

УДК 664:66.047

Профессор С.Т. Антипов, доцент А.В. Журавлев,
аспирант А.В. Бородкина

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств.
тел. (473) 255-55-57

ведущий специалист А.Ю. Баранов

(ООО «Аскон – Воронеж»)

Professor S.T. Antipov, associate Professor A.V. Zhuravlev,
graduate student A.V. Borodkina

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств.
тел. (473) 255-38-96

E-mail: vini-46@yandex.ru

leading specialist A.U. Baranov

(Ltd. «Askon-Voronezh»)

Исследование кинетики сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя

Study of drying kinetics of buckwheat in the dryer with twisted coolant flows

Реферат. Сушка семян гречихи является одной из важнейших стадий подготовки данного сырья к последующему процессу его переработки. От режима сушки зависят пищевая ценность и качественные показатели готовой продукции, являющиеся результатом структурно-механических, биологических и физико-механических преобразований веществ. Технологические режимы сушки семян гречихи зависят от содержания в них воды и оказывают существенное влияние на изменение углеводов, денатурацию белка, окисления липидов, изменения витаминов и органических кислот. Предложен новый способ сушки гречихи и спроектирована и изготовлена экспериментальная сушильная установка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя. Для исследования и постановки опытов с целью определения оптимального режима сушки было применено центральное композиционное равномер-ротационное планирование и выбран полный факторный эксперимент. Проведены исследования кинетики сушки и теплообмена зерна гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Исследовано влияние различных параметров на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителями. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя. На основании экспериментальных данных и их статистической обработки была получена математическая модель, адекватно описывающая процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя. Определен характер изменения критериев оптимизации в зависимости от входных факторов. Результаты математической модели будут полезны широкому кругу специалистов, занимающихся сушкой гречихи, а также для расчета и проектирования современных сушильных установок.

Summary. Drying of buckwheat seeds is one of the most important stages of preparation of this raw material to the subsequent process of its processing. The nutritional value and quality indicators of the finished product depend on the mode of drying and are the result of structural, mechanical, biological and physico-mechanical transformations of substances. Technological modes of drying buckwheat seeds depend on the content of water and have a significant effect on the change of carbohydrates, protein denaturation, oxidation of lipids, changes of vitamins and organic acids. A new method of drying buckwheat and designed and constructed an experimental dryer with adjustable swirling flow of the coolant is proposed. For the study of the experiments and to determine the optimal mode of drying was used central composite rotatable uniforms - planning and selected full factorial experiment. The kinetics of drying and heat buckwheat in the device with twisted coolant flow was investigated. The influence of various parameters on the drying kinetics of buckwheat in the dryer with twisted coolant flow was investigated. Presents the results of experimental studies, buckwheat drying in the dryer with twisted coolant flows. On the basis of experimental data and their statistical processing was obtained a mathematical model that adequately describes the process of drying buckwheat in the device with twisted coolant flow. The character of changes in the criteria optimization depending on the input factors was determined. The results of the mathematical model will be useful to a wide range of professionals involved in drying buckwheat, as well as for the calculation and design of modern drying - boiler systems.

Ключевые слова: сушка, гречиха, исследование, сушилка с закрученными потоками, тепло- массообмен.

Keywords: drying, buckwheat, research, dryer with swirling flow, heat and mass exchange.

© Антипов С.Т., Журавлев А.В., Бородкина А.В., 2014

Гречиха одна из наиболее важных сельскохозяйственных культур, являющаяся незаменимым продуктом питания. Гречневая крупа имеет высокие вкусовые качества, питательна, хорошо усваивается. Гречневую крупу относят к числу лучших диетических продуктов. Кроме того, гречиха является хорошим медоносом, а высокая усваивающая способность ее корневой системы способствует повышению плодородия почвы [1].

Зерно гречихи отличается высоким содержанием незаменимых аминокислот. По одной из важнейших незаменимых аминокислот – лизину – зерно гречихи превосходит зерно проса, пшеницы, ржи, риса и приближается к соевым бобам. По содержанию треонина зерно гречихи превосходит зерно проса, пшеницы и ржи, а по содержанию валина уступает лишь рису.

По содержанию валина зерно гречихи может быть приравнено к молоку, по лейцину – к говядине, фенилаланину – к молоку и говядине. По содержанию триптофана зерно гречихи не уступает продуктам животного происхождения.

