

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ФРУКТОВ В ГЕЛИОСУШИЛКЕ

Михаил Бабич, Сергей Коробка

*Львовский национальный аграрный университет
Вул. В. Великого 1, Дубляны, Украина. E-mail: korobkasv@ukr.net*

Mykhailo Babych, Sergiy Korobka

*Lviv National Agrarian University
St. Vladimir the Great 1, Dubliany, Ukraine. E-mail: korobkasv@ukr.net*

Аннотация. В статье рассмотрены особенности методики планирования много-факторного эксперимента, изменения скорости сушки, критической влажности фруктов, коэффициента сушки. Предложена формула (1), для расчета продолжительности сушки фруктов в гелиосушилке, которая зависит от изменения параметров теплоносителя, скорости сушки, критической влажности фруктов, коэффициента сушки, что определяются экспериментальным путем. Составленные уравнения регрессии, с помощью которых рассчитывают зависимости скорости сушки, критической влажности фруктов, коэффициента сушки в области изменении параметров теплоносителя: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Установленное количество необходимых экспериментов для нашего случая 3^3 . Приведенная матрица планирования эксперимента и результаты эксперимента для функций отклика - скорости сушки, критической влажности, коэффициента сушки в области определения факторов: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$. Построены поверхности откликов целевых функций в плоскостях параметров воздействия.

Осуществлено дисперсионный анализ технологического процесса сушки фруктов в гелиосушилке. Рассчитано и проверено оценку адекватности модели по критерию Фишера.

На основе многофакторных исследований обоснованно режимы работы гелиосушилки в области: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$ в процессе сушки фруктов на качество готового продукта от зависимостей постоянной скорости $N=16,44\%/ч$, критической влажности $W_{кр.}=310\%$, коэффициента сушки $K=6,24 \cdot 10^{-2}$ град.

Осуществлено описание влияния конструктивных параметров, площади воздушного коллектора $S_{пк}=1,5 \text{ м}^2$ и массы теплоаккумулирующего материала теплового аккумулятора $m_{ма}=50 \text{ кг}$, на закономерности изменения теплотехнических параметров окружающей среды, температуры окружающей среды $T_{ис.ср.} - 16 - 32 \text{ }^\circ\text{C}$, уровня солнечной активности $I_{нср.} - 100 - 824 \text{ Вт/м}^2$ на характеристику продолжительности процесса сушки

фруктов в оценке области, при таких параметрах: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Ключевые слова: гелиосушилка, критерий оптимизации, фактор, фрукты.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При расчёте продолжительности сушки фруктов в гелиосушилке возникает проблема, определения неизвестных регрессионных зависимостей скорости сушки, критической влажности фруктов, коэффициента сушки, которые зависят от параметров теплоносителя, что меняется в течение суток.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В литературе отсутствуют результаты теоретических и экспериментальных исследований расчета продолжительности сушки фруктов в гелиосушилке. При определении неизвестных зависимостей регрессии скорости сушки [1, 2], критической влажности фруктов [5], коэффициента сушки [6], что зависят от параметров теплоносителя, который изменяется в течение суток, не используют математические методики планирования многофакторного эксперимента.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При расчёте продолжительности сушки фруктов в гелиосушилке необходимо разработать математические модели на основе планируемого многофакторного эксперимента, которые позволят, определить неизвестные регрессивные зависимости скорости сушки, критической влажности фруктов, коэффициента сушки от параметров теплоносителя, что меняется в течение суток в области: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Основой для расчета продолжительности сушке фруктов в гелиосушилке, использовано уравнение, предложенное А.В. Лыковым [1, 2].

Длительность сушки фруктов в гелиосушилке ($\tau_{сум}$) состоит из продолжительности сушки в периоде постоянной (τ_1) и спадающей (τ_2) скорости

сушки та продолжительности нагрева фруктового сырья ($\tau_{наг}$), что зависит от конструктивно-технологических параметров гелиосушилки и физических параметров окружающей среды та определяется по формуле:

$$\tau_{суш} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{наг} = \frac{W_n - W_{кр.}}{N} + \frac{1}{K} \cdot \ln \left[\frac{W_{кр.} - W_p}{W_k - W_p} \right] + \frac{Q_{\phi} + Q_{наг.р.}}{Q_{кон} - (S_{нк} \cdot I_{нс}) - \sum Q_{отп.} - Q_{та}} \quad (1)$$

