

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ ЛУКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

А. А. Холиков
Д. Н. Хикматов
Ф. С. Кулдошева

Бухарский инженерно- технологический институт

alexes76@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Оценка эффективности влияния основных факторов на сушку с использованием тепловых труб, как температура, время сушки и толщины слоя репчатого лука проведена впервые с использованием метода полного факторного эксперимента. Для этого произведена кодировка переменных, составлена матрица планирования эксперимента, вычислены уравнения регрессии, проверена уравнение на адекватность, произведена апостериорный анализ. Определены основные факторы, влияющие на сушку нарезанного репчатого лука в сушильных установках с использованием тепловых труб. Определено оптимальный режим сушки репчатого лука в сушильной установки с использованием тепловых труб.

Ключевые слова: тепловая труба, сушка, фактор, эксперимент, модель, регрессия, взаимодействия, кодирования, адекватность, дисперсия.

ВВЕДЕНИЕ

Сушка является сложным нестационарным процессом удаления жидкости с помощью испарения, т.е. тепло и массообменом. Значение сушки заключается в том, что сушеный продукт сохраняет первоначальные питательные свойства и становится более прочным при хранении. Изучения сохранности витаминов и других полезных веществ в овощах, фруктах и ягодах при различных технологиях переработки показывают, что наибольшую сохранность обеспечивает сушка плодов, который больше всего можно хранить долгое время, не испортив его. Поэтому изучение таких процессов все больше привлекает исследователей в настоящее время. [1; с.63-67., 2; Ps.116, 3; Ps. 116., 4; с.248].

ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ

В работе [5] осушитель с принудительной конвекцией с использованием солнечной энергии был разработан для изучения влияния скорости воздушного потока (2,43, 5,25, 8,09 кг/мин), температуры воздуха (55, 65, 75°C) и доли рециркулируемого воздуха (до 90%) на общую потребность в энергии для сушки ломтиков лука. Сушилка была снабжена солнечным воздухонагревателем с плоской пластиной, имеющим как гофры, так и треугольные ребра на пластине абсорбера. Для сушки ломтиков лука от начального содержания влаги около 86% (влажная основа) до конечной влажности около 7% (влажная основа) энергия, необходимая на единицу массы воды, удаляемой без использования рециркуляции воздуха, составляла от 23,548 до 62,117 МДж/кг воды. Доля солнечного нагревателя воздуха, электрического нагревателя и воздуходувки составляет от 24,5% до 44,5%, 40,2% и 66,9% и 8,6% и 16,3% соответственно. Экономия общей энергии за счет доли рециркулируемого воздуха была определена при температуре воздуха 65 и 75°C для трех вышеуказанных скоростей воздушного потока. Максимальная экономия энергии до 70,7% была достигнута за счет рециркуляции отработанного воздуха. Энергия, необходимая на единицу массы удаляемой воды, составляет от 12,040 до 38,777 МДж/кг воды. Доля энергии солнечного нагревателя, дополнительного нагревателя и воздуходувки составляет от 22,4% до 40,9%, 33,6% и 62,6%, а также 11,2% и 37,2% соответственно.

Целью [6] работы исследования было разработать сушилку для прямых солнечных батарей с фотоэлектрическим модулем и оценить ее эффективность в экспериментах с естественной и принудительной конвекцией. Фотоэлектрический модуль обеспечивает электроэнергией восемь охладителей, которые позволяют обновлять воздух внутри оборудования. В этой конфигурации сушилка способна работать независимо от распределительной сети электроэнергии. При сушке зеленого лука контролировали влажность и колориметрические параметры. Кинетика сушки показала период постоянной скорости с последующим периодом ее падения для обоих рабочих условий. Эксперимент с конвекцией показал более высокую скорость, и внешние механизмы могли управлять процессом. Прямые линии были скорректированы на постоянные периоды ставок с $R^2=0,999$. Значения эффективного коэффициента диффузии составляли $5,15 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ и $1,15 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ для сушки с естественной и принудительной конвекцией. Средняя эффективность

солнечной сушилки и удельное потребление энергии составили 34,2%, 18,3 кВтч/кг для процесса сушки с естественной конвекцией и 38,3%, 16,4 кВтч/кг для процесса сушки с принудительной конвекцией. Небольшие изменения цвета наблюдались между свежим и сушеным зеленым луком в двух рабочих условиях, что согласуется с необходимостью поддерживать зеленый цвет материала.

