минимизации критерия качества (4) при ограничениях (5)–(10). Поставленная задача решена численно методом последовательного квадратичного программирования [10] с использованием программного пакета MATLAB.

По результатам решения задачи оптимизации получены значения режимных параметров процесса сушки (табл. 1), при которых комплексный критерий (4) достигает минимума.

Таблица 1
Оптимальные значения режимных параметров
процесса сушки

Optimal values of operating parameters of drying process

Режимный параметр	Оптимальное значение режимного параметра
Скорость движения воздуха в сушильной камере v , м/с	5,5
Удельная нагрузка гранул инертного материала G/F_p , кг/м ²	170
Начальная концентрация пектина по сухим веществам C_1 , %	5
Температура отработанного воздуха t_2 , °C	74,76

ВЫВОД

Предложена методика оптимизации процесса сушки пектинового гидролизата в виброкипящем слое инертного материала, позволяющая снизить энергоемкость данного процесса. Получена экспериментальная зависимость, определяющая ограничения на изменение режимных параметров процесса сушки. Проведена оптимизация процесса сушки на основе минимизации комплексного критерия приведенных затрат на энергоносители. На основе предложенной методики определены значения режимных параметров процесса сушки, при которых могут быть минимизированы затраты на тепловую и электрическую энергию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донченко, Л. В. Технология пектина и пектинопродуктов / Л. В. Донченко, Г. Г. Фирсов. Краснодар: КГАУ. 2006. 276 с.
2. Василенко, З. В. Разработка научно обоснованной технологии производства пектина из выжимок яблок / З. В. Василенко, В. И. Никулин, Л. В. Лазовикова // Вестник МГУП. 2018. № 1 (24). С. 38–42.
3. Василенко, З. В. Влияние условий процесса гидролиза – экстрагирования протопектина яблочных выжимок на качество получаемого пектина / З. В. Василенко, В. И. Никулин, В. А. Седакова // Хранение и переработка сельхозсырья. 2006. № 8. С. 25–27.
4. Никулин, В. И. Исследование влияния условий процесса гидролиза-экстрагирования протопектина сушеных выжимок яблок на качество получаемого пектина / В. И. Никулин, З. В. Василенко, Л. В. Азарова // Вестник МГУП. № 2 (5). 2008. С. 24–29.
5. Василенко, З. В. Влияние промывания выжимок яблок, высушенных в виброкипящем слое, на показатели качества пектина и структуру его молекулы / З. В. Василенко, В. И. Никулин, Л. В. Лазовикова // Вестник МГУП. 2016. № 1 (20). С. 3–8.
6. Влияние режимных параметров сушки концентрата пектина на производительность установки виброкипящего слоя инертного материала / З. В. Василенко [и др.] // Вестник МГУП. 2019. № 1. С. 112–119.

7. Оптимизация процесса сушки яблочных выжимок в многозональном аппарате виброкипящего слоя / З. В. Василенко [и др.] // Вестник МГУП. 2013. № 1 (14). С. 3–7.
8. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. М.: Химия, 1985. 448 с.
9. Айрапетьянц, Г. М. Совершенствование систем автоматического регулирования технологическими процессами / Г. М. Айрапетьянц, А. В. Акулич, Н. И. Ульянов. Могилев: МГУП, 2012. 322 с.
10. Измаилов, А. Ф. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. 304 с.

Поступила 18.03.2021

Подписана к печати 20.04.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Donchenko L. V., Firsov G. G. (2006) *Technology of Pectin and Pectin Products*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University, 276 (in Russian).
2. Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Lazovikova L. V. (2018) Development of Scientifically-Based Technology for the Production of Pectin from Apple Pomace. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 38–42 (in Russian).
3. Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Sedakova V. A. (2006) Influence of Conditions of Hydrolysis Process – Extraction of Apple Pomace Protopectin on the Quality of the Pectin Obtained. *Khrenenie i Pererabotka Selkhozsyrya = Storage and Processing of Farm Products*, (8), 25–27 (in Russian).
4. Nikulin V. I., Vasilenko Z. V., Azarova L. V. (2008) Study of the Influence of the Conditions of the Hydrolysis-Extraction Process of Protopectin of Dried Apple Pomace on the Quality of the Pectin Obtained. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (2), 24–29 (in Russian).
5. Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Lazovikova L. V. (2016) Influence of Washing Apples Pomace Dried in Vibroboiling Layer on the Quality of Pectin and on the Structure of its Molecules. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 3–8 (in Russian).
6. Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Lazovikova L. V., Kolyukovich E. A. (2019) Influence of Operating Conditions of Pectin Concentrate Drying on Installation Productivity. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 112–120 (in Russian).
7. Vasilenko Z. V., Nikulin V. I., Kozhevnikov M. M., Lazovikova L. V., Loboreva L. A. (2013) Optimization of Apple Pomace Drying in Vibroboiling Layer Multispectral Machine. *Vestnik MGUP = Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies*, (1), 3–7.
8. Kafarov V. V. (1985) *Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Khimiya Publ. 448 (in Russian).
9. Airapetians G. M., Akulich A. V., Uliyanov N. I. (2012) *Improvement of Automatic Control Systems for Technological Processes*. Mogilev, Mogilev State University of Food, 322 (in Russian).
10. Izmailov A. F., Solodov M. V. (2005) *Numerical Optimization Methods*. Moscow, FIZMATLIT Publ, 304 (in Russian).

Received: 18.03.2021

Accepted: 20.04.2023

Published online: 31.05.2023