

РАСЧЕТ ПО МЕТОДУ Б. С. САЖИНА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ОВОЩЕЙ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ И МАКАРОН КОНВЕКЦИЕЙ

А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Известен метод Б. С. Сажина для расчета кинетики сушки, позволяющий значительно сократить объем расчетной работы. Однако метод ранее не применялся в расчетах процессов сушки овощей в кипящем слое и макарон конвекцией, что определило научную задачу исследования – оценка адекватности метода для инженерных расчетов при данных условиях сушки.

Материалы и методы. Теплотехнический эксперимент сушки овощей (картофель, свекла, морковь) в кипящем слое и макарон конвективным способом. Сравнительная оценка результатов обработки экспериментальных данных методами Б. С. Сажина и Г. К. Филоненко.

Результаты. Получено 9 уравнений для определения по методу Б. С. Сажина продолжительности сушки овощей и макарон до стандартного равновесного влагосодержания при различных режимах и способах сушки. Расчетное уравнение содержит две константы, определяемые экспериментально: эффективный коэффициент сушки и влагосодержание.

Выводы. Адекватность метода Б. С. Сажина для инженерного расчета процесса сушки данных продуктов данными способами высокая. Объем расчетной работы в сравнении с методом Г. К. Филоненко меньше на 30÷40 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *влагосодержание; скорость сушки; коэффициент сушки; температура; массовая скорость; кипящий слой.*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ольшанский, А. И. Расчет по методу Б. С. Сажина продолжительности процесса сушки овощей в кипящем слое и макарон конвекцией / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Вестник МГУП. – 2019. – № 2(27). – С. 120–129.

CALCULATION OF DURATION OF CONVECTIVE DRYING PROCESS OF VEGETABLES IN A BOILING LAYER AND PASTA BY B.S. SAZHIN METHOD

A. I. Ol'shanskii, S. V. Zhernosek, A. M. Gusarov

Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Researchers widely use the calculation method proposed by B.S. Sazhin, when calculating the drying time, which can significantly reduce the amount of calculation work. However, the method was not previously used in the calculations of the drying processes of vegetables in a fluidized bed and pasta by convection, which determined the scientific task of the study – the assessment of the adequacy of the method for engineering calculations under given drying conditions.

Materials and methods. Thermotechnical experiment of drying vegetables (potatoes, beets, carrots) in a fluidized bed and pasta in a convective way. Comparative evaluation of experimental data processing results by B.S. Sazhin and G.K. Filonenko methods.

Results. The authors established 9 equations for determining the duration of drying vegetables and pasta to a standard equilibrium moisture content using B. S. Sazhin method in various drying modes and methods. The calculation equation contains two constants that are determined experimentally: the effective drying coefficient and moisture content.

Conclusions. The adequacy of B. S. Sazhin method for engineering calculations of the drying process of the studied products using these methods is high. The volume of calculation work in comparison with G. K. Filonenko method is less by 40 %.

KEY WORDS: *moisture content; drying speed; drying coefficient; temperature; mass velocity; fluidized bed.*

FOR CITATION: Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A.M. Calculation of duration of convective drying process of vegetables and pasta by B.S. Sazhin method. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. – 2019. – No. 2(27). – P. 120–129. (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ

В овощесушильной технике пищевой промышленности для интенсификации процесса широко практикуется сушка в развитой стадии кипящего слоя [1–9]. В таком слое сила массы частиц уравнивается силой трения потока воздуха, проходящего через слой. В результате многих исследований установлена важная единая зависимость величины скорости воздуха при переходе слоя из неподвижного состояния в состояние кипения для всех форм и размеров частиц [6 – 10]. При этом для различных удельных нагрузок материала $f_{уд} = M_c / F$ от 5 до 80 кг/м² при различных скоростях воздушного потока скорость перехода к кипящему состоянию практически не зависит от величины удельной нагрузки $f_{уд}$ [6, 10], где M_c – масса сухого материала, F – площадь рабочей поверхности решетки аппарата.

Длительность сушки можно получить из решения системы дифференциальных уравнений теплопереноса, для чего необходимо знать достоверные зависимости коэффициентов переноса от влагосодержания и температуры. Но в этом случае задача оказывается крайне сложной в аналитическом отношении, и требуется прибегать к экспериментальным методам исследования, основанным на наиболее общих закономерностях протекания процесса сушки и обобщенных переменных [10–12]. Известно много экспериментальных методов расчета кривой скорости сушки различных материалов [6, 10–12]. Наибольший интерес представляют такие методы обработки опытных данных, которые позволяют получить достаточно надежные приближенные уравнения кривой сушки с минимальным количеством констант, определяемых экспериментально [10–12].