Сушка семян гречихи является одной из важнейших стадий подготовки данного сырья к последующему процессу его переработки. От режима сушки зависят пищевая ценность и качественные показатели готовой продукции, являющиеся результатом структурно-механических, биологических и физико-механических преобразований веществ. Технологические режимы сушки семян гречихи зависят от содержания в них воды и оказывают существенное влияние на изменение углеводов, денатурацию белка, окисления липидов, изменения витаминов и органических кислот.

Для изучения процессов, происходящих в сушильных установках, не достаточно знаний только свойств высушиваемого материала. Необходимо также знать кинетические характеристики и особенности термодинамики. Важное значение при этом имеет рациональное сочетание экспериментальных данных и методов математического анализа, которые определяют взаимосвязь величин, оказывающих наибольшее влияние на специфику тепло- и массообмена в процессе сушки [1].

Для исследования кинетики сушки гречихи была спроектирована и изготовлена экспериментальная сушильная установка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя, конструкция которой представлена на рисунках 1, 3, 4 [2, 3, 4, 5].

Для исследования влияния параметров процесса сушки на качество получаемого продукта и обоснование режима сушки гречихи

было выполнено планирование эксперимента, позволяющее варьировать одновременно все факторы и получать количественные оценки эффектов их взаимодействия.

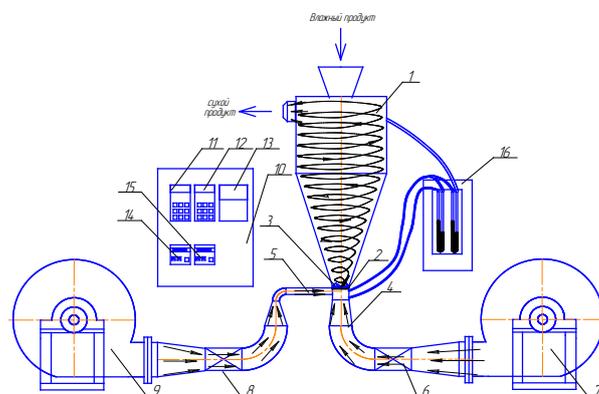


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 – сменная сушильная камера; 2- завихритель; 3 – удерживающая решетка; 4 - осевой патрубок для подачи сушильного агента; 5 – тангенциальный патрубок для подачи сушильного агента; 6, 8 – калориферы; 7, 9 – вентиляторы; 10 – щит управления; 11, 12 – частотные преобразователи для регулирования подачи вентиляторов; 13 – электрический счетчик; 14, 15 – регуляторы температуры в калориферах, 16 – трубка пито

Удельная нагрузка на объем конической части сушильной камеры является функцией вида $G_{\text{уд}}^k = f(m, V_k)$ и определяется следующей зависимостью:

$$G_{\text{уд}}^k = \frac{m}{V_k}, \quad (1)$$

где m – масса загружаемого материала, кг; V_k – объем конической части сушильной камеры, м^3 .

$$V_k = \frac{1}{3} \pi \cdot H (R^2 + R \cdot r + r^2), \quad (2)$$

где R – внутренний диаметр цилиндрической части сушильной камеры, м; r – внутренний диаметр нижнего основания конуса, м; H – высота конической части сушильной камеры, м.

Учитывая (1-2), запишем, что:

$$G_{\text{уд}}^k = \frac{3 \cdot m}{\pi \cdot H (R^2 + R \cdot r + r^2)}. \quad (3)$$

Таким образом, видно, что $G_{\text{уд}}^k$ зависит и от геометрических размеров сушильной камеры.

Из ранее проведенных экспериментальных исследований установлено, что изменение осевого расхода агента $Q_{\text{ос}}$, $\text{м}^3/\text{с}$, от удельной нагрузки на объем конической части сушильной камеры $G_{\text{уд}}^k$, $\text{кг}/\text{м}^3$, при прорыве и последующем образовании канала в слое ма-

териала связаны между собой следующей зависимостью (рисунок 2):

$$Q_{oc} = 294,33 + 7215,8 \cdot D^2 - 1652,8 \cdot D \quad (4)$$

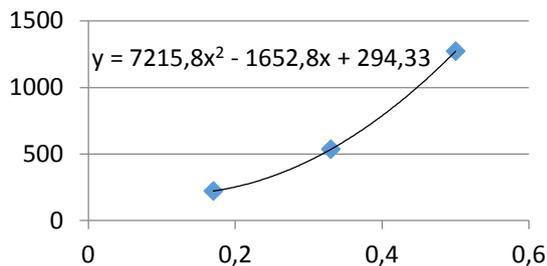


Рисунок 2. Зависимость осевого расхода агента Q_{oc} , м/с, от удельной нагрузки на объем конической части сушильной камеры, кг/м³

Для исследования и постановки опытов с целью определения оптимального режима сушки было применено центральное композиционное униформ-ротатабельное планирование и выбран полный факторный эксперимент.

