

Выбор рациональных параметров процесса сушки свекловичного жома в импульсном виброкипящем слое пониженного давления

Алексей В. Дранников	¹	drannikov@list.ru
Евгений В. Литвинов	¹	zenlit@yandex.ru
Андрей С. Полканов	¹	andrej.polkanov.96@mail.ru
Дарья К. Костина	¹	kostina.dasha.2111@mail.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Свекловичный жом – основной побочный продукт сахарной промышленности, получаемый при традиционной технологии производства. Он обладает высокими питательными качествами, но в сыром виде он быстро закисает, поэтому его необходимо консервировать. Одним из наиболее распространенных способов является сушка. Сушка свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое позволяет повысить качество готового продукта за счет снижения температуры сушильного агента, тем самым сохранив значительное количество питательных веществ в исходном продукте. Для изучения кинетических и гидродинамических зависимостей процесса сушки разработана экспериментальная установка, позволяющая получать максимально точные и воспроизводимые результаты. В ходе работы было проведено множество экспериментов, по результатам которых были построены кривые сушки, кривые скорости сушки и кривые нагрева, по характеру изменения которых, сделаны соответствующие выводы. Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки свекловичного жома, применяются математические методы планирования эксперимента. Математическое описание данного процесса может быть получено эмпирически. При этом его математическая модель имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки свекловичного жома в импульсном виброкипящем слое пониженного давления на экспериментальной установке. Применительно к сушильной установке определены такие технологические режимы ее работы, которые обеспечивают минимум удельных энергозатрат процесса сушки, отнесенные на 1 кг испаренной влаги, и максимальное влагонапряжение сушильной камеры.

Ключевые слова: сушка, свекловичный жом, виброкипящий слой, разрежение, перегретый пар, статистическая модель.

The choice of rational parameters of beet pulp drying process in a pulsed low-pressure vibro-boiling layer

Aleksey V. Drannikov	¹	drannikov@list.ru
Evgene V. Litvinov	¹	zenlit@yandex.ru
Andrey S. Polkanov	¹	andrej.polkanov.96@mail.ru
Darya K. Kostina	¹	kostina.dasha.2111@mail.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. Beet pulp is the main sugar industry by-product obtained with traditional production technology. It has high nutritional qualities, but in its raw form it turns sour quickly so it must be preserved. One of the most common methods is drying. Drying of the beet pulp with superheated vapor of reduced pressure in the pulsating vibro-boiling layer allows to improve the quality of the finished product by lowering of the drying agent temperature, thereby retaining a significant amount of nutrients in the initial product. To study the kinetic and hydrodynamic dependencies of the drying process, an experimental apparatus was developed that makes it possible to obtain the most accurate and reproducible results. In the course of the work, a lot of experiments were carried out. Drying curves, drying rate curves and heating curves were made based on these experiments results. According to the nature of the changes the corresponding conclusions were drawn. To study the interaction of various factors affecting the beet pulp drying process, the mathematical methods of experiment planning are applied. A mathematical description of this process can be obtained empirically. At the same time, its mathematical model has the form of a regression equation, determined by statistical methods on the basis of experiments. As a result of statistical processing of experimental data, regression equations were obtained that adequately describe the beet pulp drying process in a pulsed low-pressure vibro-boiling layer in the experimental apparatus. With reference to this drying apparatus, such technological modes of its operation were determined that ensure a minimum specific energy consumption of the drying process per kilogram of evaporated moisture and the maximum drying chamber moisture stress.

Keywords: drying, beet pulp, vibro-boiling layer, vacuum, superheated steam, statistical model

Для цитирования

Дранников А.В., Литвинов Е.В., Полканов А.С., Костина Д.К. Выбор рациональных параметров процесса сушки свекловичного жома в импульсном виброкипящем слое пониженного давления // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 4. С. 31–39. doi:10.20914/2310-1202-2017-4-31-39

For citation

Drannikov A.V., Litvinov E.V., Polkanov A.S., Kostina D.K. The choice of rational parameters of beet pulp drying process in a pulsed low-pressure vibro-boiling layer. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 4. pp. 31–39. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-4-31-39

Введение

Свекловичный жом – основной побочный продукт сахарной промышленности, получаемый при традиционной технологии производства. Жом используют на корм скоту в свежем, кислом и сухом виде. По питательности и содержанию сухого вещества высушенный жом превосходит луговое сено и только немногим уступает овсу. Ведь практически все питательные вещества свеклы, кроме сахара, остаются в жоме. Однако при длительном хранении в сыром жоме накапливается большое количество масляной кислоты. Он приобретает мягкую консистенцию и животные отказываются его поедать. Во избежание этого жом необходимо консервировать. Одним из наиболее распространенных способов является сушка [1].

Целью работы является изучение влияния режимных параметров на интенсивность протекания процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое и определение наиболее рациональных параметров.