А.В. Лыковым предложен упрощенный метод кривой скорости сушки для периода падающей скорости [11, 12]. Действительная кривая скорости сушки заменяется линейной зависимостью $d\bar{u} / d\tau = f(\bar{u})$, так чтобы погрешность была наименьшей. Дальнейшим развитием метода А. В. Лыкова является двухзональный метод расчета кривой скорости сушки В. В. Красникова [11, 12]. Кривая скорости сушки заменяется ломаной прямой в точках перегиба с критическими влагосодержаниями $\bar{u}_{кр1}$ и $\bar{u}_{кр2}$. Переход от первой зоны ко второй происходит при достижении $\bar{u}_{кр2}$. Данный метод нашел широкое применение в практике сушки при обработке опытных данных [11, 12]. Более важными для практики сушки являются приближенные методы расчета кинетики сушки, основанные на наиболее общих закономерностях процесса сушки. Введение в практику сушки Г. К. Филоненко [6, 11, 12] обобщенной кривой сушки в системе координат $(\bar{u} - u_0) = f(N\tau)$ позволило при определенном начальном влагосодержании u_0 для любого режима сушки записать выражение $N\tau = const$. Величина $N\tau$ – представляет обобщенное время сушки [11, 12]. Г. К. Филоненко с сотрудниками при обработке экспериментальных данных по сушке различных материалов использовал уравнение кривой скорости сушки, содержащее четыре постоянных, значения которых необходимо определять при обработке эксперимента [6, 10–12]. Уравнения длительности сушки Г. К. Филоненко требуют значительного объема расчетной работы для вычисления постоянных, входящих в расчетное уравнение [10–12]. На основе обобщенной кривой сушки В. В. Красниковым разработан ряд методов расчета длительности сушки материалов при различных методах сушки [11, 12].

Наряду с аналитическими методами расчета теплопереноса в процессах сушки экспериментальные исследования имеют важное значение для практики сушки. К таким методам относится способ расчета кинетики сушки, предложенный Б. С. Сажиным [11, 12].

Метод расчета кинетики сушки Б. С. Сажина рассмотрен при конвективном способе подвода тепла при сушке полимерных материалов [12]. Поскольку такой метод содержит минимальное число постоянных, определяемых экспериментально, и значительно сокращает объем расчетной работы при обработке опытных данных, представляет значительный практический интерес проведение исследований по применению метода Б.С. Сажина к расчету процессов сушки различных материалов для разных способов энергоподвода.

Однако метод ранее не применялся в расчетах процессов сушки овощей в кипящем слое и макарон конвекцией, что определило научную задачу исследования – оценка адекватности метода для инженерных расчетов при данных условиях сушки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В пищевой промышленности принята при сушке овощей в кипящем слое резка овощей в виде кубиков размерами 5×5×5 мм, 8×8×8; 10×10×10; 12×12×12; 15×15×15 мм. Такая форма резки овощей обеспечивает стабильное состояние развитого кипящего слоя при минимальной длительности процесса сушки [4–8].

Характерным признаком развитого кипящего слоя является независимость сопротивления слоя от скорости воздушного потока при различных удельных нагрузках $f_{уд}$ от 5 до 80 кг/м² [1–9].

В макаронной промышленности в основном применяется конвективная непрерывная сушка воздухом при постоянной сушильной способности воздуха [8–10]. Механизм конвективной сушки макарон обуславливает необходимость проведения сушки при мягких режимах с высоким влагосодержанием воздуха $\varphi = 50 \div 70 \%$ и недопустимость нагрева изделий свыше $t_c > 60^\circ\text{C}$ [13–15].

Главным препятствием применения жестких режимов для интенсификации процесса сушки макарон является значительная усадка макаронного теста на протяжении всего процесса [11–14].

Для определения длительности сушки по методу Б.С. Сажина необходимы опытные кривые сушки для каждого конкретного материала. Экспериментальные кривые сушки картофеля, свеклы, моркови столовых сортов при сушке в кипящем слое и конвективной сушке макарон из муки первого сорта заимствованы из [6, 13].

Б. С. Сажиным применительно к конвективной сушке полимерных материалов разработан метод расчета длительности сушки на основе единого обобщенного уравнения массопередачи, позволяющего описывать сушку как единый процесс, включая стадию прогрева материала, первый и второй периоды сушки [12]. При этом численные значения всех параметров, входящих в кинетическое уравнение, определяются на основе одной кривой сушки [11, 12]. При таком подходе эффективный коэффициент сушки K для каждого режима остается постоянной величиной при фиксированных условиях проведения процесса. При этом коэффициент скорости сушки суммарно учитывает структурно-механические, теплофизические и физико-механические свойства высушиваемого материала, исключая определение критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ и построения кривой скорости сушки [11, 12]. В основу метода расчета положено обобщенное уравнение массопередачи, которое применительно к конвективной сушке можно записать в виде [11, 12].

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u} - u_p), \quad (1)$$

где K – эффективный коэффициент скорости сушки; $d\bar{u} / d\tau$ – скорость сушки.