На основании литературных данных из множества факторов, влияющих на процесс сушки, для исследования были выбраны следующие: температура T_{ca} сушильного агента, соотношение диаметров конической части корпуса D/d и расход Q_t тангенциально подводимого потока теплоносителя. От этих параметров зависит не только скорость сушки, но и качество высушиваемого материала. Изучая их взаимное влияние на процесс, можно выявить оптимальный режим сушки и оптимальную конструкцию камеры (рисунок 3).

Выбор критериев оценки у обусловлен их наибольшей значимостью для процесса сушки. Так y_1 - удельные энергозатраты на килограмм готовой продукции, определяет энергоемкость процесса и является одним из важных показателей, оценивающих его энергетическую эффек-

тивность, (кВт·ч)/кг; y_2 – напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге определяет производительность процесса, и напрямую связана с его скоростью, кг_{вл}/(м³·ч).

Все изучаемые факторы были совместимы и некоррелируемы между собой, а пределы их изменения приведены в таблице 1. Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки гречихи и техническими характеристиками сушилки.

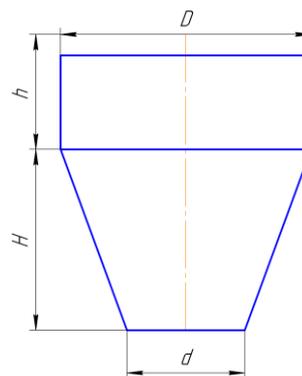


Рисунок 3. Схема сушильной камеры

Экспериментальная установка предусматривает наличие сменных конических вставок различного диаметра. Величины D , H и h во всех секциях остаются неизменными, $D=300$ мм, $H=200$ мм, $h=150$ мм.

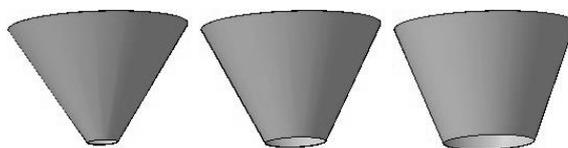


Рисунок 4. Сменные конические вставки

Т а б л и ц а 1

Интервалы изменения факторов

Условия планирования	Кодированное значение	Значение факторов в точках плана		
		x_1	x_2	x_3
		D/d	T_{ca}, K	$Q_t, M^3/ч$
Основной интервал	0	0.33	358	31
Интервал варьирования	Δ	0.17	15	31.5
Верхний уровень	+1	0.43	373	78.
Нижний уровень	-1	0.23	343	21.5
Верхняя «звездная точка»	+1,682	0.5	383	110
Нижняя «звездная точка»	-1,682	0.17	333	4

Удельная нагрузка на объем конической части сушильной камеры во всех опытах являлась величиной постоянной = 25.2 кг/м³. Программа исследований была заложена в матрицу планирования (в данной статье не представлена).

После статистической обработки экспериментальных данных, с учетом значимости коэффициентов, получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки гречихи под влиянием исследуемых факторов:

$$y_1 = 2,6 - 0,11x_1 - 0,09x_2 - 0,03x_3 - 0,04x_1^2 - 0,06x_2^2 - 0,03x_3^2 -$$

$$-0,06x_1x_2 - 0,03x_1x_3 - 0,08x_2x_3; \\ y_2 = 15,27 + 0,28x_1 + 0,75x_2 + 0,97x_3 - 0,68x_1^2 - 0,28x_2^2 - 0,36x_3^2 +$$

$$+0,27x_1x_2 + 0,11x_1x_3 + 0,37x_2x_3.$$

Анализ уравнения регрессии (5-6) позволяет выделить факторы, наиболее влияющие на рассматриваемый процесс сушки.

На удельные энергозатраты наибольшее влияние оказывает отношение d/D и температура сушильного агента, наименьшее – расход тангенциально подводимого потока. Степень влияния параметров относительно друг друга $b_1:b_3 = 1,458$, причем знак плюс перед коэффициентом при линейных членах указывает на то, что при увеличении входного параметра значение выходного параметра увеличивается, а знак минус – убывает.

На напряжение сушильной камеры по испаренной влаге наибольшее влияние оказывает отношение диаметров d/D и в меньшей степени – температура сушильного агента. Отношение коэффициентов, стоящих перед линейными членами, показывающих степень влияния параметров относительно друг друга, оказались равными: $b_3:b_1 = 1,117$.