где: $\tau_{суш}$ – общая продолжительность сушки от влажности W_n к влажности W_k , ч; τ_1 – время начала сушки, ч; τ_2 – время конца сушки, ч; $\tau_{наг}$ – время нагрева фруктов, ч; W_n и W_k – соответственно начальная и конечная влажность фруктов, %; $W_{кр.}$ – критическая влажность фруктов в критической точке процесса сушки, которая определяется экспериментальным путем, %; W_p – равновесная влажность фруктов, для заданного режима сушки, %; N – скорость сушки, которая определяется экспериментальным путем, %/год; K – коэффициент сушки, который определяется экспериментальным путем, град; $Q_{кон}$ – энергия, которую отдает сушильной камере нагретый теплоноситель, Вт; $Q_{наг.р.}$ – энергия израсходована на нагрев решёт, кДж; Q_{ϕ} – энергия израсходована на нагрев продукта, кДж; $Q_{та}$ – энергия, накопленная в тепловом аккумуляторе, Вт; $Q_{отп.}$ – потери теплоты через корпус гелиосушилки, Вт; $I_{нс}$ – средняя плотность потока солнечной энергии Вт/м²; $S_{нк}$ – поверхность воздушного коллектора, м².

Для определения неизвестных зависимостей регрессии скорости сушки, критической влажности фруктов, коэффициента сушки, при расчёте продолжительности сушки и обоснования параметров теплоносителя в гелиосушилке можно использовать метод линейного планируемого многофакторного эксперимента [11-14].

Эффективным методом для определения взаимовлияния отдельных параметров является метод линейного планируемого многофакторного эксперимента, обеспечивающий универсальность, возможность, при наличии небольшого объема входной информации, провести исследование и получить достоверные результаты, нет жесткой регламентации по его применению. В зависимости от поставленной цели исследователь выбирает тип эксперимента, который будет положен в основу метода планирования, вид функции отклика, способы оценки полученной информации и т.п. [15-17].

Влияющие факторы могут быть выбраны с помощью многофакторного планируемого эксперимента. Влияющие факторы могут быть выбраны с помощью специальных выборочных экспериментов или на основе многофакторного эксперимента. По результатам таких экспериментов формируется, уровень варьирования факторов. Построение матрицы планирования эксперимента, математической модели и анализ полученных результатов имеют формализованный характер, но где остается возможность для принятия обоснованных решений [18-20].

Планирование эксперимента связано с изучением зависимости критериев оптимизации от величины управляющих параметров. Поэтому, после постановки задачи, общий вид модели объекта исследования упрощается к виду $y = f(x_1 \dots x_n)$.

Общее число опытов N при многофакторном планировании эксперимента определяют из соотношения:

$$N = 2n^k \quad (2)$$

где: N – общее число различных точек в плане; k – основное число факторов.

Поскольку факторы процесса сушки неоднородны и имеют разные единицы измерения, приводим их в единую систему вычисления путем перехода от действительных значений факторов в кодированные по формуле:

$$x_i = \frac{z_i - z_{0i}}{\varepsilon} \quad (3)$$

где: x_i – кодированное значение фактора (безразмерная величина); z_i и z_{0i} – натуральные значения фактора (соответственно его текущее значение и значение на нулевом уровне); ε – натуральное значение интервала варьирования фактора.

Уравнения математических моделей, были получены в закодированной форме. При замене кодированных значений, факторов абсолютными величинами, позволяет перейти от системы координат в натуральных единицах новой системы в закодированной форме:

$$x_1 = \frac{Q - 256}{156}, \quad x_2 = \frac{T_{шт} - 41,3}{29,3}, \quad x_3 = \frac{g_{шт} - 1,8}{1,2} \quad (4)$$

Чтобы, получить уравнение регрессии с переменными в натуральном масштабе, необходимо подставить x_i по формуле кодирования, и сделав простые арифметические преобразования в уравнении, математическая модель принимает натуральный вид.

Используя уравнение (4), которое связывает кодированные и именованные значение факторов, для облегчения расчета выбранной линейной модели уравнения регрессии, критерий оптимизации записываем в следующем виде:

$$y = b_0 + \sum_1^k b_i \cdot x_i + \sum_1^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^k b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (5)$$

где: y – параметр оптимизации; k – число факторов; b_0 – свободный член, равный отклику при $x_i=0$; b_j – оценка коэффициента регрессии, соответствующего i -го фактора; b_{ij} – оценка коэффициента уравнения регрессии, соответствующего взаимодействию факторов; x – кодированное значение факторов.