Произведение $(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u} - \bar{u}_p)$ представляет собой обобщенную движущую силу процесса сушки [12].

Интегрированием уравнения (1) от начального влагосодержания \bar{u}_0 до текущего \bar{u} с учетом влагосодержания прогрева материала $\bar{u}_{пр}$ получим уравнение длительности сушки

$$\tau = \frac{\bar{u}_0}{K(\bar{u}_0 - u_p)} Z, \quad (2)$$

где параметр Z по методу Б. С. Сажина определяется выражением [12]

$$Z = \ln \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{пр} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{пр})(\bar{u} - u_p)}, \quad (3)$$

где $\bar{u}_{\text{пр}}$ – влагосодержание материала, достигаемое во время его прогрева.

В системе координат $Z = f(\tau)$ по методу Б. С. Сажина кривые сушки представляют собой прямые, угол наклона которых определяет константу скорости K , а отрезки, отсекаемые на оси Z – величину влагосодержания прогрева материала $\bar{u}_{\text{пр}}$. При построении кинетических прямых в координатах $Z - \tau$, когда $\bar{u}_{\text{пр}}$ неизвестно, задается произвольное значение $\bar{u}'_{\text{пр}} < \bar{u}_0$, близкое к \bar{u}_0 . Значение $\bar{u}_{\text{пр}}$ рассчитывается по уравнениям [12]

$$\begin{aligned} \psi &= \exp(Z_0) (\bar{u}'_{\text{пр}} - u_p) (\bar{u}_0 - \bar{u}'_{\text{пр}}); \\ \bar{u}_{\text{пр}} &= (\bar{u}_0 \psi - u_p) (\psi - 1), \end{aligned} \quad (4)$$

где ψ – промежуточный параметр для расчета $\bar{u}_{\text{пр}}$;

Z_0 – величина отрезка, отсекаемого прямой на оси Z ;

$\bar{u}'_{\text{пр}}$ – произвольно задаваемое значение, $\bar{u}'_{\text{пр}} < \bar{u}_0$.

Обобщение опытных данных системы прямых, образующихся в координатах $Z = f(\tau)$, дает простую формулу для определения длительности сушки:

$$\tau = \frac{1}{K} \cdot (Z - Z_0) \quad (5)$$

Коэффициент сушки K приближенно определяется уравнением [10, 11]

$$K \approx \frac{N}{(\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)}$$

Величина Z_0 находится по уравнению (3) при значении влагосодержания материала $\bar{u} = \bar{u}_{\text{пр}}$.

Кинетика сушки в период прогрева аппроксимируется уравнением [11, 12]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \frac{\bar{t} - t_{\text{н}}}{t_{\text{м.т.}} - t_{\text{н}}} \cdot N, \quad (6)$$

где N – скорость сушки в первом периоде; \bar{t} , $t_{\text{н}}$ – средняя и начальная температура материала в период прогрева; $t_{\text{м.т.}}$ – температура мокрого термометра.

Время прогрева материала от $t_{\text{н}}$ до $t_{\text{м.т.}}$ определяется интегрированием уравнения (6) [11]

$$\begin{aligned} \int_{\bar{u}_{\text{пр}}}^{\bar{u}_0} d\bar{u} &= \frac{\bar{t} - t_{\text{н}}}{t_{\text{м.т.}} - t_{\text{н}}} \cdot N \int_0^{\tau_{\text{пр}}} d\tau. \\ \tau_{\text{пр}} &\approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}}}{N} \cdot \frac{\bar{t} - t_{\text{н}}}{t_{\text{м.т.}} - t_{\text{н}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, *a*, *b* даны кривые сушки картофеля (8×8×8 мм) (*a*), свеклы и моркови (10×10×10 мм) (*b*) при различных режимах процесса сушки, представляющие влияние удельной нагрузки материала, скорости движения воздуха и температуры. Режимные параметры сушки в кипящем слое даны в табл. 1. Кривые сушки взяты из [6].

Табл. 1. Режимные параметры сушки картофеля, свеклы и моркови в кипящем слое

Table 1. The parameters of the drying regime of potatoes, beets and carrots in a fluidized bed