Полученные уравнения (5-6) нелинейны. Таким образом, в результате выполнения 20-ти опытов получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать удельные энергозатраты на 1 кг высушенного материала, напряжение сушильной камеры по испаренной влаге внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

В условиях оптимального гидродинамического режима с использованием метода планирования эксперимента нами проведены исследования кинетики сушки и теплообмена зерна гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя (рисунок 1). Согласно полученным зависимостям можно найти время сушки, соответствующее определенной влажности W .

Влияние температуры теплоносителя на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рисунке 5.

Полученные кривые свидетельствуют о том, что температура теплоносителя является одним из наиболее существенных факторов, влияющих на скорость сушки семян. Следует отметить, что температура теплоносителя оказывает влияние на соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки. С по-

вышением температуры наблюдается снижение критической влажности. Это объясняется тем, что увеличение температуры интенсифицирует внутреннюю диффузию влаги, а также увеличением доли связанной влаги, испарение которой происходит в первый период сушки.

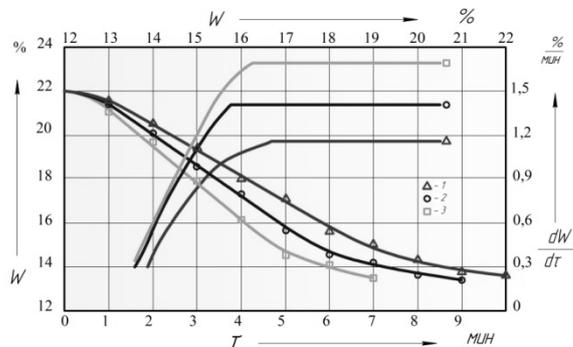


Рисунок 5. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:
1 – $D/d=0,33, T_{ca}=338 \text{ K}, Q\tau = 31 \text{ м}^3 / \text{ч}$
2 – $D/d=0,33, T_{ca}=358 \text{ K}, Q\tau = 31 \text{ м}^3 / \text{ч}$;
3 – $D/d=0,33, T_{ca}=383 \text{ K}, Q\tau = 31 \text{ м}^3 / \text{ч}$

Из рисунка видно, что наибольшая часть влаги удаляется в период постоянной скорости сушки. Это объясняется тем, что семена гречихи содержат большое количество осмотической и адсорбционно-связанной влаги. Наличие периода постоянной скорости сушки говорит о том, что интенсивность диффузии влаги превышает интенсивность влагообмена.

Влияние отношения D/d сушильной камеры на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рисунке 6.

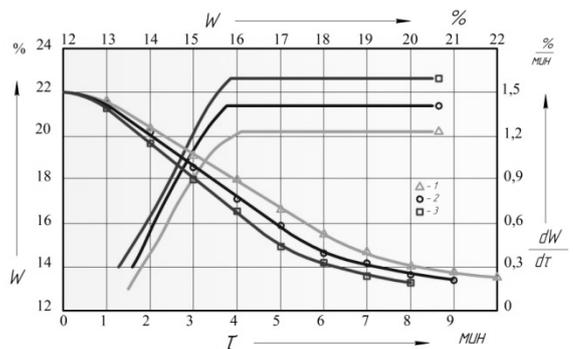


Рисунок 6. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:
1 – $D/d=0,5, T_{ca}=358 \text{ K}, Q\tau = 31 \text{ м}^3 / \text{ч}$
2 – $D/d=0,33, T_{ca}=358 \text{ K}, Q\tau = 31 \text{ м}^3 / \text{ч}$;
3 – $D/d=0,17, T_{ca}=358 \text{ K}, Q\tau = 31 \text{ м}^3 / \text{ч}$

Полученные кривые свидетельствуют о том, что соотношение диаметров конической части корпуса в сушилке с закрученными потоками оказывает существенное влияние на скорость сушки гречихи. Анализ кривых показывает, что в начале процесса, когда влажность материала уменьшается по кривой, имеет место кратковременная стадия прогрева ма-

териала. Продолжительность этой стадии зависит от высоты слоя продукта (чем меньше соотношение, тем выше высота слоя).

Влияние тангенциального расхода теплоносителя на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рисунке 7.