Коэффициенты регрессии рассчитываются по методу наименьших квадратов, используя отношения [12-13, 16]:

$$b_0 = c_1 \cdot \sum_1^n y_u - c_2 \cdot \sum_1^k \cdot \sum_1^n x_{iu} \cdot y_u, \quad (6)$$

$$b_i = c_3 \cdot \sum_1^n x_{iu} \cdot y_u, \quad (7)$$

$$b_{ij} = c_4 \cdot \sum_1^n x_{iu} x_{ju} \cdot y_u, \quad (8)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_1^n x_{iu}^2 y_u - c_6 \sum_1^k x_{iu} + \sum_1^n x_{iu}^2 y_u - c_7 \sum_1^n y_u, \quad (9)$$

где: $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – коэффициенты выборки, значения которых приведены в табл. 1.

Для исследования работы гелиосушилки в процессе сушки фруктов основными факторами, были выбраны: тепловой поток, ($x_1, \text{Вт/м}^2$), температура теплоносителя, ($x_2, \text{°C}$), скорость теплоносителя ($x_3, \text{м/с}$). В качестве исходных параметров были выбраны: y_1 – скорость сушки, %/год; y_2 – критическая влажность, %; y_3 – коэффициент сушки, град.

Уровни и интервалы варьирования перечисленных факторов представлены в табл. 2.

Оценка области изменения выбранных факторов проведена по результатам зависимостей скорости сушки (N), критической влажности ($W_{кр.}$), коэффициента сушки (K) связанных с уровнем солнечной активности и условиями окружающей среды. При этом установлена следующая область определения факторов: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ °C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ °C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

Для получения математической модели технологического процесса сушки реализован

многофакторный эксперимент 3^3 . Составлено матрицу планирования эксперимента для функций отклика - скорости сушки, критической влажности, коэффициента сушки в области определения факторов в кодированных значениях, представленных в табл. 3.

Экспериментальные данные были обработаны на компьютере с помощью программы Mathcad 15 с использованием методики латинских квадратов, что позволяет получить математическую модель планируемого эксперимента, обосновать параметры и режимы работы гелиосушилки по следующим уравнениям [15, 16, 18].

Общий вид линейной модели уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (10)$$

Математическая модель с тремя сменными для скорости сушки:

$$y_1 = 1,249 + 0,162x_1 + 0,293x_2 + 0,104x_3 + 0,002x_1x_2 - 0,029x_1x_3 + 0,035x_2x_3 - 0,017x_1^2 - 0,112x_2^2 - 0,002x_3^2.$$

Уравнения регрессии скорости сушки в натуральных факторах примет вид:

$$N = 1,249 + 0,162 \cdot Q + 0,293 \cdot T_{mn} + 0,104 \cdot v_{mn} + 0,002 \cdot Q \cdot T_{mn} - 0,029 \cdot Q \cdot v_{mn} + 0,035 \cdot T_{mn} \cdot v_{mn} - 0,017 \cdot Q^2 - 0,112 \cdot T_{mn}^2 - 0,002 \cdot v_{mn}^2. \quad (11)$$

Таблица 1. Коэффициенты выборки

Table 1. Coefficients of sampling

k	n	Коэффициенты выборки						
		c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇
1	1	0,298	0,133	0,193	0,231	0,173	0,0156	0,112
2	3	0,156	0,025	0,089	0,145	0,069	0,0057	0,0472
3	3	0,129	0,012	0,042	0,089	0,041	0,0028	0,0259

Таблица 2. Интервалы и уровни варьирования основных факторов

Table 2. Intervals and levels of the main factors

Уровни варьирования факторов	Факторы и их обозначения			Факторы в кодовом виде		
	Тепловой поток Q, Вт/м ²	Температура теплоносителя T _{тн} , °C	Скорость теплоносителя v _{тн} , м/с	Тепловой поток x ₁ , Вт/м ²	Температура теплоносителя x ₂ , °C	Скорость теплоносителя x ₃ , м/с
Нижний	10	20	1	-1	-1	-1
Верхний	460	50	2,5	+1	+1	+1
Основной	230	35	1,5	0	0	0
Интервал варьирования	100	10	0,5	1	1	1

Таблица 3. Матрица планирования и результаты эксперимента

Table 3. The matrix of planning and experimental results

№ з/п	Кодированные значения факторов									y ₁ , %/год	y ₂ , %	y ₃ , град	y _{ср.}	S
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₃ ²					
1.	+1	-1	-1	+1	0	0	+1	+1	0	16,795	309,37	0,06054	108,7418	0,00232
2.	+1	+1	-1	+1	0	0	+1	+1	0	17,698	305,18	0,07284	107,6503	0,874653
3.	+1	-1	-1	-1	0	0	+1	+1	0	18,185	308,03	0,09477	108,7699	0,09301
4.	+1	+1	-1	-1	0	0	+1	+1	0	18,478	311,3	0,07284	109,9503	0,43092
5.	-1	-1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	18,663	306,5	0,0725	108,4118	-0,72513
6.	-1	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	19,203	301,2	0,07231	106,8251	0,30173
7.	-1	-1	+1	0	-1	0	+1	0	+1	20,118	330,9	0,04097	117,0197	-0,83199
8.	-1	+1	+1	0	-1	0	+1	0	+1	21,34	305,91	0,07687	109,109	0,177643

Оценка адекватности модели: $F_{разр} = 0,285$;
 $F_{табл} = 2,5$; $F_{разр} < F_{табл}$ – модель адекватна.