Картофель (8×8×8 мм)		
Режим 1	Режим 2	Режим 3
$t_c = 90^\circ\text{C}; v = 5\text{ м/с}; \varphi = 10\%$ $\nu\rho = 5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}; t_{\text{м.т.}} \approx 38^\circ\text{C};$ $N_{\text{max}} = 0,098 \text{ мин}^{-1};$ $K = 0,0325 \text{ мин}^{-1}; f_{\text{уд}} = 40 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$	$t_c = 90^\circ\text{C}; v = 5\text{ м/с}; \varphi = 5\%;$ $\nu\rho = 5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}; t_{\text{м.т.}} \approx 38^\circ\text{C};$ $N_{\text{max}} = 0,086 \text{ мин}^{-1};$ $K = 0,029 \text{ мин}^{-1}; f_{\text{уд}} = 120 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$	$t_c = 80^\circ\text{C}; v = 1\text{ м/с}; \varphi = 10\%;$ $\nu\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}; t_{\text{м.т.}} \approx 44^\circ\text{C};$ $N_{\text{max}} = 0,081 \text{ мин}^{-1};$ $K = 0,023 \text{ мин}^{-1}; f_{\text{уд}} = 60 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$
Свекла и морковь (10×10×10 мм)		
Режим 1	Режим 2	Режим 3
$t_c = 60^\circ\text{C}; v = 5\text{ м/с}; \varphi = 15\%$ $\nu\rho = 5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}; t_{\text{м.т.}} \approx 27^\circ\text{C};$ $N_{\text{max}} = 0,12 \text{ мин}^{-1};$ $K = 0,032 \text{ мин}^{-1};$ $f_{\text{уд}} = 60 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} - \text{свекла};$ $f_{\text{уд}} = 50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} - \text{морковь.}$	$t_c = 80^\circ\text{C}; v = 5\text{ м/с}; \varphi = 10\%;$ $\nu\rho = 5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}; t_{\text{м.т.}} \approx 32^\circ\text{C};$ $N_{\text{max}} = 0,12 \text{ мин}^{-1};$ $K = 0,035 \text{ мин}^{-1};$ $f_{\text{уд}} = 60 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} - \text{свекла};$ $f_{\text{уд}} = 50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} - \text{морковь.}$	$t_c = 100^\circ\text{C}; v = 1\text{ м/с}; \varphi = 5\%;$ $\nu\rho = 1,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}; t_{\text{м.т.}} \approx 43^\circ\text{C};$ $N_{\text{max}} = 0,13 \text{ мин}^{-1};$ $K = 0,039 \text{ мин}^{-1};$ $f_{\text{уд}} = 60 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} - \text{свекла};$ $f_{\text{уд}} = 50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} - \text{морковь.}$

В табл. 2 приведены результаты расчета длительности сушки овощей и сопоставление значений с экспериментом.

Табл. 2. Расчет продолжительности сушки картофеля (кубики 8×8×8 мм), свеклы и моркови (кубики 10×10×10 мм) в кипящем слое по формуле (2) при различных параметрах процесса сушки

Table 2. Calculation of the duration of the drying process of potatoes (cubes 8×8×8 mm) of beets and carrots (cubes 10×10×10 mm) in a fluidized bed according to the formula (2) for various parameters of the drying process

Картофель (8×8×8 мм)									
Кривая сушки 1				Кривая сушки 2			Кривая сушки 3		
$\bar{u}_0 = 3,4; \bar{u}_{\text{пр}} = 2,8; \bar{u}_{\text{кон}} \approx u_p = 0,1$				$\bar{u}_0 = 3,4; \bar{u}_{\text{пр}} = 2,8;$ $\bar{u}_{\text{кон}} \approx u_p = 0,1$			$\bar{u}_0 = 3,6; \bar{u}_{\text{пр}} = 2,9;$ $\bar{u}_{\text{кон}} \approx u_p = 0,1$		
$\bar{u}, \%$	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	Z	$\tau, \text{мин}$	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	Z	$\tau, \text{мин}$	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	Z	$\tau, \text{мин}$
2,4	13	0,44	13,9	17	0,48	18,6	29	0,72	32,3
2,0	16	0,56	17,7	23	0,61	23,4	39	0,93	41,4
1,8	19	0,69	21,4	26	0,68	26,7	40	0,98	43,6
1,6	24	0,83	25,3	33	0,88	34,3	47	1,12	49,2
1,2	32	1,12	34,5	41	1,12	43,1	63	1,45	64,8
1,0	44	1,47	45,8	54	1,48	57,5	72	1,66	73,7
0,6	66	2,15	67,3	77	2,00	78,0	102	2,31	103,8
0,4	87	2,78	88,6	94	2,41	96,7	140	3,16	142,3
0,2	132	4,21	133,3	160	4,11	159,8	190	4,30	192,2

Продолжение табл. 2.

Свекла и морковь (10×10×10 мм)									
Кривая сушки 1				Кривая сушки 2			Кривая сушки 3		
$\bar{u}_0 = 3,6; \bar{u}_{пр} = 2,95; \bar{u}_{кон} \approx u_p = 0,1$				$\bar{u}_0 = 3,6; \bar{u}_{пр} = 3,00; \bar{u}_{кон} \approx u_p = 0,1$			$\bar{u}_0 = 3,6; \bar{u}_{пр} = 2,90; \bar{u}_{кон} \approx u_p = 0,1$		
$\bar{u}, \%$	$\tau_{экс},$ МИН	Z	$\tau,$ МИН	$\tau_{экс},$ МИН	Z	$\tau,$ МИН	$\tau_{экс},$ МИН	Z	$\tau,$ МИН
2,4	17	0,56	18,2	14	0,51	14,8	7	0,265	6,9
1,8	26	0,90	27,8	23	0,86	25,3	16	0,710	18,7
1,0	67	2,20	68,2	40	1,37	40,3	23	0,980	25,8
0,6	82	2,75	85,2	63	2,16	63,5	37	1,510	39,7
0,4	102	3,38	104,7	78	2,75	80,8	44	1,780	47,0
0,3	125	4,12	127,0	98	3,51	102,0	52	2,110	55,4
0,2	162	5,22	161,5	127	4,42	129,3	63	2,460	64,9

Кривые сушки картофеля свеклы и моркови в кипящем слое даны на рис. 1, а, б.