Среди овощей наибольшее значение имеет и сушка лука, который играет большой роли в жизни людей. Сушеный лук — натуральный продукт, который может стать альтернативой любой приправе и является одной из основных производственных культур. Спрос на сушеный лук повышается каждым годом. В настоящее время производство сушеного лука начинает развиваться. При этом стараются искать экономичные энергосберегающие технологии, которые представлены в работах [1; с.63-67., 2; Ps.116, 3; Ps. 116., 4; с.248.,].

Один из таких является технологии, основанные на возобновляемых источниках энергии, к которому относится и так называемые тепловые трубы. Тепловая труба теплопередающее устройство, способное передавать большие тепловые мощности при малых градиентах температуры. Тепловая труба (ТТ) представляет собой герметизированную конструкцию (трубу из теплопроводящего металла), частично заполненную жидким теплоносителем (легкоиспаряющаяся жидкость). В нагреваемой части ТТ (в зоне нагрева, или испарения) жидкий теплоноситель испаряется с поглощением теплоты, а в охлаждаемой части ТТ (в зоне охлаждения, или конденсации) пар, перетекающий из зоны испарения, конденсируется с выделением теплоты. Движение пара от зоны испарения к зоне конденсации происходит за счёт разности давлений насыщенного пара, определяемой разностью температур в зонах испарения и конденсации. Возвращение жидкости в зону испарения осуществляется либо за счёт внешних воздействий (например, силы тяжести), либо под действием капиллярной разности давлений по капиллярной структуре (фитилю), расположенной внутри ТТ (чаще всего на её стенках). В связи с тем, что ТТ с капиллярной структурой для возврата жидкости могут работать независимо от ориентации в поле тяжести и в невесомости. [19; с. 272., 20; с. 207., 7; с.80., 8; с. 202., 9; с.348.]

Капиллярный эффект, используемый в современных тепловых трубках, обусловлен возможностью конденсированной жидкости перемещаться по тонким капиллярам (порам) в любом направлении. Такой эффект наблюдается, если положить

губку в лужу воды. Полость медной трубки наполняют различными материалами, фитилями, пористой керамикой и др. Материалы и хладагенты для тепловых трубок выбираются в зависимости от условий применения: от жидкого гелия для сверхнизких температур до ртути для высокотемпературных применений. Однако большинство современных трубок используют аммиак или воду в качестве рабочей жидкости. Малый вес, высокая надёжность и автономность работы ТТ, большая эффективная теплопроводность, возможность использования в качестве термостатирующего устройства обусловили применение ТТ в энергетике, химической технологии, космической технике, электронике и ряде других областей техники. [19; с. 272., 20; с. 207., 21; 22;.]

Использование ТТ для подготовки нагревающего рабочего агента взамен традиционных установок, где его нагревание осуществляется за счет смешения с продуктами сгорания дизельного топлива в специальных камерах, позволяет значительно повысить качество готового продукта и исключить загрязнение воздушного бассейна. Кроме того, тепловая труба создаёт возможность осуществлять в одной и той же теплообменной установке нагревание и охлаждение различных технологических потоков, что особенно важно для современных фермерских хозяйств, которые являются потребителями большого количества теплоты и холода при переработке сырья. Для широкого внедрения этих установок необходимо обосновать целесообразность их использования и разработать научно-обоснованные рациональные температурные режимы работы энергосберегающих установок при переработке некоторых пищевых и сельскохозяйственных продуктов, методы расчета и проектирования установок. [19; с. 272., 20; с. 207.]