Математическая модель с тремя сменными для критической влажности y_2 :

$$y_2 = 6,269 + 1,142x_1 - 0,084x_2 + 0,171x_3 + 0,003x_1x_2 - 0,138x_1x_3 - 0,047x_2x_3 - 0,083x_1^2 - 0,142x_2^2 - 0,004x_3^2.$$

Уравнения регрессии критической влажности в натуральных факторах примет вид:

$$W_{кр} = 6,269 + 1,142 \cdot Q - 0,084 \cdot T_{mn} + 0,171 \cdot v_{mn} + 0,003 \cdot Q \cdot T_{mn} - 0,138 \cdot Q \cdot v_{mn} - 0,047 \cdot T_{mn} \cdot v_{mn} - 0,083 \cdot Q^2 - 0,142 \cdot T_{mn}^2 - 0,004 \cdot v_{mn}^2. \quad (12)$$

Оценка адекватности модели: $F_{разр} = 0,888$;
 $F_{табл} = 2,5$; $F_{разр} < F_{табл}$ – модель адекватна.

Математическая модель с тремя сменными для коэффициента сушки y_3 :

$$y_3 = 3,0489 + 0,095x_1 + 0,130x_2 + 0,050x_3 + 0,006x_1x_2 + 0,10 + 9x_1x_3 + 0,073x_2x_3 - 0,026x_1^2 - 0,139x_2^2 - 0,003x_3^2.$$

Уравнения регрессии коэффициента сушки в натуральных факторах примет вид:

$$K = 3,0489 + 0,095 \cdot Q + 0,130 \cdot T_{mn} + 0,050 \cdot v_{mn} + 0,006 \cdot Q \cdot T_{mn} + 0,109 \cdot Q \cdot v_{mn} + 0,073 \cdot T_{mn} \cdot v_{mn} - 0,026 \cdot Q^2 - 0,139 \cdot T_{mn}^2 - 0,003 \cdot v_{mn}^2. \quad (13)$$

Оценка адекватности модели:
 $F_{разр} = 0,045$; $F_{табл} = 2,5$; $F_{разр} < F_{табл}$ – модель адекватна.

Программа оценивает значимость коэффициентов по критерию Стьюдента, а также адекватность модели по критерию Фишера [14, 15, 19].

Средние значения, показателей параметров оптимизации определяли по реализации параллельных наблюдений по формуле:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_n} y_{ij}}{m_n}, \quad (14)$$

где: y_i – истинное значение параметра оптимизации; y_{ij} – строка плана матрицы планирования; m_n – число параллельных наблюдений в каждой точке; j – порядковый номер параллельного опыта в каждой точке плана матрицы.

Таблица 4. Дисперсионный анализ технологического процесса сушки фруктов в гелиосушилке

Table 4. Analysis of variance of the technological process of drying fruit in solar dryer

Факторы	Суммы квадратов	Число степени свободы	Средний квадрат
Тепловой поток	$S_{bi}^2 = N^{-1} \sum_i x_i^2 \dots x_{(..)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_1/n-1$
Температура теплоносителя	$S_{b3}^2 = N^{-1} \sum_k x_k^2 \dots x_{(..)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_3/n-1$
Скорость теплоносителя	$S_{b1}^2 = N^{-1} \sum_j x_j^2 \dots x_{(..)}^2 / N^2$	$n-1$	$S_2/n-1$
Остаток	S_e – разниця	$(n-1)(n-2)$	$S/(n-1)(n-2)$

Среднее квадратное отклонение дисперсионной ошибки определяем уравнению регрессии по формуле:

$$S_0^2 = \sum_{i,j,k} x_{(i,j,k)}^2 \dots x_{(..)}^2 / N^2. \quad (15)$$

Оценку дисперсии адекватности модели определяем по формуле:

$$S_{ao}^2 = \frac{\sum b_i^{*2}}{N-l}, \quad (16)$$

где: N – число опытов; l – число параметров в уравнении.