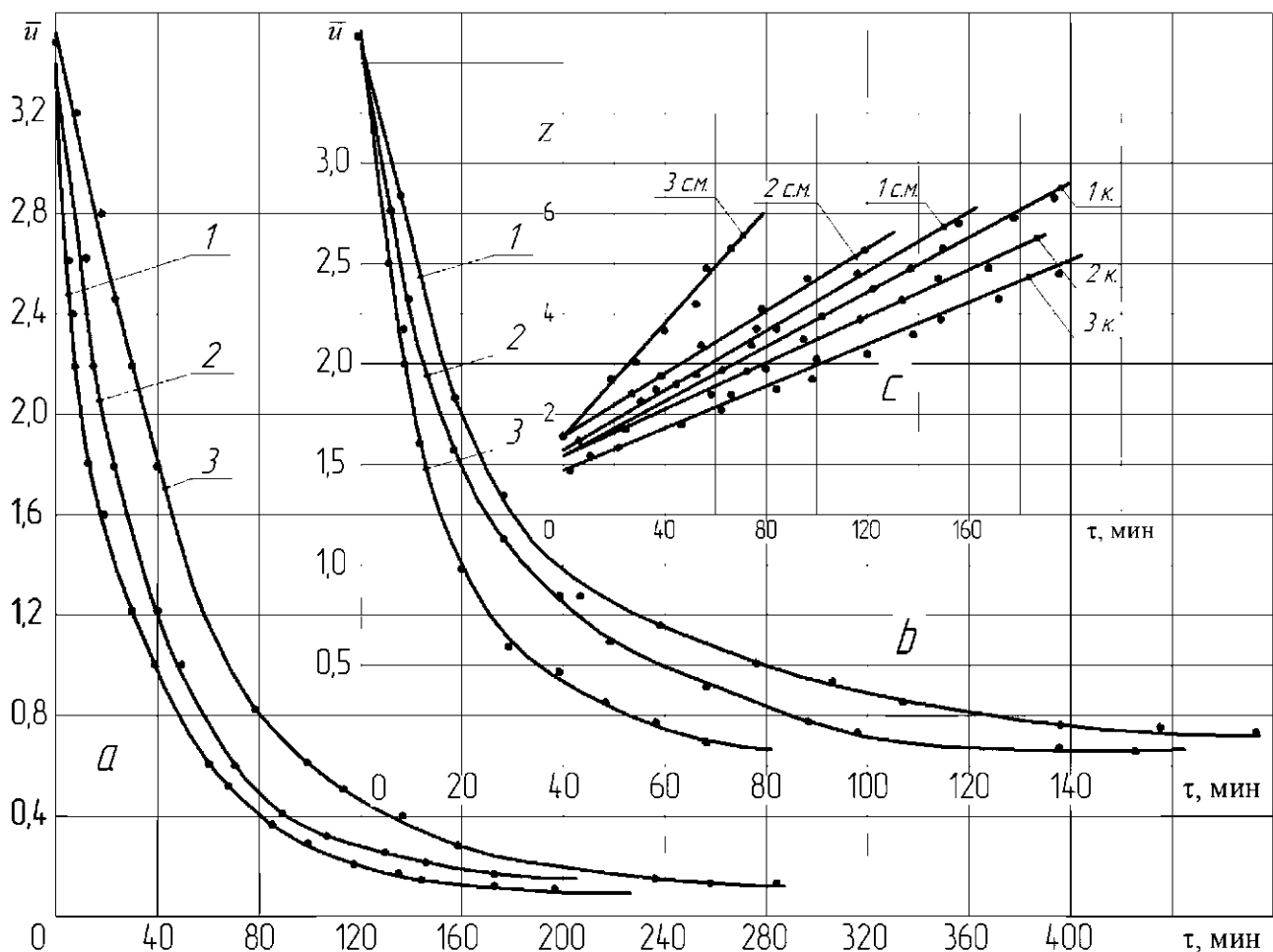


Рис. 1. Кривые сушки картофеля (а) и кривые сушки свеклы и моркови (б) в кипящем слое; зависимость параметра $Z = f(\tau)$ в процессе сушки картофеля, свеклы и моркови (с).