Повысить энергетическую эффективность теплообменных установок позволит применение тепловых труб, работающих за счет солнечной энергии. Среди многих исключительных преимуществ использования тепловой трубы как теплопередающего устройства можно выделить: простоту конструкции, исключительную маневренность в работе, лёгкость регулирования и возможность передачи высоких тепловых потоков на значительное расстояние при чрезвычайно малых температурных напорах. Более того, тепловые трубы не требуют энергии на перекачивание теплоносителя. [19; с. 272., 20; с. 207.,10; Ps.151-166., 11; с.43-50., 12; Ps: 63-67., 13; с.63-67., 14; Ps.98-109.,15; Ps. 36-46., 16;]

В связи с этим для реализации поставленной задачи одним из основных направлений является разработка математических моделей и исследование влияние факторов, выбора оптимальных рабочих агентов и конструкции тепловых труб для конкретных тепломассообменных установок. [17; с. 36., 18; с. 66-100.]

Проведение экспериментов сушки овощей и фруктов с использованием тепловых труб и нахождение уравнений регрессии на их основе позволяет найти параметры, оптимизирующие поведение системы.

Целью настоящего исследования является математическое моделирование процесса сушки нарезанного лука, эксперименты которой проведены нами же с использованием тепловых труб. При этом для аппарата моделирования выбран метод полного факторного эксперимента, который позволяет выбрать основных параметров оптимизации и влияющих факторов, выбор основного уровня и интервала варьирования по каждому фактору, проверку воспроизводимости результатов эксперимента, построение математической модели с вычислением коэффициентов уравнения регрессии, проверку адекватности уравнения регрессии, интерпретацию уравнения регрессии.

Как правило моделирование проводится для отыскания оптимальных параметров системы. При этом после некоторых экспериментальных исследований на их основе получается уравнения регрессии. Если факторы, влияющие на исследуемой величины лежать в интервале между какими то верхними и нижними уровнями, применяется полный факторный эксперимент (ПФЭ) [9; с. 50., 10; с. 36., 11; с. 66-100.,19; Ps. 273-286.].

Цель планирования эксперимента – нахождение таких условий и правил выполнения исследований, при которых получается получить достоверную и надежную информацию об объекте с минимальной затратой труда, и кроме этого показать данную информацию в компактной и благоприятной форме с количественной оценкой точности.

В нашей исследовании для сушки выбрано нарезанный репчатый лук со влажностью 89 % и практика показывает, что после сушки при 12% влажности репчатого лука считается оптимальным//.

При проведении экспериментов установлены следующие основные факторы, влияющие на процесс: температура сушки, время сушки, толщина нарезанного репчатого лука. А также определены основные интервалы варьирования этих

факторов.

В основе планирования факторного эксперимента лежит реализация всех возможных комбинаций и исследуемых факторов на трех уровнях, т. е. для осуществления этих планов следует поставить 2^3 опыта.

Тогда по результатам полного факторного эксперимента нужно определить 8 коэффициентов регрессии в уравнении

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (1)$$

В рамках ПФЭ для обработки результатов приведённых результатов и дальнейшего определения коэффициентов уравнения регрессии факторы приводят к одному масштабу. Это достигается путем кодирования переменных. Следуя теории ПФЭ, выполним следующие: обозначим основные факторы и их интервалы варьирования:

Z_1 – температура сушки ($С^0$), $Z_1^- = 55$, $Z_1^+ = 65$;

Z_2 – время сушки репчатого лука (мин), $Z_2^- = 240$, $Z_2^+ = 420$;

Z_3 – толщина слоя нарезанного репчатого лука (мм), $Z_3^- = 3$, $Z_3^+ = 5$;

Требуется построить уравнением регрессии, учитывая все взаимодействия факторов, проверить полученную модель на адекватность и произвести ее интерпретацию.

Исходная матрица планирования ПФЭ 2^3 приведено в таблице 1.

Таблица 1.