Таблица 5. Результаты дисперсного анализа
Table 5. Results of variance of analysis

Источник изменчивости	Суммы квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат
Q	0,00146	2	0,00073
T_{mn}	0,00925	2	0,004628
v_{mn}	0,00047	2	0,000235
S_e		0	
$S_{обычн}$	0,0119693	8	0,001496

Доверительным интервалом коэффициента регрессии:

$$|\Delta b_i| = T_{\alpha;n} \cdot S_{bi}, \quad (17)$$

где: $T_{\alpha;n}$ – критерий Стьюдента; n – число опытов; S_{bi} – приближенное значение ошибки воспроизводимости.

Оценка значений коэффициентов регрессии связана с построением доверительных интервалов (коэффициент уравнения регрессии значимо, если его абсолютная величина больше доверительного интервала) [14]:

$$|b_i| \geq |\Delta b_i|, \quad (18)$$

Адекватность полученной модели процесса сушки проверяем по критерию Фишера F [12, 16]:

$$F_i = \frac{S_{ao}^2}{S_0^2}. \quad (19)$$

Табличное значение $F_{таб}$ примем в соответствии из полученных цифр степеней свободы $F_{ao} = N-K$ и $F_{ao} = (m-1)$ при $Q=5\%$ и уровне значимости 2,5:

$$F_i = \frac{S_{ao}^2}{S_{сп.кв.}^2} < 2,5. \quad (20)$$

Статистика распределения по критерий Стьюдента $f=(n-1)$ степенями свободы рассчитывается по формуле:

$$\sqrt{\lambda_c} = \sqrt{\frac{(\sum b_i^{*2})^2}{n} - \frac{(n-1)n}{S(n-1)}} = \frac{\sum b_i^{*2}}{n} \cdot \sqrt{\frac{n}{3}}. \quad (21)$$

Для оптимизации теплотехнических параметров процесса сушки был избран графический метод, с использованием линейных функций. Линейные функции $y_1=f(x_1, x_n)$, $y_2 = f(x_1, x_n)$, $y_3 = f(x_1, x_n)$ предлагаются для технологического описания и выбора оптимальных значений, обоснованные параметров и режимов работы гелиосушилки зависимости от теплового потока (x_1), температуры теплоносителя (x_2), скорости теплоносителя (x_3).

Способ нахождения зависимостей $y_n=f(x_1, x_n)$ примем в виде создания линейных функций

$$y = \sum_{i=1}^n f_i(C_i) \text{ от значений исследуемых факторов:}$$

$$N=f(Q, T_{mn}); N=f(Q, v_{mn}); N=f(T_{mn}, v_{mn}).$$

$$W_{кр}=f(Q, T_{mn}); W_{кр}=f(Q, v_{mn}); W_{кр}=f(T_{mn}, v_{mn}).$$

$$K=f(Q, T_{mn}); K=f(Q, v_{mn}); K=f(T_{mn}, v_{mn}).$$

В оценке области многофакторного эксперимента обоснованно режимы работы гелиосушилки с тепловым аккумулятором: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{\text{TH}} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{\text{TH}} \leq 2,5 \text{ м/с}$.