Обозначения режимов сушки овощей даны в табл. 1

Fig. 1. Curves for the drying process of potatoes (а) and curves for the drying process of beets and carrots (б) in a fluidized bed; the dependence of the parameter $Z = f(\tau)$ in the drying process of potatoes, beets and carrots (с). The designations of the drying parameters of vegetables are given in table 1

В результате обработки данных по сушке овощей в развитой стадии кипящего слоя Г. К. Филоненко с сотрудниками установлена эмпирическая зависимость для определения максимальной скорости сушки [6]

$$\left(\frac{dW}{d\tau}\right)_{\max} = N_{\max} = a + b E \nu \rho \frac{1}{f_{уд}}, \% / \text{мин}, \quad (8)$$

где W – влагосодержание, %;

a, b – коэффициенты, зависящие от вида, формы и размера частиц;

$E = t_c - t_{м.т.}$ – потенциал сушки;

$\nu \rho$ – массовая скорость воздуха, кг/(м² · с).

Температура мокрого термометра определялась по $I - d$ диаграмме влажного воздуха.

Значения коэффициентов a, b при сушке овощей до конечного влагосодержания $\bar{u}_{\text{кон}}$ даны в табл. 3.

Табл. 3. Значения коэффициентов a и b для картофеля, свеклы и моркови при сушке в кипящем слое

Table 3. Coefficients a and b for potatoes, beets and carrots when dried in a fluidized bed

Материал	Форма и размеры	a	b	$\bar{u}_{\text{кон}}$
Картофель	кубики 8×8×8 мм	5,4	0,54	0,08–0,10
Свекла	кубики 10×10×10 мм	6,8	0,80	0,10–0,12
Морковь	кубики 10×10×10 мм	7,5	0,45	0,08–0,10

На рис. 1, с дана обработка опытных кривых сушки овощей по формуле (3), а в табл. 2 представлены значения параметра $Z = f(\tau)$ и сравнение экспериментальных значений длительности сушки с расчетными по уравнению (2). Коэффициент сушки K определялся графически как тангенс угла наклона прямых к оси τ .

Механизм конвективной сушки макарон обуславливает необходимость выбора сравнительно мягких режимов сушки с высоким влагосодержанием воздуха $\phi = 50 \div 70\%$. При конвективной сушке макаронных изделий широко используется непрерывная сушка при постоянной сушильной способности воздуха [13–15].

На рис. 2, а, б приведены кривые сушки и скорости сушки макарон из муки 1 сорта с размерами (7×4,5 мм) при различных режимных параметрах воздуха, указанных в табл. 4.

Табл. 4. Режимные параметры конвективной сушки макарон

Table 4. Parameters of convective drying of pasta

Режим сушки	$t_c, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$\nu, \text{м/с}$	$N = \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \text{мин}^{-1}$	$\bar{u}_{\text{кон}}$
1	45	50	2,3	0,0185	0,13
2	60	50	2,3	0,0235	0,13
3	43	60	5,7	0,0292	0,13

Макарон сушатся до стандартной влажности $W \approx 13 \div 15\%$. Анализ кривых сушки и скорости сушки показывает, что на продолжительность сушки макарон наибольшее влияние оказывает температура воздуха, скорость воздуха влияет на процесс сушки с самого начала процесса, а влияние влагосодержания воздуха наиболее сильно сказывается в период падающей скорости сушки [13–15].