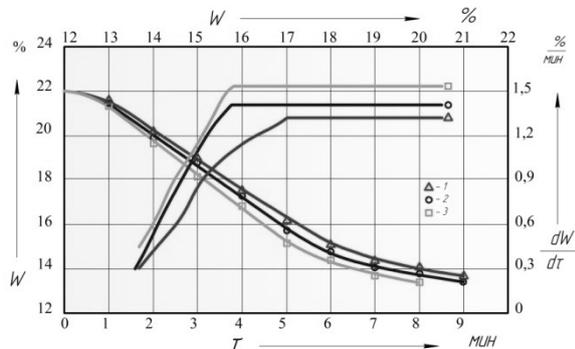


Рисунок 7. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

- 1 – $D/d=0.33, T_{ca}=358 \text{ K}, Q_{\tau}=4 \text{ м}^3 / \text{ч}$
- 2 – $D/d=0.33, T_{ca}=358 \text{ K}, Q_{\tau}=31 \text{ м}^3 / \text{ч}$;
- 3 – $D/d=0.33, T_{ca}=358 \text{ K}, Q_{\tau}=110 \text{ м}^3 / \text{ч}$

Из графика видно, что величина тангенциального расхода теплоносителя в незначительной степени влияет на изменение скорости влагоудаления по отношению к другим факторам.

Установлено, что скорость сушки гречихи в начале процесса резко увеличивается,

(период прогрева), достигает максимального значения и остается постоянной (первый период). Когда влажность продукта достигнет первой критической точки, скорость сушки уменьшается по кривой, обращенной выпуклостью к оси ординат. Для такой формы кривой первая ее часть (читая график, справа налево) соответствует перемещению капиллярной влаги при решающем влиянии коэффициента диффузии, а вторая часть – адсорбционно-связанной. Вторая критическая точка (точка перегиба кривой скорости сушки) соответствует границе адсорбционной и капиллярной влаги.

На основании экспериментальных данных установлены кинетические закономерности процесса сушки гречихи в аппарате с закрученными потоками теплоносителя. По результатам планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных была получена статистическая математическая модель, адекватно описывающая процесс сушки гречихи в аппарате с закрученными потоками теплоносителя и установлено влияние различных факторов на кинетику процесса сушки. Результаты будут полезны широкому кругу специалистов, занимающихся сушкой гречихи, а также для расчета и проектирования современных сушильных установок.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Антипов С. Т., Журавлев А.В., Бородкина А.В., Баранов А.Ю. Исследование форм связи влаги семян гречихи методом термического анализа // Вестник ВГУИТ. 2013. № 2. С. 25-28.
- 2 Антипов С. Т., Прибытков А.В., Журавлев А.В. Установки для сушки высоковлажных полидисперсных вторичных материальных ресурсов пищевой промышленности // Инженер, технолог, рабочий. 2005. № 12. С. 7 – 11.
- 3 Антипов С. Т., Казарцев Д.А., Журавлев А.В., Е.С. Бунин и др. Новые технические решения в технике сушки дисперсных материалов // Техника машиностроения. 2009. № 1. С. 55-58.
- 4 Журавлев А.В., Бородкина А.В., Баранов А.Ю. Разработка высокоинтенсивной сушилки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя // Вестник ВГУИТ. 2013. № 4. С. 47-50.
- 5 Пат. 2480693 Российская Федерация, МКП7 F26В 17/10. Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя / Антипов С.Т., Журавлев А.В., Казарцев Д.А., Баранов А.Ю.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежская государственная технологическая академия №2011113204/06; Заявл. 05.04.2011; Оpubл. 27.04.2013.

REFERENCES

- 1 Antipov S.T., Zhuravlev A.V., Borodkina A.V., Baranov A.Iu. Study forms of moisture binding buckwheat seeds by thermal analysis. *Vestnik VGUIT*. [Bulletin of VSUET], 2013, no. 2, pp. 25-28.
- 2 Antipov S.T., Pribytkov A.V., Zhuravlev A.V. Systems for drying high moisture polydisperse secondary material resources food industry. *Inzhener, tekhnolog, rabochii*. [Engineer, technologist, working], 2005, no. 12, pp. 7-11.
- 3 Antipov S.T., Kazartsev D.A., Zhuravlev A.V., Bunin E.S. et al New technical solutions in the art drying of dispersed materials. *Tekhnika mashinostroeniia*. [Technology engineering], 2009, no. 1, pp. 55 - 58.
- 4 Zhuravlev A.V., Borodkina A.V., Baranov A.Iu. Development of high-intensity dryer with adjustable twisted coolant flow. *Vestnik VGUIT*. [Bulletin of VSUET], 2013. no. 4, pp. 47-50.
- 5 Antipov S.T., Zhuravlev A.V. Kazartsev D.A., Baranov A.Y. Sushilka s reguliruemym zakruchennym potokom teponositelia [Dryer with adjustable twisted coolant flow]. Pat. RF no. 2480693, 2013.