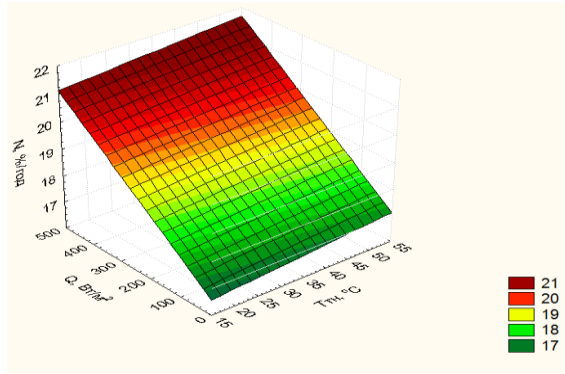


Рис. 1. График поверхности функции отклика $N=f(Q, T_{mn})$

Fig. 1. Schedule of the surface response function $N=f(Q, T_{mn})$

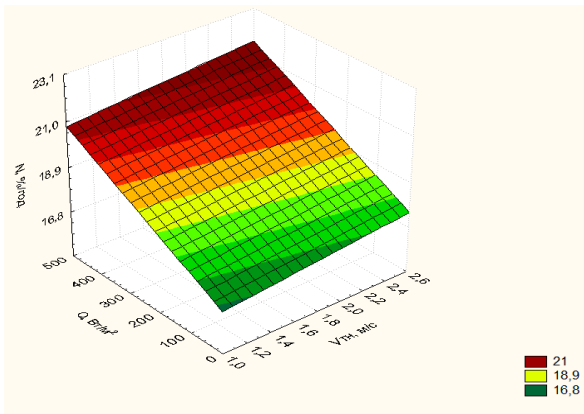


Рис. 2. График поверхности функции отклика $N=f(Q, v_{mn})$

Fig. 2. Schedule of the surface response function $N=f(Q, v_{mn})$

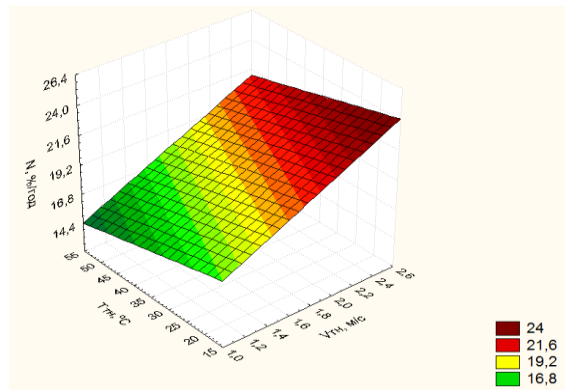


Рис. 3. График поверхности функции отклика $N=f(T_{mn}, v_{mn})$

Fig. 3. Schedule of the surface response function $N=f(T_{mn}, v_{mn})$

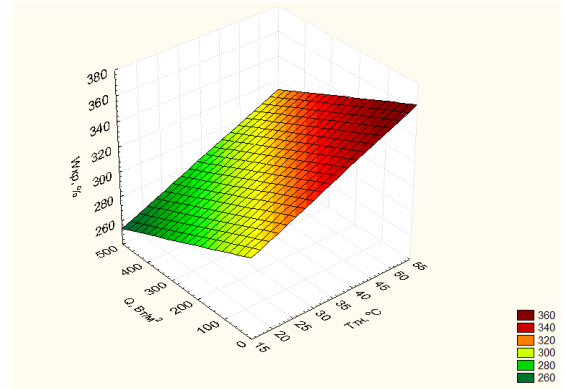


Рис. 4. График поверхности функции отклика $W_{кр}=f(Q, T_{mn})$

Fig. 4. Schedule of the surface response function $W_{кр}=f(Q, T_{mn})$

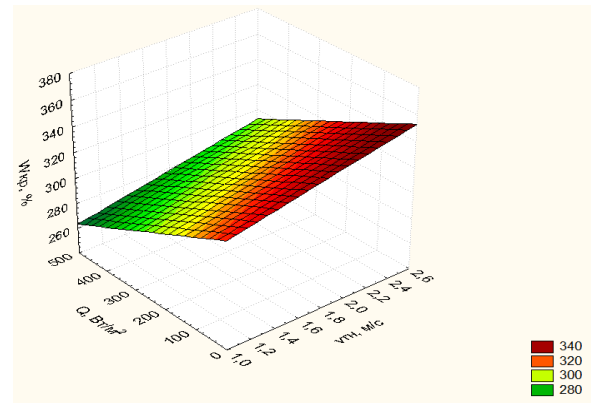


Рис. 5. График поверхности функции отклика $W_{кр}=f(Q, v_{mn})$

Fig. 5. Schedule of the surface response function $W_{кр}=f(Q, v_{mn})$

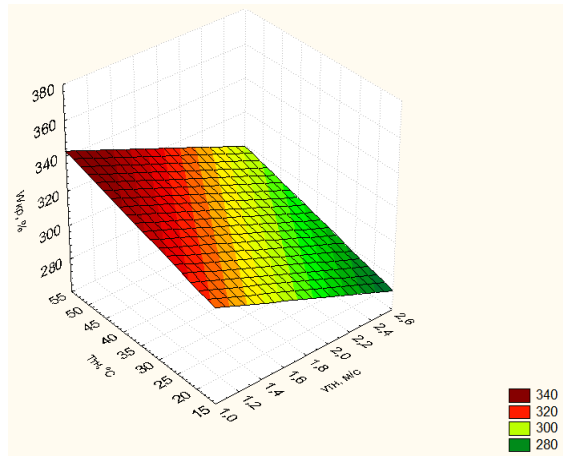


Рис. 6. График поверхности функции отклика $W_{кр}=f(T_{mn}, v_{mn})$

Fig. 6. Schedule of the surface response function $W_{кр}=f(Q, T_{mn})$

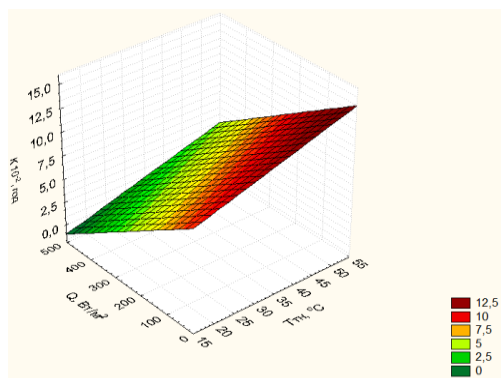


Рис. 7. График поверхности функции отклика $K=f(Q, T_{mn})$

Fig. 7. Schedule of the surface response function $K=f(Q, T_{mn})$

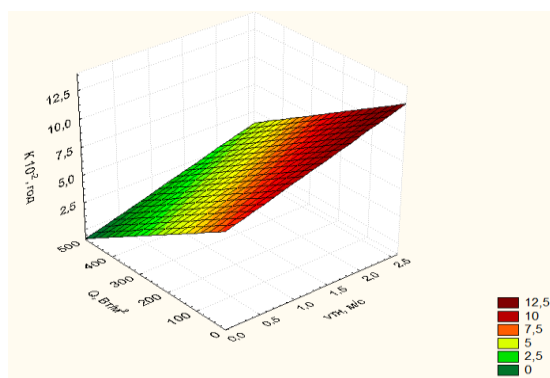


Рис. 8. График поверхности функции отклика $K=f(Q, v_{mn})$

Fig. 8. Schedule of the surface response function $K=f(Q, v_{mn})$

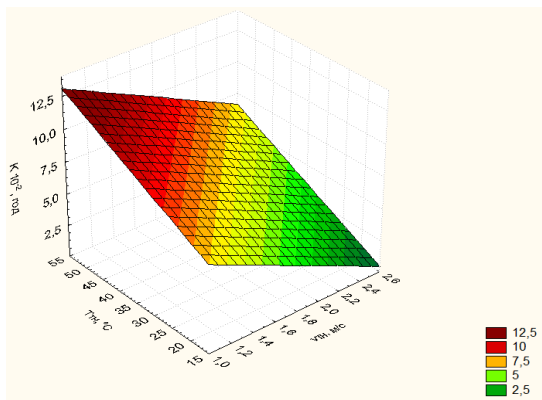


Рис. 9. График поверхности функции отклика $K=f(T_{mn}, v_{mn})$

Fig. 9. Schedule of the surface response function $K=f(T_{mn}, v_{mn})$