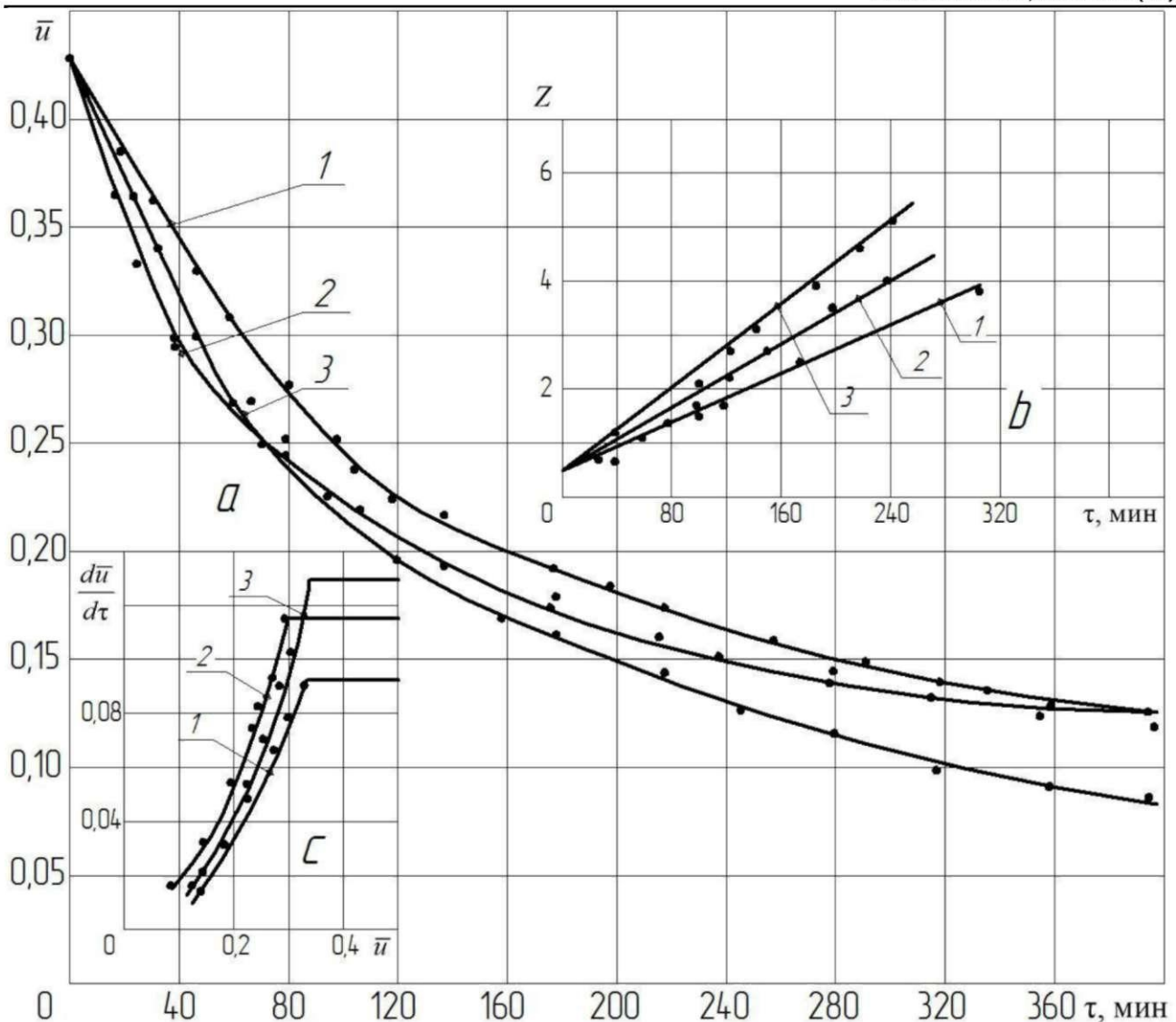


Рис. 2. Кривые конвективной сушки и скорости сушки макарон (а, с); зависимость параметра $Z = f(\tau)$ для процесса сушки макарон (b) при различных режимах сушки. Обозначения параметров сушки макарон даны в табл. 4

Fig. 2. Curves for convective drying and curves for the drying speed of pasta (a, c); the dependence of the parameter $Z = f(\tau)$ for the drying process of pasta (b) for various drying conditions. The designations of the drying parameters of pasta are given in table 4

Основным препятствием для интенсификации сушки макаронных изделий является усадка макаронного теста на протяжении всего процесса сушки. Усадка макарон по длине значительно превышает усадку по диаметру [13–15].

Кривые сушки макарон для обработки данных взяты из [13].

На рис. 2, b дана обработка кривых сушки макарон по формуле (3), а в табл. 5 приведены значения параметра $Z = f(\tau)$, вычисленные по зависимости (3) и расчет времени сушки по уравнению (2) и сопоставление значений с экспериментом.

Как следует из табл. 5, при определении рациональной продолжительности сушки макаронных изделий до стандартного влагосодержания $W \approx 13 \div 15\%$ с использованием безразмерного параметра Z , определяемого по методу Б. С. Сажина, отклонение расчетных значений продолжительности сушки от установленных опытным путем находится в пределах 3 % при всех приведенных в табл. 4 режимных параметрах сушки.

Табл. 5. Расчет продолжительности сушки макарон (7×4,5 мм) по формуле (2) и расчет параметра Z по формуле (3) при различных параметрах процесса конвективной сушки

Table 5. Calculation of the drying time of pasta (7×4,5 mm) by the formula (2) and calculation of the parameter Z by the formula (3) for various parameters of the convective drying process

