

сети выполняются трех- и пятипроводными. В групповых линиях, питающих розеточные сети для переносного электрооборудования, предусмотрена установка УЗО. Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции наряду с другими мерами применяется уравнивание потенциалов [7].

Следует отметить, что еще не решенным вопросом остается осуществление бесперебойного питания электроустановок школ, относящихся к I категории электроснабжения. АВР от двух кабельных или воздушных линий от одного трансформатора (как правило, небольшой мощности) не может считаться надежным. Одним из возможных вариантов является резерв от маломощной дизельной электроустановки. Возможны и другие варианты, которые следует выбирать на основе экономических расчетов.

Литература

1. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. Вып. 7. – Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2007. – 854 с.
2. Правила устройства электроустановок. Раздел VI. Электрическое освещение. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1999. – 80 с.
3. Кунгс Я.А., Цугленок Н.В. Энергосбережение и энергоаудит в осветительных и облучательных установках: учеб. пособие. – Красноярск, 2004. – 266 с.
4. Федеральный закон об энергосбережении и повышении энергетической эффективности от 23 ноября 2009г. №261-ФЗ. – URL:[http:// www. economy.gov.ru](http://www.economy.gov.ru).
5. Хайнрих М. Возможности и тенденции экономии электроэнергии при применении электронных пуско-регулирующих аппаратов и светорегулирующей системы Luxcontrol в осветительных установках // Светотехника. – 1997. – № 1. – С. 20–24.
6. Кунгс Я.А. Автоматизация управления электрическим освещением. – М.: Энергоиздат, 1989. – 112 с.
7. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 192 с.



УДК 631.17

Т.Н. Бастрон, Н.М. Чурухина

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ СУШКИ ОВСА АКТИВНЫМ ВЕНТИЛИРОВАНИЕМ

В статье представлены результаты исследования процесса сушки зерна овса активным вентилярованием на экспериментальной установке. Получены уравнения регрессии и выбраны энергосберегающие режимы в соответствии с целевым назначением и рекомендуемыми пределами конечной влажности овса.

Ключевые слова: сушка, активное вентилярование, корреляционно-регрессионный анализ, энергосберегающие режимы, зерно.

T.N. Bastron, N.M. Chirukhina

ENERGY SAVING MODES OF DRYING THE OATS BY MEANS OF FORCED AERATION

The research results of the process of oats grain drying by means of forced aeration on the basis of experimental installation are given in the article. Equations of regression are received and energy-saving modes are chosen in accordance with the purpose and recommended limits of final oat moisture.

Key words: drying, forced aeration, correlation-regression analysis, energy-saving modes, grain.

Одной из важных проблем в сельскохозяйственном производстве является обеспечение сохранности выращенного урожая. В поточной технологии послеуборочной обработки зерна сушка является наиболее сложной и энергоемкой операцией. Поэтому обоснование направления развития технологий и технических средств, обеспечивающих минимальные затраты антропогенной энергии при рациональном использовании природных ресурсов и возможном меньшем загрязнении окружающей среды, рассматривают сейчас как актуальную научную и практическую проблему. В практике сушки, временного хранения и вентилирования больших партий зерна широко применяются установки активного вентилирования различных конструкций, в

частности напольная электро-тепло-вентиляционная установка. Преимущество активного вентилирования – небольшая мощность установки, выравненность высушенного материала по влажности, простота технических средств для его осуществления.

Энергосбережение в электрифицированных вентиляционных установках (ЭВУ) возможно за счет: обоснованного расчета мощности электрического подогревателя, проектирования вентиляционной сети с минимальным напором и применением вентиляторов и электрических двигателей с высоким КПД, выбора энергосберегающих режимов работы.

В качестве объекта исследования выбраны режимы работы ЭВУ активного вентилирования зерна. Основными методами исследования являются: физическое и математическое моделирование; активное планирование эксперимента для выявления уравнений регрессии влажности зерна; статистические методы обработки и оценки результатов экспериментов (дисперсионный и регрессионный анализы); численный метод.

Модельные исследования с целью получения уравнений регрессии проводились на экспериментальной лабораторной установке [1–4].