Материалы и методы

Предлагаемый способ сушки высоковлажных дисперсных материалов и установка для его осуществления позволяют повысить качество готового продукта за счет снижения температуры сушильного агента, тем самым сохранив значительное количество питательных веществ в исходном продукте. Применение виброкипящего слоя улучшает перемешивание материала и тем самым в несколько раз повышает величину коэффициентов тепло- и массообмена, а также снижает энергозатраты [2–4].

Для изучения кинетических и гидродинамических зависимостей процесса сушки свекловичного жома разработана экспериментальная установка, позволяющая получать максимально точные и воспроизводимые результаты.

Исходными положениями при проектировании и изготовлении установки является надежная герметизация, возможность оперативного контроля и регулирования технологических параметров в широком диапазоне, надежность и безопасность в работе [5, 6].

На рисунке 1 представлена схема разработанной установки, спроектированной методом 3D моделирования.

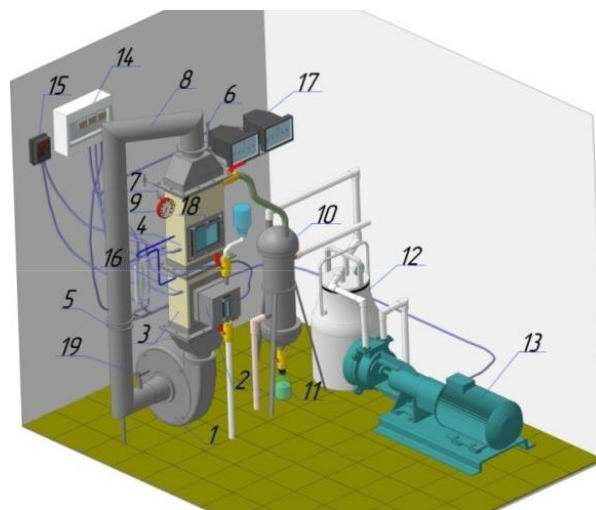


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Figure 1. The scheme of the experimental setup

Позиции на чертеже: 1 – вентилятор среднего давления; 2 – парогенератор; 3 – сушильная камера; 4 – газораспределительная решетка; 5 – камерная диафрагма; 6 – шток; 7 – устройство для загрузки материала; 8 – рециркуляционный трубопровод; 9 – вакуумметр; 10 – конденсатор; 11 – сборник конденсата; 12 – ресивер; 13 – водокольцевой вакуум-насос; 14 – щит управления; 15 – измеритель-регулятор температуры; 16 – хромель-капелевые термопары; 17 – манометры типа; 18 – окно разгрузки; 19 – заслонка

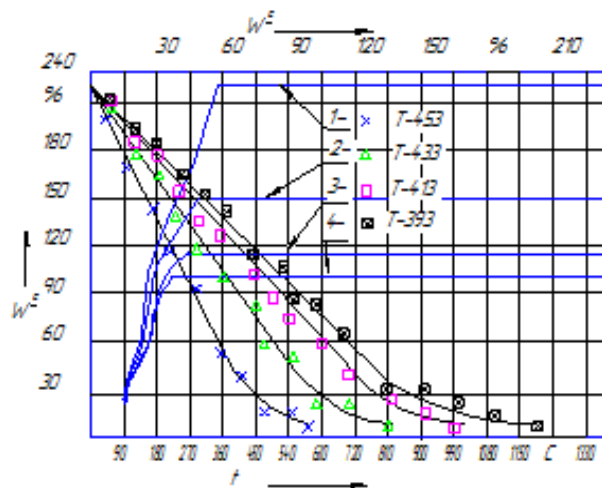
Кинетические закономерности процесса сушки свекловичного жома перегретым паром в импульсном виброкипящем слое

Исследования по кинетике сушки проводятся в периодическом режиме на экспериментальной сушильной установке (рисунок 1). При этом влажность продукта определяется методом отбора проб. Для этого изготовлено специальное устройство, которое позволяет отбирать пробы без разгерметизации установки. Причем отбор проб производится по длине и высоте рабочей камеры с целью определения равномерности сушки продукта. Окончательную влажность жома определяем высушиванием продукта в сушильном шкафу при температуре 378 К согласно методике, предусмотренной ТУ ОСТ 18-22-81 «Жом сушеный».

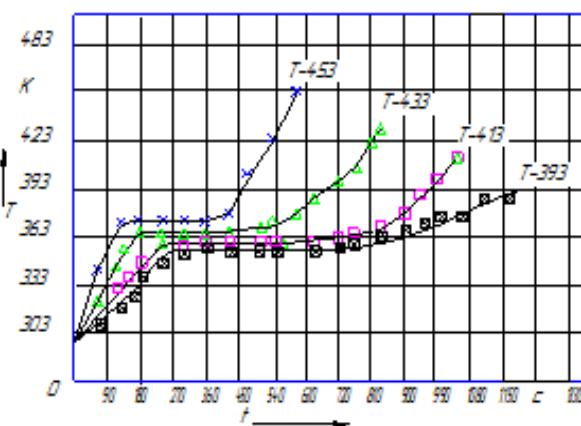
Параметры процесса сушки в каждом опыте поддерживаются постоянными в интервале значений: температура перегретого пара на входе в рабочую камеру $T_n = 393\text{--}453\text{ К}$, давление в камере $P_n = 40\text{--}100\text{ КПа}$, скорость пара в рабочей камере $v_n = 3\text{--}5\text{ м/с}$. Амплитуда и частота колебаний газораспределительной решетки остаются неизменными и составляют соответственно $a = 7\text{ мм}$ и $f = 12,5\text{ Гц}$, частота пульсаций колебаний решетки изменяется от $f_n = 0,0083\text{ Гц}$ (одна пульсация в две минуты) до $f_n = 0,04\text{ Гц}$