№ эксперимента	Исследуемые факторы			Результаты опытов		
	z_1	z_2	z_3	y_1	y_2	y_3
1	–	–	–	16,3	17,7	16,5
2	–	+	–	6,6	7,4	8,3
3	+	–	–	8,8	9,2	8,5
4	+	+	–	5,1	5,4	5,7
5	–	–	+	35,1	34,4	35,2
6	–	+	+	18,5	17,4	17,7
7	+	–	+	24,1	24,8	25,6
8	+	+	+	11,8	12,2	12,5

Работу выполняем в следующем порядке:

1) кодируем переменные;

2) достраиваем матрицу планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий и дополняем столбцом средних значений отклика;

3) вычисляем коэффициенты уравнения регрессии;

4) проверяем вычисленные коэффициенты на значимость, предварительно определив дисперсию воспроизводимости, и получаем уравнение регрессии в кодированных переменных;

5) проверяем полученное уравнение на адекватность;

6) проводим интерпретацию полученной модели;

7) выписываем уравнение регрессии в натуральных переменных.

1. Для каждого фактора находим центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной x_i от натуральной z_i .

Исходя из уравнений влияющих факторов на влажность лука, которые получены при проведении экспериментов, оформляем следующую таблицу кодирования факторов. Оформляем результаты в таблице 2.

Таблица 2.

Факторы	Верхний уровень $+i$	Нижний уровень $-i$	Центр Z_i^0	Интервал варьирования λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
z_1	65	55	60	5	$X_1 = \frac{Z_1 - 60}{5};$
z_2	420	240	330	90	$X_2 = \frac{Z_2 - 330}{90};$
z_3	5	3	4	1	$X_3 = Z_3 - 4;$

2. Считаем средние выборочные результатов для каждого эксперимента:

$$\bar{Y}_i = \frac{(y_{1i} + y_{2i} + y_{3i})}{3} \quad (2)$$

Где i - номер эксперимента.

Строим матрицу планирования с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика в кодированных единицах. Здесь же приведем вспомогательные графы, необходимые для расчета коэффициентов регрессии b_{ij} и b_{ijk} . Матрица планирования для обработки результатов приведено в таблице 3.



Таблица 3.

№ эксперимент	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Среднее результатов \bar{y}_j
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3	
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	16,3	17,7	16,5	16,833
2	-1	1	-1	-1	1	-1	1	6,6	7,4	8,3	7,433
3	1	-1	-1	-1	-1	1	1	8,8	9,2	8,5	8,833
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	5,1	5,4	5,7	5,400
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	35,1	34,4	35,2	34,900
6	-1	1	1	-1	-1	1	-1	18,5	17,4	17,7	17,867
7	1	-1	1	-1	1	-1	-1	24,1	24,8	25,6	24,833
8	1	1	1	1	1	1	1	11,8	12,2	12,5	12,167

3. Коэффициенты уравнения регрессии определяем по следующим формулам.

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j \quad (3)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j, \quad i = \overline{1, k} \quad (4)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{ip} \bar{y}_j, \quad r < P, \quad r = \overline{i, k}, \quad P = \overline{1, k} \quad (5)$$

$$b_{1,2,3} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{j1} x_{j2} x_{j3} \bar{y}_j \quad (6)$$

Используя значения таблицы 3 и формулы находим коэффициенты уравнения регрессии (1), где показано в таблице 4.

Таблица 4.

b_0	b_1	b_2	b_3	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$	$b_{1,2,3}$
16,0333	-3,2250	-5,3167	6,4083	1,2917	-0,7167	-2,1083	-0,2000

4. Некоторые из коэффициентов уравнения регрессии, написанное исходя из таблицы 4., могут оказаться пренебрежимо малыми незначительными. Чтобы установить, значим коэффициент или нет, выполним следующие:

вычислим оценку воспроизводимости $S_{\{y\}}^2$.



$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \right) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 \quad (7)$$

Где n- число экспериментов (число строк в матрице ПФЭ);

m- число опытов в каждом эксперименте;

y_{ji} - результат отдельного i-го наблюдения в j-го эксперименте.

\bar{y}_j - выборочное значения наблюдений для j-го эксперимента.