Анализ полученных результатов (рис. 1–9) показывает, что максимальное значение скорости сушки N достигает от 14,4 до 23,5%/ч., При тепловом потоке Q от 10 до 460 Вт/м², температуре теплоносителя T_{mn} от 20 °C до 50 °C и скорости циркуляции теплоносителя v_{tn} от 1 до 2,5 м/с. Критическая влажность продукта $W_{кр}$ при этом снижается от 380 до 260%, а коэффициент сушки K - увеличивается от $2,05 \cdot 10^{-2}$ до $15 \cdot 10^{-2}$ ч. Результаты

расчета продолжительности процесса сушки фруктов в гелиосушилке приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты расчета продолжительности сушки фруктов в гелиосушилке

Table 6. Results of calculation of the duration of drying fruit in the solar dryer

№ опыта	$\tau_{\text{э}}$	τ_1 , ГОД	τ_2 , ГОД	N , %/ГОД	$W_{кр}$, %	K , 1/ГОД
1	122	1,8	120,2	17,91	308	0,051
2	50	4,63	45,37	18,967	306,54	0,068
3	75	3,57	71,43	18,6	307,9	0,079
4	77	6,15	70,85	18,573	312,5	0,071
5	50	2,11	47,89	18,587	304,4	0,073
6	50	2,31	47,69	19,2	302,1	0,081
7	98	2,13	95,87	20,013	328,5	0,05
8	118	2,96	115,04	20,4	307,4	0,098

Таким образом, полученные зависимости носят растущий или спадающий характер, что соответствует физической сущности процесса сушки фруктов в гелиосушилке с тепловым аккумулятором.

ВЫВОДЫ

1. На основе многофакторных исследований обоснованно режимы работы гелиосушилки в области: $10 \text{ Вт/м}^2 \leq Q \leq 460 \text{ Вт/м}^2$; $20 \text{ °C} \leq T_{mn} \leq 50 \text{ °C}$; $1 \text{ м/с} \leq v_{mn} \leq 2,5 \text{ м/с}$ в процессе сушки фруктов на качество готового продукта от зависимостей постоянной скорости $N=16,44\%/ч$, критической влажности $W_{кр}=310\%$, коэффициента сушки $K=6,24 \cdot 10^{-2}$, град, продолжительности сушки фруктов составляет $\tau=50 \dots 122$ часов.