(одна пульсация в 25 секунд), начальная удельная нагрузка жома на решетку $q = 8.24 \text{ кг/м}^2$, начальная влажность жома $W_n^c = 216\%$ по отношению к сухим веществам.

Угол наклона решетки α во всех опытах составляет 0° , а угол направления вибрации β равен 90° и тоже остается неизменным.



(a)



(b)

Рисунок 2. (a) Кривые сушки $W^c = f(t)$ (1–4) и скорости сушки $dW^c/dt = f(W^c)$ (1–4) свекловичного жома при различных температурах перегретого пара; (b) Кривые нагрева $T_m = f(t)$ свекловичного жома при различных температурах перегретого пара, К.

Figure 2. (a) Drying curves $W^c = f(t)$ (1–4) and drying rate $dW^c/dt = f(W^c)$ (1–4) of beet pulp at various temperatures of superheated steam; (b) Heating curves $T_m = f(t)$ of beet pulp at different temperatures of superheated stem, К.

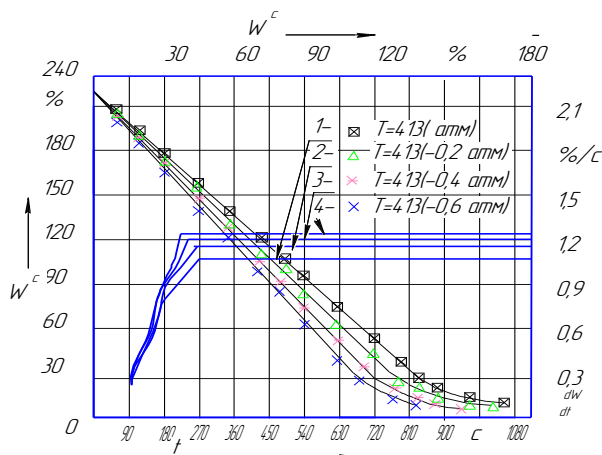


Рисунок 3. Кривые сушки $W^c = f(t)$ (1–4) и скорости сушки $dW^c/dt = f(W^c)$ (1–4) жома при различном давлении внутри сушильной камеры, Па 1 – 100кПа, 2 – 80кПа, 3 – 60кПа, 4 – 40кПа

Figure 3. The drying curves are $W^c = f(t)$ (1–4) and the drying rate $dW^c/dt = f(W^c)$ (1–4) pulp at different pressures inside the drying chamber, Pa 1–100 kPa, 2–80 kPa, 3–60 kPa, 4–40 kPa

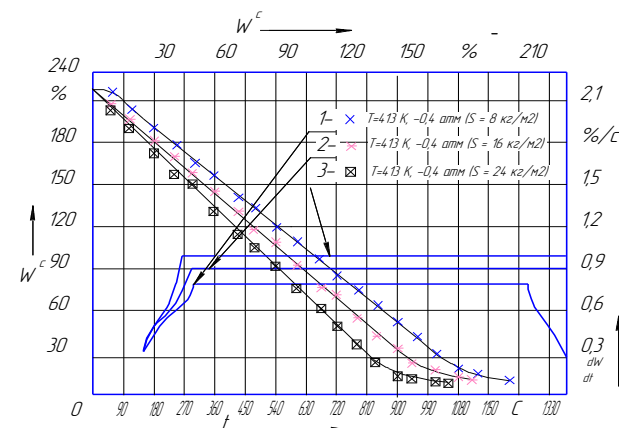


Рисунок 4. Кривые сушки $W^c = f(t)$ (1–3) и скорости сушки $dW^c/dt = f(W^c)$ (1–3) жома при различной удельной нагрузке, кг/м²

Figure 4. The drying curves $W^c = f(t)$ (1–3) and the drying rate $dW^c/dt = f(W^c)$ (1–3) of pulp at different specific loads, kg / m²