Для удобства оформляем расчеты в виде таблицы 5.

Таблица 5.

j	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_j	$(y_{j1} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_j)^2$	S_j^2
1	16,3	17,7	16,5	16,833	0,2844	0,7511	0,1111	0,5733
2	6,6	7,4	8,3	7,433	0,6944	0,0011	0,7511	0,7233
3	8,8	9,2	8,5	8,833	0,0011	0,1344	0,1111	0,1233
4	5,1	5,4	5,7	5,400	0,0900	0,0000	0,0900	0,0900
5	35,1	34,4	35,2	34,900	0,0400	0,2500	0,0900	0,1900
6	18,5	17,4	17,7	17,867	0,4011	0,2178	0,0278	0,3233
7	24,1	24,8	25,6	24,833	0,5378	0,0011	0,5878	0,5633
8	11,8	12,2	12,5	12,167	0,1344	0,0011	0,1111	0,1233

Суммируя элементы последнего столбца таблицы 5, получаем: $\sum_{j=1}^n S_j^2 = 2,71$

из формулы (7) получаем дисперсию воспроизводимости: $S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 S_j^2 = 0,3388$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{n \cdot m}} = 0,1188 \quad (8)$$

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m-1)=8 \cdot 2=16$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{кр.} = 2,12$.

Следовательно, $t_{кр.} \cdot S_{\text{коэф}} = 2,12 \cdot 0,1188 = 0,25185 \approx 0,252$. Сравнивая

полученное значение $t_{кр.} \cdot S_{\text{коэф}} \approx 0,252$ с коэффициентами уравнения

регрессии, представленными в таблице 3.4 видим, что все кроме $b_{1,2,3}$

коэффициента больше по абсолютной величине 0,252.

Следовательно, кроме $b_{1,2,3}$ все коэффициенты значимы.



Полагая кроме $b_{1,2,3}=0$, получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y=16,03-3,23x_1-5,32x_2+6,41x_3+1,29x_1x_2-0,72x_1x_3-2,11x_2x_3 \quad (9)$$

5. Проверим полученное уравнение (9) на адекватность по критерию Фишера. Так как дисперсия воспроизводимости найдена в предыдущем пункте, то для определения расчетного значения критерия $F_{расч}$, необходимо вычислить остаточную дисперсию $S_{ост}^2$. Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии \tilde{y}_j ($j=1, \dots, 8$), подставляя +1 или -1 вместо x_i в соответствии с номером j эксперимента из таблицы 4:

Остаточную дисперсию $S_{ост}^2$ вычисляем по формуле.

$$S_{ост}^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{j=1}^8 (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2 = 0,96 \quad (10)$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}$ определяем по формуле.

$$F_{расч} = \frac{S_{ост}^2}{S_{\{y\}}^2} = 2,83 \quad (11)$$

Табличное значение критерия $F_{табл}$ находим из таблиц критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha=0,05$ по соответствующим степеням свободы $k_1=n-r=8-7=1$ и $k_2=n(m-1)=8 \cdot 2 = 16$:

$F_{табл}=4,49$. Так как $F_{расч}=2,83 < F_{табл}=4,49$, то уравнение регрессии (9) адекватно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведем интерпретацию полученной модели (9). По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор x_3 , x_2 и x_1 толщина слоя репчатого лука, время сушки и температура сушки так как они имеют наибольший по абсолютной величине коэффициент. После него по силе влияния на отклик идут: двойное

взаимодействие факторы x_2x_3 (время сушки и толщина слоя репчатого лука) и x_1x_2 (температура сушки и время сушки) потом влияет двойные взаимодействие факторы x_1x_3 (температура сушки и толщина слоя репчатого лука);

7. Выписываем уравнение регрессии (9) в натуральных переменных, подставляя вместо x_i их выражения через z_i , которые берем из последнего столбца таблицы 3.4:

$$y = 16,03 - 3,23\left(\frac{Z_1 - 60}{5}\right) - 5,32\left(\frac{Z_2 - 330}{90}\right) + 6,41(Z_3 - 4) + 1,29\left(\frac{Z_1 - 60}{5}\right)\left(\frac{Z_2 - 330}{90}\right) - 0,72\left(\frac{Z_1 - 60}{5}\right)(Z_3 - 4) - 2,11\left(\frac{Z_2 - 330}{90}\right)(Z_3 - 4) \quad (12)$$