В процессе сушки овса все множество факторов, определяющих работу тепловентиляционной установки, можно разделить на:

- контролируемые управляемые переменные, которые в процессе исследования могут изменяться в соответствии с некоторым планом (влажность и скорость воздуха; мощность электрокалориферной установки, время сушки);
- контролируемые неуправляемые переменные (температура и влажность по высоте зернового слоя, начальная влажность зерна);
- неконтролируемые возмущения, вносящие свою корректировку в работу исследуемого объекта.

В качестве исследуемых параметров для модели были выбраны влажность W_3 , %, и температура зерна t_3 , °С. Область исследования ограничивалась допустимыми значениями W_3 , t_3 . Температура нагрева овса не должна превышать 50–55 °С [5]. В противном случае процесс сушки может привести к появлению поджаренных, запаренных зерен, зерен с лопнувшими или вздутыми оболочками, к увеличению количества битых и дробленых зерен.

Начальная влажность зерна во всех опытах поддерживалась на уровне $21\% \pm 2\%$. Величина конечной влажности, до которой целесообразно сушить зерно овса, находится в пределах 12,5...16%, в зависимости от назначения высушенного продукта: на кормовые цели и на комбикорма, для крупяной промышленности, на солод [6].

На основании литературных данных из множества факторов, влияющих на процесс сушки, для исследования были выбраны факторы и их диапазон изменения, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Величины и диапазон изменения управляемых факторов

Управляемые факторы	Кодированное значение управляемых факторов	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
		-1	0	1	
Влажность воздуха, %	x_1	60	70	80	10
Скорость воздуха, м/с	x_2	2,4	3	3,6	0,6
Мощность электрообогревателя, Вт	x_3	384	768	1152	384
Экспозиция сушки, ч	x_4	16	32	48	16

Размерные управляемые независимые факторы были преобразованы в безразмерные, нормированные X_i ($i = 1, 2, \dots, m$) (табл.1):

$$X_i^{(-)} \leq X_i \leq X_i^{(+)} , \quad (1)$$

$$X_i^0 = \frac{X_i^{(-)} + X_i^{(+)}}{2}, \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{X_i^{(+)} - X_i^{(-)}}{2}, \quad (3)$$

где $X_i^{(0)}$ – основной уровень факторов; $X_i^{(-)}$ – нижний уровень факторов; $X_i^{(+)}$ – верхний уровень факторов; λ_i – шаг варьирования.

Это дает возможность легко построить ортогональную матрицу планирования и значительно облегчает дальнейшие расчеты, так как в этом случае верхние и нижние уровни варьирования в относительных единицах равны соответственно +1 и -1 независимо от физической природы факторов, значений основных уровней и интервалов варьирования [7].

Для постановки опытов было применено активное планирование и выбран полный факторный эксперимент. В случае четырех независимых переменных ($m = 4$) хорошими свойствами обладает четырехфакторный план Бокса B_4 , включающий 24 опыта ($N=24$). В планах второго порядка каждая из независимых переменных должна принимать несколько, но не менее трех, значений. При небольшом числе переменных ($m \leq 4$) это один из лучших планов с точки зрения близости к критерию D-оптимальности и числа экспериментальных точек. Матрица плана представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X _{1U}	X _{2U}	X _{3U}	X _{4U}	y _U	№ опыта	X _{1U}	X _{2U}	X _{3U}	X _{4U}	y _U
1	1	1	1	1	y ₁	13	1	1	-1	-1	y ₁₃
2	-1	1	1	1	y ₂	14	-1	1	-1	-1	y ₁₄
3	1	-1	1	1	y ₃	15	1	-1	-1	-1	y ₁₅
4	-1	-1	1	1	y ₄	16	-1	-1	-1	-1	y ₁₆
5	1	1	-1	1	y ₅	17	1	0	0	0	y ₁₇
6	-1	1	-1	1	y ₆	18	-1	0	0	0	y ₁₈
7	1	-1	-1	1	y ₇	19	0	1	0	0	y ₁₉
8	-1	-1	-1	1	y ₈	20	0	-1	0	0	y ₂₀
9	1	1	1	-1	y ₉	21	0	0	1	0	y ₂₁
10	-1	1	1	-1	y ₁₀	22	0	0	-1	0	y ₂₂
11	1	-1	1	-1	y ₁₁	23	0	0	0	1	y ₂₃
12	-1	-1	1	-1	y ₁₂	24	0	0	0	-1	y ₂₄