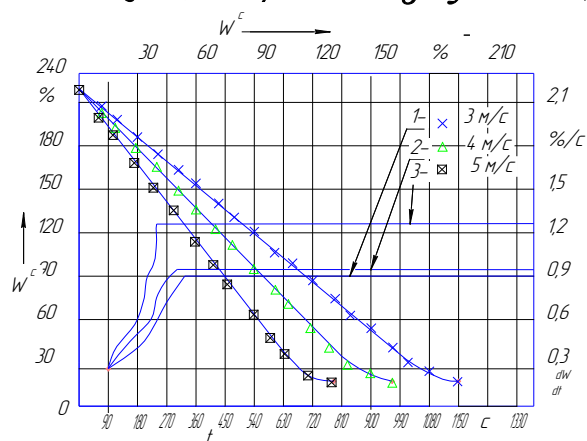


Рисунок 5. Кривые сушки $W^c = f(\tau)$ (1–3) и скорости сушки $dW^c/d\tau = f(W^c)$ (1–3) жома при различной скорости перегретого пара, м/с

Figure 5. The drying curves are $W^c = f(\tau)$ (1–3) and the drying rate $dW^c/d\tau = f(W^c)$ (1–3) of pulp at different superheated steam velocity, m / s

Характер изменения кривых соответствует периодам постоянной и убывающей скорости сушки. Причем конденсации перегретого пара на поверхности частиц не наблюдается. Это можно объяснить высокими коэффициентами тепло-массообмена и высокой начальной влажностью жома, вследствие которой уже в самый начальный момент процесса происходит испарение влаги с поверхности частиц [7].

Увеличение температуры перегретого пара от 120 до 180 °С при разряжении 60 кПа способствует возрастанию скорости сушки в первом периоде на 50%. При этом температура продукта в этом периоде практически одинакова. Больше влияние на температуру продукта, как и ожидалось, оказывает разряжение в сушильной камере. Так снижение давления от 100 кПа до 40 кПа позволяет снизить температуру продукта в первом периоде с 97 до 75 °С, а конечная температура продукта не превышает 70–75 °С, что несомненно положительно сказывается на качестве готового продукта. При этом необходимо отметить, что время высушивания в данном опыте незначительно изменяется. Это объясняется изменением гидродинамической обстановки в камере при увеличении разряжения перегретого пара.

Увеличение скорости движения перегретого пара также ускоряет процесс высушивания, что обусловлено увеличением виброкипящего слоя и, следовательно, удаление влаги с поверхности материала проходит наиболее интенсивно.

При увеличении удельной нагрузки материала на поверхность газораспределительной решетки повышается сопротивление материала, что замедляет процесс сушки.

Таким образом можно сделать вывод, что данный способ энергоподвода позволяет сохранить достоинства сушки перегретым паром (высокие коэффициенты тепло – массообмена, отсутствие кислорода) и при этом снизить температуру материала для повышения качества готового продукта.

Обоснование выбора и пределов изменения входных факторов.

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления, применяются математические методы планирования эксперимента [3]. Математическое описание данного процесса может быть получено эмпирически. При этом его математическая модель имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов. Математическая модель изучаемого процесса представлена в виде полинома второй степени

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

где b_0 – свободный член уравнения, равный средней величине отклика при условии, что рассматриваемые факторы находятся на средних, «нулевых», уровнях; X – масштабированные значения факторов, которые определяют функцию отклика и поддаются варьированию; b_{ij} – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, показывающие, насколько изменяется степень влияния одного фактора при изменении величины другого; b_{ii} – коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов; i, j – индексы факторов; n – число факторов в матрице планирования.

Выбираем следующие основные факторы, влияющие на процесс сушки свекловичного жома: X_1 – температура перегретого пара на входе в рабочую камеру, К; X_2 – давление перегретого пара в рабочей камере, кПа; X_3 – скорость перегретого пара в рабочей камере, м/с; X_4 – удельная нагрузка свекловичного жома на газораспределительную решетку, кг/м³.

Все эти факторы не коррелируемы между собой. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1

Пределы изменения входных факторов

Table 1.

Limits of change in input factors

Условия планирования Planning conditions	Кодированное значение Coded value	Значения факторов в точках плана Values of factors in the points of the plan			
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
		t _п , K t _с , K	P _п , кПа P _с , kPa	V _п , м/с V _с , m/s	q _{уд} , кг/м ² q, kg/m ²
Основной уровень Basic level	0	423	70	4	16
Интервал варьирования Variation interval	Δ	15	15	0.5	4
Верхний уровень Top level	+1	438	80	4.5	20
Нижний уровень Lower level	-1	408	60	3.5	12
Верхняя «звездная» точка The top “star” point	+2	453	40	5	24
Нижняя «звездная» точка The lower “star” point	-2	393	100	3	8

Выбор интервалов изменения входных факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки свекловичного жома в активных гидродинамических режимах, возможностью уноса частиц материала из сушильной камеры, а также технико-экономическими показателями процесса.

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс сушки свекловичного жома являются: Y₁ – удельные энергозатраты процесса сушки, отнесенные на 1 кг испаренной влаги, (кВт×ч) /кг; Y₂ – влагонапряжение сушильной камеры, кг/(м³·с).

Выбор критериев оценки Y обусловлен их наибольшей значимостью для процесса сушки свекловичного жома. Так, Y₁ определяет энергоемкость процесса и является важным показателем в оценке его энергетической

эффективности, Y₂ определяет производительность процесса сушки и напрямую связан с его скоростью.