Кривая сушки 1				Кривая сушки 2			Кривая сушки 3		
$\bar{u}_0 = 0,43; \bar{u}_{кр} = 0,31; u_p = 0,1;$ $\bar{u}_{пр} = 0,38; K_{пр} = 0,018 \text{ мин}^{-1}$				$\bar{u}_0 = 0,43; \bar{u}_{кр} = 0,30; u_p = 0,1;$ $\bar{u}_{пр} = 0,39; K_{пр} = 0,020 \text{ мин}^{-1}$			$\bar{u}_0 = 0,43; \bar{u}_{кр} = 0,32;$ $u_p = 0,1; \bar{u}_{пр} = 0,38;$ $K_{пр} = 0,028 \text{ мин}^{-1}$		
$\bar{u}, \%$	$\tau_{экс}, \text{ мин}$	Z	$\tau, \text{ мин}$	$\tau_{экс}, \text{ мин}$	Z	$\tau, \text{ мин}$	$\tau_{экс}, \text{ мин}$	Z	$\tau, \text{ мин}$
0,35	40	0,58	42,2	32	0,50	32,5	26	0,56	26,0
0,30	71	1,13	73,4	53	0,86	55,2	46	1,12	50,1
0,25	106	1,51	108,6	85	1,32	85,8	90	1,94	90,2
0,20	170	2,45	172,8	124	1,93	126,0	140	3,10	144,0
0,05	300	3,71	300,0	225	3,47	226,0	245	5,26	244,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработкой опытных кривых сушки по методу Б. С. Сажина получены уравнения для определения продолжительности сушки овощей и макарон до стандартного равновесного влагосодержания. Проверка точности обработки данных при сопоставлении расчетных значений времени сушки с экспериментом показала достаточно приемлемое для технологии сушки совпадение значений до конечного влагосодержания с относительной погрешностью, не превышающей 3÷5 %. Уравнение длительности сушки по методу Б. С. Сажина содержит две постоянные, которые легко определяются по экспериментальным кривым сушки и зависимости параметра $Z = f(\tau)$, что на 30÷40 % сокращает объем расчетной работы при обработке опытных данных в сравнении с методом Г. К. Филоненко.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Bislobrzcwski, I., Zielińska, M., Arun S. Mujumdar, Markowski, M. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed dryer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 51 Issues 19–20, September 2008, pp. 4704-4716. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2008.02.031.
- 2 Кожухов, В. А. Сушка зерна в виброкипящем слое с использованием ультразвуковой и СВЧ энергии / В. А. Кожухов, А. В. Себин, В. Ю. Ушкалов // Наука и образование: опыт. проблемы. перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции. – Красноярский государственный аграрный университет, 2017. – С. 83–87.
- 3 Использование установки кипящего слоя для сушки поваренной соли / С. А. Гринь, О. Н. Филенко, В. В. Якибчук // Вестник НТУ «ХПИ». Серия : Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ», – 2013. – № 4 (978). – С. 106–112.
- 4 Zhao, L. J., Pan, Y. K., Li, J. G., Chen, G.H. and Mujumdar, A.S., Revolving flow fluidized bed dryer of inert particles, *Drying Technology*. Vol. 22, No.1–2, pp. 363–376, 2004.
- 5 López-Ortiz, A., Rodríguez-Ramírez, J.; Méndez-Lagunas, L.L. *International Journal of Food Properties*. Dec. 2013. Vol. 16 Issue 7, pp. 1516-1529. DOI: 10.1080/10942912.2011.599090.
- 6 Филоненко, Г. К. Сушка пищевых растительных материалов / Г. К. Филоненко, М. А. Гришин, Я. М. Гольденберг, В. К. Коссек. – Москва : Пищевая промышленность, 1971. – 435 с.
- 7 Слободяник, И. П. Выбор оптимальных параметров сушки фруктов и овощей / И. П. Слободяник, Е. А. Селезнева, О. И. Голошапов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1995. – № 3–4. – С. 59–61.
- 8 Иночкина, Е. В. Технология конвективной сушки овощей в среде инертного газа / Е. В. Иночкина, Г. И. Касьянов, С. М. Силинская // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 3. – С. 47–51.
- 9 Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – Москва: Химия, 1970. – 429 с.
- 10 Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1968. – 470 с.
- 11 Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 444 с.
- 12 Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – Москва: Химия, 1984. – 320 с.

- 13 Гинзбург, А. С. Технология сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – Москва: Пищевая промышленность, 1976. – 248 с.
- 14 Попов, В. П. Проектирование технологического процесса сушки макаронных изделий: монография / В. П. Попов, В. А. Грузинцева. – Оренбург : ИПКГОУОГУ, 2008. – 141 с.
- 15 Иванова, З. А. Влияние режимов сушки на качественные показатели макаронных изделий / З. А. Иванова, Ф. Х. Нагудова. Ю. М. Шогенов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 4. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21426> (дата обращения: 05.10.2019).

Поступила в редакцию 28.12.2019 г.

ОБ АВТОРАХ:

Анатолий Иосифович Ольшанский, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет, e-mail: tiomp@vstu.by.

Сергей Васильевич Жерносек, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет, e-mail: zs_85@mail.ru.

Алексей Михайлович Гусаров, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет, e-mail: tiomp@vstu.by.

ABOUT AUTHORS:

Anatolii I. Ol'shanskii, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University, e-mail: tiomp@vstu.by.

Sergei V. Zhernosek, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University, e-mail: zs_85@mail.ru.

Aleksei M. Gusarov, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of technology and equipment of machine-building production, Vitebsk State Technological University, e-mail: tiomp@vstu.by.