Для определения количественной зависимости влажности и температуры зерна от выбранных факторов проведен корреляционно-регрессионный анализ и получены уравнения регрессии:

$$y_{w_{пер}} = 14,4651 - 0,2X_2 - 1,375X_3 - 1,2903X_4 - 0,81X_1^2 - 0,6X_1X_4 \quad (4)$$

$$y_{т_{рег}} = 24,535 + 0,63X_2 + 4,34X_3 + 0,77X_1 - 0,91X_1X_4 - 0,803X_3X_4 \quad (5)$$

Сравнивая экспериментальные данные y_w , y_t и данные, полученные с помощью уравнений регрессии $y_{w_{рег}}$, $y_{т_{рег}}$ (лепестковая диаграмма рис. 1, а,б), можно сделать вывод, что полученные уравнения (4) и (5) хорошо коррелируют и адекватно описывают процесс сушки.

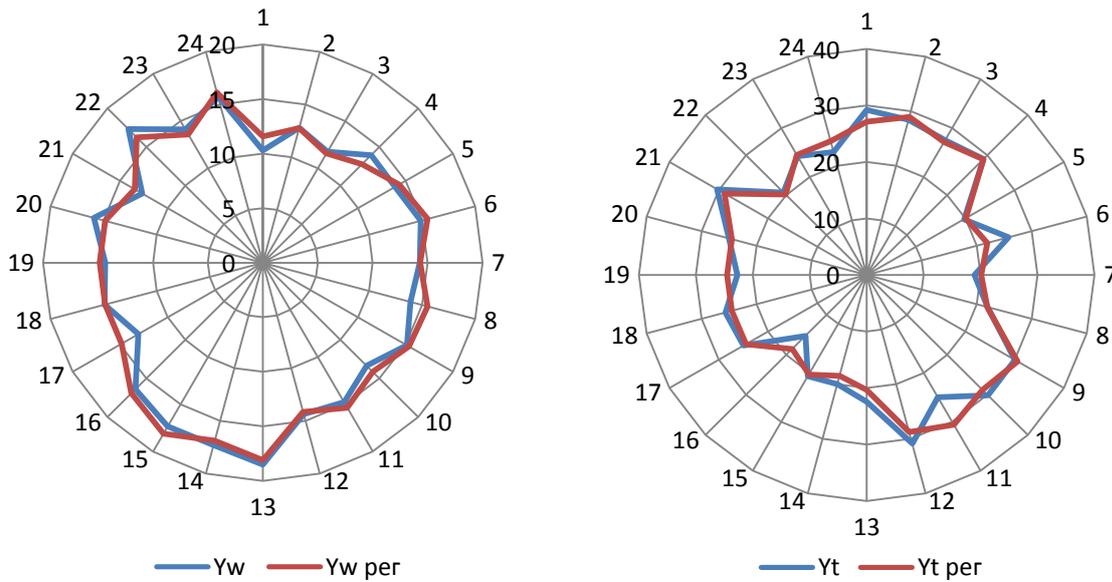


Рис. 1. Сравнительная оценка экспериментальных данных y_w, y_t и данных, полученных с помощью уравнений регрессии $y_{wрег}, y_{tрег}$.

Гипотеза об адекватности модели проверена с использованием F-критерия Фишера при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы f_1 и $f_2 = (N - d)$

$$F_{ад} = \frac{s_{ад}^2}{s^2} \leq F_{(f_2; f_1)} \quad (6)$$

где F – критерий Фишера; d – количество коэффициентов в уравнении регрессии

для модели $y_{wрег}$ $\frac{1,691}{18,433} = 0,092 < 2,02$;

для модели $y_{tрег}$ $\frac{9,826}{30,294} = 0,324 < 2,02$.

Полученные уравнения адекватны и позволяют рассчитывать конечную влажность и температуру зерна в заданной области факторного пространства. Примеры поверхностей откликов уравнений (4) и (5) представлены на рис. 2, а,б.