Для исследования применяем центральное композиционное ротатабельное униформпланирование и полный факторный эксперимент ПФЭ 24. Число опытов в матрице планирования для четырех входных параметров равно 32. Порядок опытов рандомизировали посредством таблицы случайных чисел, что исключает влияние неконтролируемых параметров на результаты эксперимента. При их обработке применяем следующие статистические критерии: Кохрена, Стьюдента, Фишера. В результате получаем нелинейные уравнения регрессии, описывающие данный процесс:

$$Y_1 = 2.55 + 0.25X_1 - 0.056X_2 + 0.064X_3 - 0.16X_4 + 0.099X_1^2 + 0.0125X_2^2 - 0.05X_3^2 + 0.184X_4^2 + 0.025X_1X_2 - 0.05X_1X_3 - 0.094X_1X_4 - 0.0076X_2X_3 + 0.033X_2X_4 - 0.1X_3X_4 \quad (2)$$

$$Y_2 = 1.536 + 0.34X_1 - 0.04X_2 + 0.176X_3 - 0.24X_4 + 0.1457X_1^2 + 0.07X_2^2 - 0.07X_3^2 + 0.01X_4^2 + 0.047X_1X_2 - 0.05X_1X_3 - 0.12X_1X_4 - 0.0033X_2X_3 + 0.0008X_2X_4 - 0.06X_3X_4 \quad (3)$$

В результате выполнения тридцати двух опытов получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать удельные энергозатраты и влагонапряжение объема сушильной камеры внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

На рисунках 6–10 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые несут смысл номограмм и представляют практический интерес.

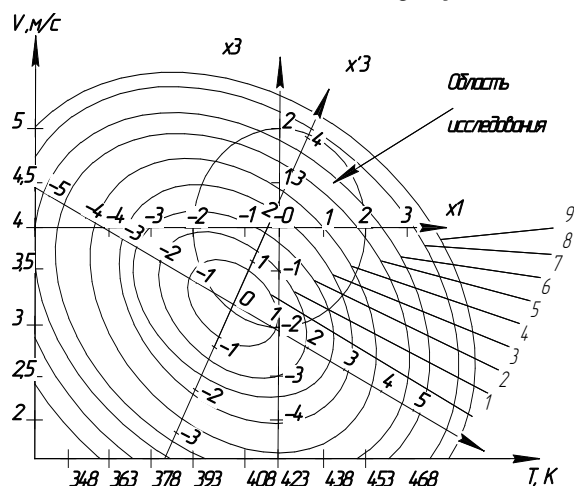


Рисунок 6. Кривые равных значений удельных энергозатрат от температуры перегретого пара на входе в камеру t_n (K) и скорости перегретого пара в рабочей камере, (м/с): 1 – 2,35; 2 – 2,5; 3 – 2,65; 4 – 2,8; 5 – 2,95; 6 – 3,1; 7 – 3,25; 8 – 3,405; 9 – 3,56.

Figure 6. Curves of equal values of specific energy consumption from the temperature of superheated steam at the inlet to the chamber t_n (K) and the superheated steam velocity in the working chamber, (m / s): 1 – 2.35; 2 – 2.5; 3 – 2.65; 4 – 2.8; 5 – 2.95; 6 – 3.1; 7 – 3.25; 8 – 3.405; 9 – 3.56.

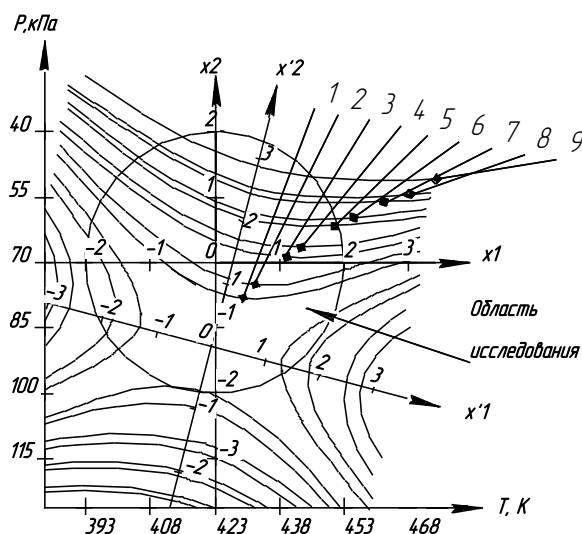


Рисунок 7. Кривые равных значений влагонапряжения от температуры перегретого пара на входе в рабочую камеру t_n (K) и давления перегретого пара (кПа): 1 – 0,988; 2 – 1,257; 3 – 1,526; 4 – 1,795; 5 – 2,064; 6 – 2,333; 7 – 2,602; 8 – 2,871; 9 – 3,14.