Преобразовав это уравнение, окончательно получаем его вид в натуральных переменных:

$$y = 39,9 - 1,016z_1 - 0,1374z_2 + 22,79z_3 + 0,0029z_1z_2 - 0,144z_1z_3 - 0,0234z_2z_3 \quad (13)$$

Как видно, интерпретация регрессионного уравнения в натуральных переменных идентичны уравнению в кодированных переменных. Для решения оптимальных задач оптимизации принимают в основном методы исследования функции классического анализа, методы, основанные на использовании неопределённых множителей Лагранжа, а также вариационное исчисление, динамическое программирование, линейное и нелинейное программирование и др. Как правило, нельзя рекомендовать какой-либо один метод для решения всех без исключения задач, возникающих на практике. Наилучший путь выбора метода оптимизации, наиболее пригодного для решения соответствующей задачи, - исследование возможностей применения различных методов оптимизации. Методы нелинейного программирования применяют для решения оптимальных задач с нелинейных функциями цели. В методе нелинейного программирования объединяется большая группа численных методов, многие из которых приспособлены для решения оптимальных задач соответствующего класса. Ряд методов нелинейного программирования практически постоянно используются в сочетании с другими методами оптимизации (например, с методом сканирования в динамическом программировании).

Метод сканирования заключается в последовательном просмотре критерия оптимальности в ряде точек,



принадлежащих области изменения независимых переменных, и нахождении среди этих точек такой, в которой критерий оптимальности имеет максимальной (минимальное) значение. Точность метода, естественно, определяется тем, настолько «густо» располагаются выбранные точки в допустимой области изменения независимых переменных. Основное достоинства метода сканирования состоит в том, что использование достаточно «густо» расположенных исследуемых точек всегда гарантирует отыскание глобального оптимума, так как анализируется вся область изменения независимых переменных. В связи этим для решения задачи оптимизации процесса сушки репчатого лука с использованием тепловых труб нами выбран метод сканирования.

Выбираем критерии оптимальности процесса сушки репчатого лука с использованием тепловых труб конечная влажность репчатого лука.

$$Y_{\text{вых}}=f(t,\tau,\delta)\rightarrow Y_{\text{вых}}\rightarrow\min \quad (14)$$

При поиске с методом сканирования находим наименьшие координаты, которые находится минимальный выход влажности:

Для температуры – 65, для времени – 210, для толщины нарезки – 2, и выход продукта(влажность) – 1,7. Этих выводов можно подтверждать используя трехмерных графиков.

Свойства полученной уравнения регрессии можно видеть в следующих графиках. Для этого один из трех факторов фиксируем, тогда можем получить трехмерный график.

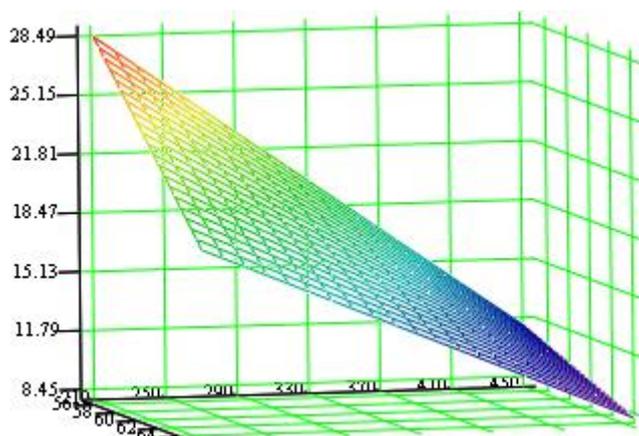


Рис.1. Влияние температуры и времени сушки к влажности продукции при фиксированной значении толщины слоя репчатого лука, равной 4 мм.