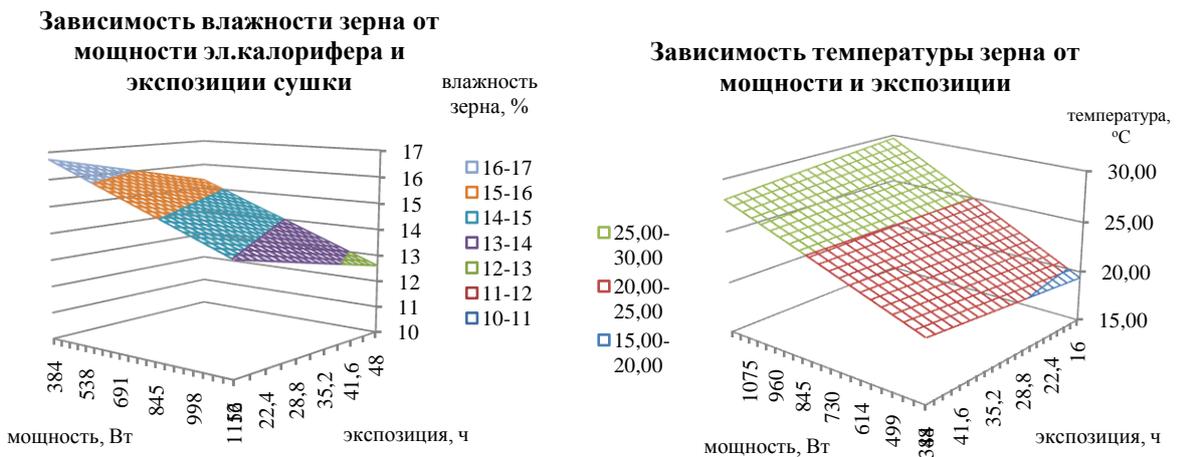


Рис. 2. Зависимость влажности и температуры зерна от мощности и экспозиции сушки

Энергосберегающие режимы были выбраны при фиксированных значениях влажности и скорости воздуха (см. табл. 4) в соответствии с целевым назначением и рекомендуемыми пределами влажности, до которой целесообразно сушить овес. Температура зерна во всех режимах сушки не превышала допустимую температуру нагрева для овса.

Таблица 3

Режимы сушки в соответствии с целевым назначением и рекомендуемыми пределами влажности, до которой целесообразно сушить зерно овса

Культура овес	На переработку						На хранение до 3 мес., на длительное хранение (более 1года)								
	Влажность воздуха W_b , %	Скорость агента сушки, м/с	Мощность электрокало-риферной установки Р, кВт	Экспозиция сушки т, ч	Затраты электроэнергии, кВт. ч	Конечная влажность зерна W_{sk} , %	Влажность воздуха W_b , %	Скорость агента сушки, м/с	Мощность электрокало-риферной установки Р, кВт	Экспозиция сушки т, ч	Затраты электроэнергии, кВт. ч	Конечная влажность зер-на W_{sk} , %			
Для крупяной промышленности	80	3,6	0,46	48,0	22,12	12,5-13,5	80	3,6	0,384	46,4	17,82	13,0-14,0			
		3,0	0,54	48,0	25,81			3,0	0,422	48,0	20,28				
		2,4	0,61	48,0	29,49			2,4	0,461	48,0	22,12				
	70	3,6	1,15	25,6	29,49		70	3,6	1,152	19,2	22,12				
		3,0	0,691 1,152	48,0 28,8	33,18 33,18			3,0	0,538 0,115	48,0 22,4	25,81 25,81				
		2,4	1,152	30,4	35,03			2,4	0,614	48,0	29,49				
	60	3,6	1,152	19,2	22,12		60	3,6	1,037	16,0	16,59				
		3,0	1,152	24,0	27,65			3,0	1,114	16,0	17,81 76				
		2,4	1,152	27,2	31,33			2,4	1,152	16,0	18,43				
	На кормовые цели и на комбикорма	80	3,6	0,384	33,6		12,90	14,5-15,5	80	3,6	0,384		46,4	17,82	13,0-14,0
			3,0	0,384	35,2		13,52			3,0	0,422		48,0	20,28	
			2,4	0,384	36,8		14,13			2,4	0,461		48,0	22,12	
70		3,6	0,806	16,0	12,90	70	3,6		1,152	19,2	22,12				
		3,0	0,384 0,883	36,8 16,0	14,13 14,13		3,0		0,538 1,152	48,0 22,4	25,81 25,81				
		2,4	0,922	16,0	14,75		2,4		0,614	48,0	29,49				
60		3,6	0,653	16,0	10,45	60	3,6		1,037	16,0	16,59				
		3,0	0,691	16,0	11,06		3,0		1,114	16,0	17,81 76				
		2,4	0,730	16,0	11,67		2,4		1,152	16,0	18,43				
На солод		80	3,6	0,384	28,8	11,06	16,0		80	3,6	0,384	46,4	17,82	13,0-14,0	
			3,0	0,384	30,4	11,67				3,0	0,422	48,0	20,28		
			2,4	0,384	32,0	12,29				2,4	0,461	48,0	22,12		
	70	3,6	0,384	27,2	10,45	70		3,6	1,152	19,2	22,12				
		3,0	0,384 0,691	28,8 16,0	11,06 11,06			3,0	0,538 1,152	48,0 22,4	25,81 25,81				
		2,4	0,768	16,0	12,29			2,4	0,614	48,0	29,49				
	60	3,6	0,461	17,6	8,11	60		3,6	1,037	16,0	16,59				
		3,0	0,538	1,6	8,60			3,0	1,114	16,0	17,81 76				
		2,4	0,614	16,0	9,83			2,4	1,152	16,0	18,43				