Figure 7. Curves of equal values of moisture stress from the temperature of superheated steam at the inlet to the working chamber t_n (K) and the superheated vapor pressure (kPa): 1 – 0.988; 2 – 1.257; 3 – 1.526; 4 – 1.795; 5 – 2.064; 6 – 2.333; 7 – 2.602; 8 – 2.871; 9 – 3.14.

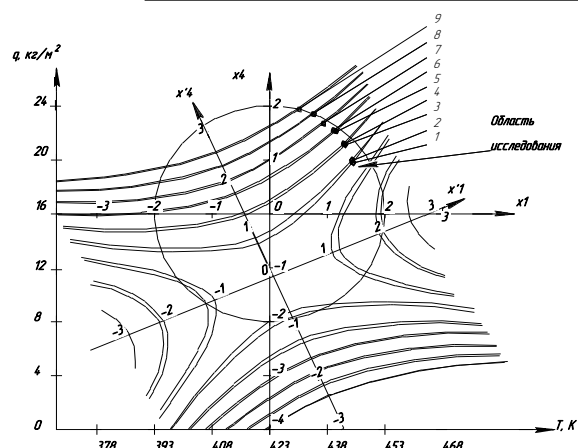


Рисунок 8. Кривые равных значений удельных энергозатрат от температуры перегретого пара на входе в рабочую камеру t_n (K) и удельной нагрузки свекловичного жома на газораспределительную решетку, (кг/м²): 1 – 2,35; 2 – 2,5; 3 – 2,65; 4 – 2,8; 5 – 2,95; 6 – 3,1; 7 – 3,25; 8 – 3,405; 9 – 3,56.

Figure 8. Curves of equal values of specific energy consumption from the temperature of superheated steam at the inlet to the working chamber t_n (K) and the specific load of beet pulp on the gas distribution grid, (kg / m²): 1 – 2.35; 2 – 2.5; 3 – 2.65; 4 – 2.8; 5 – 2.95; 6 – 3.1; 7 – 3.25; 8 – 3.405; 9 – 3.56.

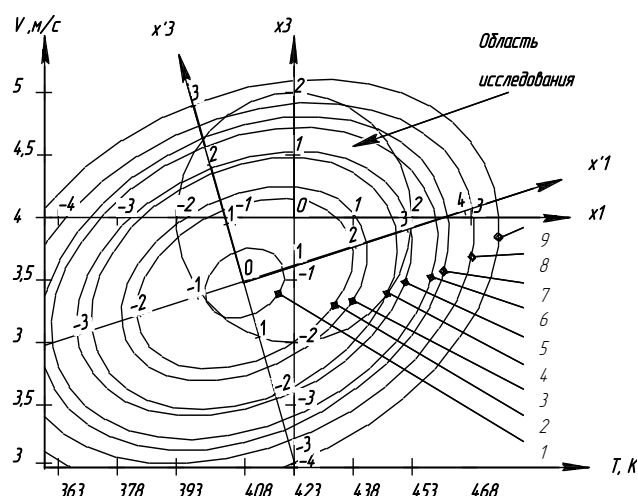


Рисунок 9. Кривые равных значений влагонапряжения от температуры перегретого пара на входе в камеру t_n (K) и скорости перегретого пара в рабочей камере, (м/с): 1 – 0,988; 2 – 1,257; 3 – 1,526; 4 – 1,795; 5 – 2,064; 6 – 2,333; 7 – 2,602; 8 – 2,871; 9 – 3,14.

Figure 9. Curves of equal values of the moisture stress from the temperature of superheated steam at the inlet to the chamber t_n (K) and the superheated steam velocity in the working chamber, (m / s): 1 – 0.988; 2 – 1.257; 3 – 1.526; 4 – 1.795; 5 – 2.064; 6 – 2.333; 7 – 2.602; 8 – 2.871; 9 – 3.14.

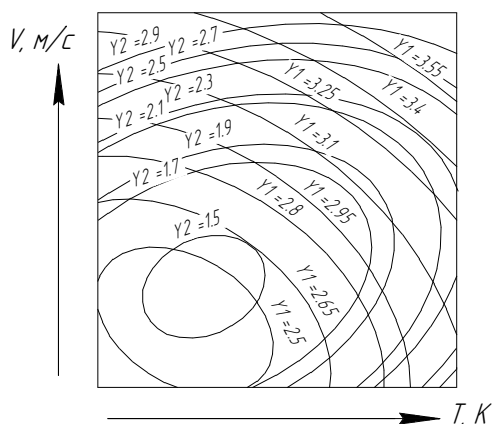


Рисунок 10. Номограмма для определения энергоёмкости процесса (Y_1) и влагонапряжения процесса сушки (Y_2) в зависимости от температуры и скорости перегретого пара

Figure 10. A nomogram for determining the energy intensity of the process (Y_1) and the moisture stress of the drying process (Y_2) as a function of temperature and superheated steam velocity