На рис.1., показано влияние температуры и времени

сушки к влажности продукции при фиксированной значении толщины слоя лука, равном 4 мм. Из рисунка видно, что с увеличением температуры и времени сушки влажность продукции падает. Минимум влажности получается при максимальных значениях температуры и времени сушки. Максимум влажности получается при минимальных значениях температуры и времени сушки. При продолжительном времени и при минимальном значении температуры тоже наблюдается уменьшение влажности продукции, но не в таком уровне, как при максимальных значениях температуры и времени.

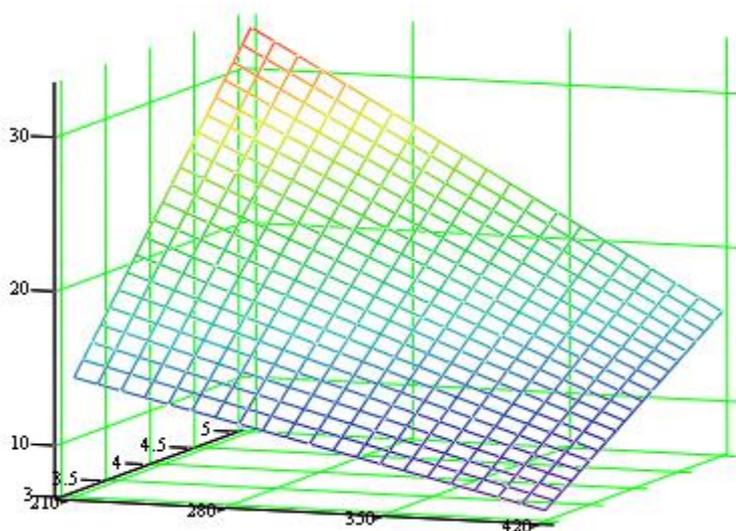


Рис.2. Влияние толщины слоя репчатого лука и времени сушки к влажности продукции при фиксированной значении температуры.

На рис.2. показано влияние толщины слоя репчатого лука и времени сушки к влажности продукции при фиксированной значении температуры, равной 60 градусам. Из графика видно, что при уменьшении толщины слоя лука и при увеличении времени сушки влажность продукта убивается и принимает минимальное значение при минимальном значении толщины и максимальной значении времени. Таким же образом, максимальное значение влажности получается при начальной стадии времени сушки и максимальной значении толщины нарезки лука. Эти выводы, полученные из графиков, соответствует физике процесса.

ВЫВОДЫ

После статистического анализа и описания графика регрессионного уравнения можно сделать вывод, что полученный математический модель адекватно описывает процесс сушки репчатого лука.

При критерии оптимальности процесса сушки репчатого лука с использованием тепловых труб и из трехмерных графиков можно сделать вывод при температуре 60⁰С, толщина слоя репчатого лука 4 мм, время сушки 300 минут при скорости воздуха 3 м/с оптимальный режим сушки который влажность репчатого лука достигает до 12%.

Таким образом, использование полного факторного эксперимента для моделирования сушки продуктов позволяет определить степень влияния факторов на выходные параметры системы. Применение данного подхода при разработке сушильных установок позволяет разработать гибкие стратегии управления и комплексной оценки ситуаций, реализуемые в агро сфере.