2. Уравнения регрессии в декодированном виде позволяет расчетным способом настроить процесс сушки в гелиосушилке при выборе значений рассматриваемых факторов, которые лежат в области эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лыков А.В. 1968.** Теория сушки. М.: Энергия, 472.
2. **Лыков А.В. 1970.** Тепломассообмен справочник. М.: Энергия, 480.
3. **Гинзбург А.С. 1973.** Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 528.
4. Funkcjonalnosc zintegrowanego systemu grzewczego w ogrzewanych tunelach foliowych / gasa zbiorowa pod redakcji Slawomira Kurpaski. – Krakow: polskie towarzystwo inzynierii rolniczej, 2004, 80.
5. **Кац З.А. 1972.** Сушка пищевых продуктов в виброкипящем слое. М.: Энергия, 44.
6. **Vagenas G.K. 2010.** Kinetyka suszenia owocow - Motrol. Люблин, - Том 12В, 116-121.
7. **Флауменбаум Б.Л. 1986.** Основы консервирования пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 494.

8. **Плешков Б.П. 1987.** Биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Агропромиздат, 495.
9. **Коробка С.В. 2013.** Исследование параметров и режимов работы конвективной гелиосушилки фруктов. MOTROL. Vol.15, №4. 134-139.
10. **Коробка С.В. 2014.** Исследование солнечно-радиационно-конвективного способа сушки ягодных плодов в конвективной гелиосушилке. MOTROL. Vol.16, №4. 112-116.
11. **Веников В.А. 1986.** Теория подбора и моделирования. М.: Высшая школа, 480.
12. **Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С. 1988.** Планирование в задачах электроэнергетики. М.: Энергоатомиздат, 149.
13. **Федоров В.В. 1971.** Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 378.
14. **Финни Д.В. 1970.** Введение в теорию оптимального эксперимента. М.: Наука, 243.
15. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. 1976.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 274.
16. **Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рощин П.М. 1980.** Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 258.
17. **Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. 1982.** Планирование эксперимента. Минск : Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 302.
18. **Веденяпин Г.В. 1973.** Общая методика исследования и обработки опытных данных. М.: Колос. 200.
19. **Бачурская Л.Д., Гуляев В.Н. 1976.** Пищевые концентраты. М.: Пищевая промышленность, 335.
20. **Рабинович С.Г. 1978.** Погрешности измерений. Л.: Энергия, 262.

DESIGN PROCEDURE OF THE DURATION OF DRYING FRUIT IN SOLAR INSTALLATIONS

Summary. This article describes the features of experiment planning methods. Made a quadratic equation regression for planning multifactor experiment in the process of drying fruit in solar installations, with which you can establish modes of operation of solar installations depending on the structural and technological parameters.

There was made number of experiments necessary for our case 3^3 . Was made the matrix of planning experiments and experimental results for function of recall – speed drying, critical humidity, coefficient of drying in the identification of factors: $10\text{Wt/m}^2 \leq Q \leq 460\text{Wt/m}^2$; $20^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50^\circ\text{C}$; $1\text{ m/s} \leq v_{mn} \leq 2,5\text{ m/s}$. Built surface response target functions in the impact parameter plane.

Done dispersion analysis' of process of drying fruit in solar installations. There were calculated and verified assessment of the adequacy of models on Fisher criterion.

On the basis of multifactor experiments accepted modes of operation solar installations: $10\text{Wt/m}^2 \leq Q \leq 460\text{Wt/m}^2$; $20^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50^\circ\text{C}$; $1\text{ m/s} \leq v_{mn} \leq 2,5\text{ m/s}$ in the process of drying fruit on the quality of the finished product depends on constant speed $N=16,44\%$, critical humidity $W=310\%$, coefficient of drying $K=6,24 \cdot 10^2$.

Done description of the impact of structural parameters, area of air collector $S_{нк} = 1.5\text{ m}^2$ and mass of heat accumulative material of thermal accumulator $m_{ма} = 50\text{kg}$, from changes of parameters of the environment, ambient temperature $T_{ис.ср.} - 16-32^\circ\text{C}$, the level of solar activity $I_{иср} - 100-824\text{Wt/m}^2$ on the characteristics of the process of drying fruit in the assessment area, the following parameters: $10\text{Wt/m}^2 \leq Q \leq 460\text{Wt/m}^2$; $20^\circ\text{C} \leq T_{mn} \leq 50^\circ\text{C}$; $1\text{ m/s} \leq v_{mn} \leq 2,5\text{m/s}$.

Key words: solar installations, criterion optimization, factor, fruit.