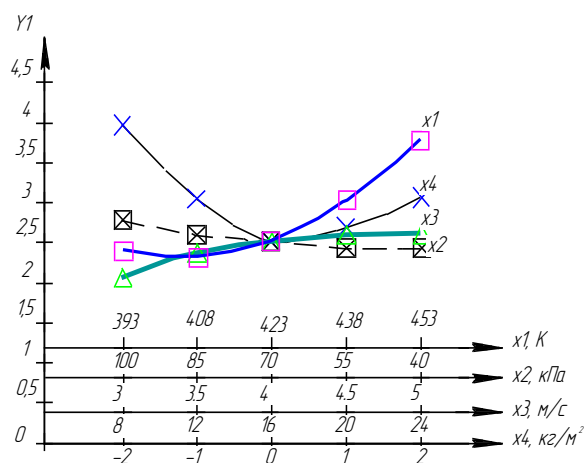


Рисунок 11. Зависимость удельных энергозатрат сушильной камеры от входных параметров

Figure 11. Dependence of the specific energy consumption of the drying chamber on the input parameters

Определение оптимальных интервалов варьирования входных факторов. Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы сушилки, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров процесса сушки доставляли минимум влагонапряжения сушильной камеры. На рисунках 11 и 12 представлены зависимости удельных энергозатрат и влагонапряжения от входных параметров удельных энергозатрат и максимум. Общая математическая постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$\begin{aligned} q &= q(Y_1 Y_2) \xrightarrow{x \in D} \text{opt}; \\ D: Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) &\xrightarrow{x \in D} \min; \\ Y_{21}(X_1, X_2, X_3, X_4) &\xrightarrow{x \in D} \max; \\ Y_i &\geq 0, i = \overline{1, 2}; X_j \leq [-2; 2], j = \overline{1, 4} \end{aligned} \quad (4)$$

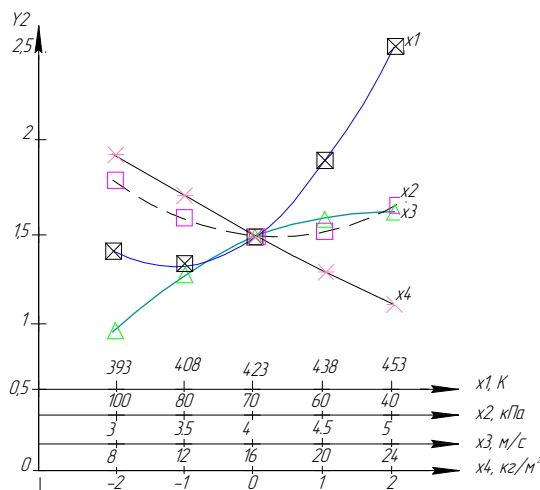


Рисунок 12. Зависимость влагонапряжения сушильной камеры от входных параметров

Figure 12. Dependence of the humidity of the drying chamber on the input parameters

Таблица 2.

Оптимальные интервалы параметров

Table 2.

Optimal parameter intervals

Y_i	X_1, K		X_2, kPa		$X_3, m/s$		$X_4, kg/m^2$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Y_1	393	408	80	40	3	3.5	16	20
Y_2	438	453	100	60	4.5	5	8	12

В результате были получены рациональные интервалы изменения параметров: $X_1 = 418-428 K$; $X_2 = 60-80 kPa$; $X_3 = 3.5-4.5 m/s$; $X_4 = 12-16 kg/m^2$.

Для проверки правильности результатов был поставлен ряд параллельных экспериментов.

Полученные результаты попадали в рассчитанные доверительные интервалы по всем критериям качества. При этом среднеквадратичная ошибка не превышала 6,1%.

Заключение

Разработанная статистическая модель сушки свекловичного жома в среде перегретого пара пониженного давления может быть использована при конструкторской разработке оригинальных конструкций сушильных установок

ЛИТЕРАТУРА

1 Орлов В.Д., Заборсин А.Ф., Иваницкая Л.Г., Позняк А.С. и др. Интенсификация процессов жомосушильного производства и перспективы его развития. М.: АгроНИИТЭИПП, 1990. 24 с.

2 Andersson V. Beet pulp drying using pressurized superheated steam // Int. Sugar J. 1999. V. 101. № 1207. P. 340–344.

3 Hepbasli A. Exergoeconomic analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer // Drying Technology. 2010. V. 28. P. 1385–1395.

4 Шевцов А.А., Дранников А.В., Пономарев А.В., Лесных Т.В. Эксергетический подход к термодинамическому анализу процесса сушки свекловичного жома // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 12. С. 8–12.

5 Пат. № 2603225 РФ, F 26 В 17/10, F 26 В 17/26 Установка для сушки дисперсных высоковлажных материалов / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.В. Костина, А.А. Дерканосова, А.В. Квасов, Ю.А. Питькова, А.В. Мочалова. № 2015126304/06; Заявл. 02.07.2015; Опубл. 27.11.2016; Бюл. № 33.

6 Шевцов А.А., Дранников А.В., Подрезова А.А., Лесных Т.В. Сбалансированное теплоснабжение жомосушильного отделения свеклосахарного завода // Вестник ВГУИТ. 2012. № 3. С. 153–156.