REFERENCES

1. Холиков А.А., Мирзаева Ш.У., Рахматов У.Р. Расчет конвективной сушильной установки с применением тепловых труб. "UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ" Электронный научный журнал №10 (67), Москва 2019, с.63-67.
2. Gafurov K., Hikmatov D., Kholiqov A.A., Safarov O. Energy resource-saving technologies in processing of fruits and vegetables. Monograph. Publishing house "Durdona" Bukhara. Protocol №3 dated 29.11.2019. "Шарқ -Бухоро" МЧЖ босмахоноаси 2019й. Ps.116.
3. Gafurov K.Kh., Hikmatov D.N., Kholikov A.A., Safarov O.F. Application of heat pumps and heat pipes in the food industry. Monograph. Publishing house "Durdona" Bukhara. Protocol №3 dated 01.07.2020. "Шарқ -Бухоро" МЧЖ босмахоноаси 2020 й. Ps.112.
4. Сафаров А.Ф., Гафуров К.Х., Хикматов Д.Н., Холиков А.А. Энергосберегающие технологии при переработке плодов и овощей. Бухара. Издательство: Дурдона, 2013. - 248 с.
5. P.N.Sarsavadia. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. Renewable Energy Volume 32, Issue 15, December 2007, Pages 2529-2547.
6. Letícia Ferraresi Hidalgo^a Mariana Nascimento Candido^b Karina Nishioka^b José Teixeira Freire^a Gustavo Nakamura Alves Vieira^b. Natural and forced air convection operation in a direct solar dryer assisted by photovoltaic module for drying of green onion. Solar Energy. Volume 220, 15 May 2021, Pages 24-34

7. Холиков А.А., Мирзаева Ш.У. Расчет конденсирующей части высокоэффективного теплопередающего устройства. Международная научно-практическая конференция “Интеграция современных научных исследований в развитие общества” 28-29 декабря Россия, г.Кемерево-2016г. Том1, 80 стр.
8. Холиков А.А., Гафуров К.Х. Исследование теплопроводности тепловых труб. «Инновации в индустрии питания и сервисе» электронный сборник материалов III Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» Краснодар, 25 октября 2018 г. 202 стр.
9. Холиков А.А., Мирзаева Ш.У., Фатуллаев Ш. Подсистемы аккумулирования тепла. “Новые решения в области упрочняющих технологии: взгляд молодых специалистов” сборник научных статей международной научно-практической конференции 22 - 23 декабря Курск-2016 г. Том 2,348 стр.
10. Kholikov A.A., Quldosheva F.S. Testing And Determining The Temperature Characteristics Of Heat Pipes (HP). The American Journal of Applied Sciences, 2020. 2 (11), Ps.151-166.
11. Ибрагимов Р.Р., Холиков А.А., Абдурахмонов О.Р., Кобилов Х.Х. Пути решения энергетических затрат технологических процессов. Москва. /Вестник развития науки и образования. №3 2003, с.43-50.
12. Alijon Abdiraupovich Kholikov, Namrokul Kuvandikovich Sayidov, Murodjon Namidjonovich Beshimov. Analysis of Mathematical Models and Influence of Constructions of High Efficient Heat Transfer Devices. / Mathematical Modelling and Applications. Science Publishing Group Ps: 63-67 Published Online: Dec. 13, 2017.
13. Холиков А.А., Мирзаева Ш.У., Рахматов У.Р. Расчет конвективной сушильной установки с применением тепловых труб. “UNIVERSUM: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ” Электронный научный журнал №10 (67), Москва 2019, с.63-67.
14. Холиков А.А., Кулдошева Ф.С. Определения и испытания температурных характеристик высокоэффективной теплопередающих устройств(тепловых труб)// Eurasian journal of academic research, 2021. Volume 1. May. Ps.98-109.
15. Kholikov A.A., Jumaev J. Planning and conducting experiments of the drying process using heat pipes.// European Scholar Journal (ESJ), Vol.2 №3, March 2021. Ps. 36-46.
16. Alijon Kholikov, Jura Jumaev, Doniyor Hikmatov, Khamid Kuvvatov. Optimization of onion drying process parameters using



the full factorial experiment method// IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 848 (2021) 012010 doi:10.1088/1755-1315/848/1/012010

17. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент. // Методические указания. Новосибирск. НГАВТ, 2010, с. 36.

18. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико- технологических процессов.-2-е изд., перераб. И доп.-М.: Химия, 1982, с.66-100.

19. Дан.П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. Пер.с англ.Ю.А.Зейгарника:-М.: Энергия, 1979. с.272.

20. Чи.С. Тепловые трубы: Теория и практика/ Пер.с англ. В.Я. Сидорова -М.: Машиностроение, 1981. с.207.