Выводы

• В практическом отношении полученная модель дает возможность с определенной точностью прогнозировать значение выходных параметров в пределах изученной области факторного пространства.

• Выполненные опыты показали: при начальной влажности зерна $21\% \pm 2\%$ и конечной 12,5...16% затраты тепловой энергии колебались в пределах 8,11...29,4 кВт·ч, или 29,2...104,4 МДж, в экспериментальной установке (масса зерна 38 кг), или в пересчете на тонну 213,4...921,6 кВт·ч/т, или 768,32...2747,36 МДж/т. Расходы электрической энергии на тонну высушенного зерна в шахтных зерносушилках составляют 790...996 МДж.

• Сравнительный анализ степени влияния скорости агента на процесс сушки показал: при прочих равных условиях увеличение скорости агента сушки с 2,4 до 3,6 м/с дает сокращение тепловых затрат до 10 кВт·ч (или 263,16 кВт·ч/т).

• Полученные зависимости и построенные поверхности откликов позволяют выбрать режимы сушки зерна с минимальными энергозатратами при влажности воздуха 70% и скорости агента 3,6 м/с, экспозиция сушки и затраты тепловой энергии в соответствии с целевым назначением составляют:

для крупяной промышленности	25,6 ч	29,5 кВт·ч
на кормовые цели и на комбикорма	16 ч	13,51 кВт·ч
на солод	16 ч	10,44 кВт·ч
на хранение	19,2 ч	22,12 кВт·ч

На основе выполненных исследований были проведены производственные испытания на напольной электро-тепло-вентиляционной установке. Было высушено 50 т овса влажностью 23% до конечной влажности зерна 14%, при этом затраты тепловой энергии составили 240,8 кВт·ч/т, или 866,8 МДж/т. Полученные результаты согласуются с результатами экспериментальных исследований.

Литература

1. *Бастрон Т.Н., Чирухина Н.М., Джан У.Ф.* Определение энергоэффективных режимов сушки зерна // Высокие технологии энергосбережения: тр. междунар. школы-конф. – Воронеж: Изд. дом «Кварта», 2005. – 188 с.
2. *Бастрон Т.Н., Чирухина Н.М.* Методика определения энергоэффективных режимов сушки зерна активным вентилированием // Энергоэффективность: достижения и перспективы: мат-лы V науч.-практ. конф. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004.
3. *Бастрон Т.Н., Чирухина Н.М.* Рациональные режимы сушки зерна активным вентилированием // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: мат-лы VIII Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск: ИПЦ СФУ, 2007.
4. А. с. № 58007, МПК А 01 F 25/08. Устройство для сушки зернообразных продуктов активным вентилированием / *Т.Н. Бастрон, Н.М. Чирухина.* – Опубл. 10.11.06, Бюл. № 31.
5. *Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С.* Зерносушение и зерносушилки. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
6. *Юкиш А.Е., Ильина О.А.* Техника и технология хранения зерна. – М.: ДеЛи принт, 2009. – 718 с.
7. *Пэн Р.З.* Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства: учеб. пособие. – Красноярск: Изд-во КГУ, 1982. – 192 с.