7 Дранников А.В., Дерканосова А.А., Муравьев А.С., Коротаева А.А. Кинетические закономерности и определение продолжительности сушки высоковлажных дисперсных материалов // Международная научно-техническая конференция «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014): сборник трудов (секционные доклады). Иваново, 2014. С. 49–53.

8 Пат. № 2581012 РФ, F 26 В 25/22 Способ автоматического управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, С.В. Куцов, А.А. Дерканосова, Е.В. Костина, А.В. Квасов. № 2015111668/06; Заявл. 01.04.2015; Опубл. 10.04.2016; Бюл. № 10.

9 Емельянов А.Б., Кононов Н.Р., Юсупов С., Мягков А.А. К вопросу развития исследований ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 3. С. 148–153. doi:10.20914/2310-1202-2017-3-148-153

10 Луковкин С.Б., Хохлова Л.И., Шиманский С.А. Моделирование процесса сушки древесного сырья для последующего использования его при копчении рыбы // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 30–36. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-30-36.

11 Шевцов А.А., Дранников А.В., Шенцова Е.С., Дерканосова А.А. и др. Выбор рациональных параметров хранения премикса с содержанием холинхлорида // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 5-6. С. 68–71.

и управляющей аппаратуры для высокоинтенсивного проведения процесса [8].

Решена задача оптимизации, которая позволила выделить оптимальную область изменения входных факторов по двум критериям посредством компромиссных решений.

REFERENCES

1 Orlov V.D., Zaborsin A.F., Ivanitskaya L.G., Poznyak A.S. et al. Intensification of the processes of pulp drying and prospects for its development. Moscow, AgronitEIPP, 1990, 24 p. (in Russian)

2 Andersson V. Beet pulp drying using pressurized superheated steam. Int. Sugar J. 1999. vol. 101. no. 1207. pp. 340–344.

3 Hepbasli A. Exergoeconomic analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer. Drying Technology. 2010. vol. 28. pp. 1385–1395.

4 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Ponomarev A.V., Lesnykh T. V. Exergetic approach to the thermodynamic analysis of the drying process of beet pulp. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of agricultural raw materials] 2012. no. 12. pp. 8–12. (in Russian)

5 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Kostina E.V., Derkanosova A.A. et al. Ustanovka dlya sushki [Installation for drying dispersed high-moisture materials] Patent RF, no. 2603225, 2016. (in Russian)

6 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Podrezova A.A., Lesnykh T. V. Balanced heat supply of pulp drying department of sugar beet plant. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2012. no. 3. pp. 153–156 (in Russian)

7 Drannikov A.V., Derkanosova A.A., Muraviev A.S., Korotayeva A.A. Kinetic regularities and determination of the drying time of high-moisture dispersed materials. Problemy resurso- i energosberegayushchikh tekhnologii [International Scientific and Technical Conference "Problems of resource and energy-saving technologies in industry and agro-industrial complex" (PRET-2014): a collection of papers (section reports)] Ivanovo, 2014. pp. 49–53. (in Russian)

8 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Kutsov S.V., Derkanosova A.A. et al. Sposob avtomaticheskogo upravleniya protsessom sushki [A method for automatic control of the drying process of high-moisture dispersed materials] Patent RF, no. 2581012, 2016. (in Russian)

9 Emel'janov A.B., Kononov N.R., Jusupov S., Mjagkov A.A. On the development of research on resource and energy-saving processes in the chemical and related industries. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 3. pp. 148–153. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-3-148-153.

10 Lukovkin S.B., Hohlova L.I., Shimanskiy S.A. Modeling of drying process of wood raw material for its subsequent use at fish smoking. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 30–36. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-2-30-36.

11 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Shentsova E.S., Derkanosova A.A., Yasinetskaya V.P. The choice of rational parameters for premix storage with choline chloride content. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*. [News of universities. Food technology] 2009. no. 5-6. pp. 68–71. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru

Евгений В. Литвинов к.т.н., доцент, кафедра технической механики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, zenlit@yandex.ru

Андрей С. Полканов студент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, andrej.polkanov.96@mail.ru

Дарья К. Костина студент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kostina.dasha.2111@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Алексей В. Дранников предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Евгений В. Литвинов консультация в ходе исследования
Андрей С. Полканов провёл эксперимент, выполнил расчёты

Дарья К. Костина написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 30.09.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 17.11.2017

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksey V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, Machinery and food production machines department, , Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru

Evgene V. Litvinov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technical mechanics department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, zenlit@yandex.ru

Andrey S. Polkanov student, Machinery and food production machines department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, andrej.polkanov.96@mail.ru

Darya K. Kostina student, Machinery and food production machines department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kostina.dasha.2111@mail.ru

CONTRIBUTION

Aleksey V. Drannikov proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Evgene V. Litvinov consultation during the study
Andrey S. Polkanov conducted an experiment, performed computations

Darya K. Kostina wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 9.30.2017

ACCEPTED 11.17.2017