

УДК 631.365.22:62.662.3

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

**В.В. Поддубицкий,**

науч. сотр. сектора «Технологии утилизации отходов»  
ГП «Институт энергетики НАН Беларуси», магистр техн. наук

**В.П. Чеботарев,**

зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований неравномерности распределения твердого растительного топлива в топках воздухонагревателей зерносушилок, позволяющих эффективно сжечь мелкофракционное твердое биотопливо, а также повысить КПД воздухонагревателей и улучшить качество получаемого зерна.*

*Ключевые слова: твердое топливо, измельченная солома, щепка, распределитель топлива, воздухонагреватель зерносушилки.*

*The article presents the results of experimental studies of the uneven distribution of solid vegetal fuel in grain dryers air heaters furnaces, which make it possible to effectively burn small-fraction solid biofuels, and will also increase the efficiency of air heaters and improve the quality of the resulting grain.*

*Keywords: solid fuel, chopped straw, wood chips, fuel distributor, grain dryer air heater.*

### Введение

Энергоэффективное производство сельскохозяйственной продукции является приоритетным направлением развития агропромышленного производства Республики Беларусь и неразрывно связано с внедрением новых и совершенствованием применяемых технологий и технологического оборудования в сельском хозяйстве.

Наиболее энергозатратной операцией в сельском хозяйстве является послеуборочная обработка зерна. В частности, для сушки одной плановой тонны зерна пшеницы необходимо затратить 6,6 кг дизельного топлива или 9 м<sup>3</sup> природного газа [1]. При этом дизельное топливо не только является самым дорогим видом топлива, используемым в сельском хозяйстве, но и наносит существенный вред окружающей среде. Использование для сушки зерна воздухонагревателей, работающих на местных видах топлива, например, на дровах, показало значительный экономический эффект. Однако из-за цикличности загрузок топлива, неравномерной его влажности, а также неэффективном использовании топочного пространства, эксплуатация таких воздухонагревателей показала, что необходимо использовать воздухонагреватели с автоматической подачей мелкофракционного топлива (древесной щепы, измельченной соломы, отходов зернового вороха, льняной костры). Такое топливо может равномерным слоем заполнять топочное пространство и, тем самым, уменьшать химический и механический недожог, предотвращать вредные температурные нагрузки на колосниковую решетку. Наиболее простым и дешевым воздухонагревателем, применяющим такие виды топлива, является воздухонагреватель, оснащенный неподвижной колосниковой решеткой и распределителем топлива.

Целью работы является определение оптимальных параметров распределителя, обеспечивающих минимальные значения неравномерности распределения топлива внутри топочной камеры.

### Основная часть

Проведенные многочисленные теоретические исследования показали, что наибольшее уменьшение неравномерности распределения топлива обеспечивают распределители топлива, рабочим органом которых является вал, оснащенный винтовой поверхностью, вращающейся с частотой 50 мин<sup>-1</sup> [2]. Для поиска оптимальных параметров такого рабочего органа были проведены экспериментальные исследования на базе установки, разработанной в Институте энергетики НАН Беларуси.

В исследованиях использовались массово используемые, доступные и дешевые мелкофракционные виды топлива: древесная щепка и измельченная солома зерновых. Физико-механические свойства используемого топлива были исследованы до опытов, и их результаты представлены в таблице 1.

В ходе предварительных испытаний отмечено существенное зависание измельченной соломы на рабочих органах. Для предотвращения этого установка была доработана и на винтовую поверхность установлены в шахматном порядке дополнительные пальчики. Схема и общий вид установки представлены на рисунке 1.

Технологический процесс работы установки протекал следующим образом: мотор-редуктор, за-

Таблица 1. Физико-механические свойства топлива, используемого в опытах

	Древесная щепа		Солома зерновых	
	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение
Длина, мм	30,4	8,4	94,7	15,1
Ширина, мм	13,1	4,3	5,4	1,7
Толщина, мм	7,4	2,1	-	-
Масса, г	0,7	0,16	-	-
Влажность, %	17	3,8	10	4,2
Теплотворная способность:				
- кДж/кг	17115,1	124,3	16377,3	113,1
- ккал/кг	4087,9	29,7	3911,7	27

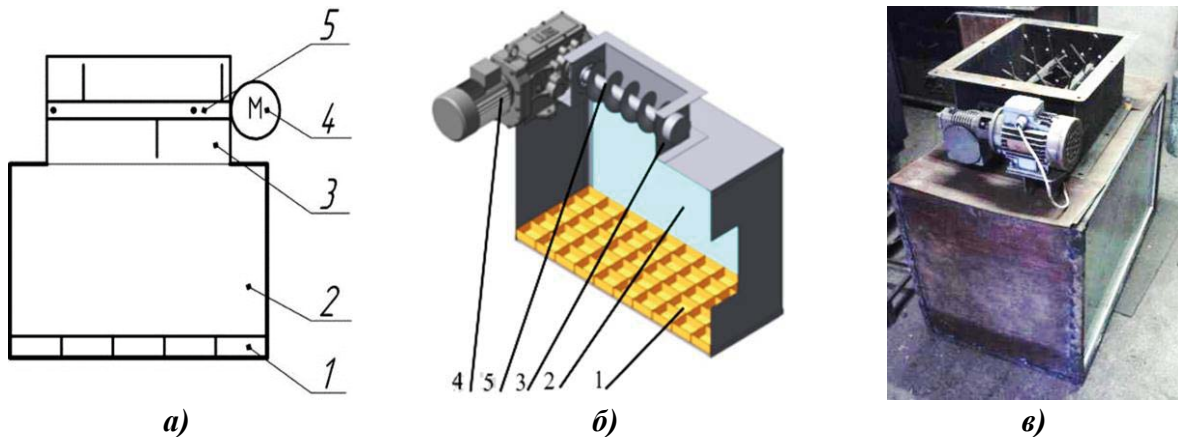


Рисунок 1. Схема и внешний вид экспериментальной установки:  
а) схема экспериментальной установки; б) трехмерный разрез экспериментальной установки;  
в) общий вид экспериментальной установки;  
1 – контейнеры для сбора проб; 2 – приемный бункер – короб; 3 – распределительный блок;  
4 – мотор-редуктор; 5 – вал с рабочими органами

крепленный в распределительном блоке, приводил во вращение с частотой 50 мин<sup>-1</sup> два вала с закрепленными на них рабочими органами. Использовались следующие рабочие органы: пальчики, установленные на валу (диаметром 9 мм и длиной 60 мм), винтовая поверхность с шагом установки 60 мм для пальчиков и 120 мм для винтовой поверхности (виток шнека). Сверху в распределительный блок подавалось топливо, которое после взаимодействия с рабочими органами отклонялось от первоначальной траектории и просыпалось в контейнеры для сбора проб. Контейнеры устанавливались равномерно по всей площади колосниковой решетки и представляли собой одинаковые емкости с размерами 165x95x60 мм.

При проведении исследований все используемые рабочие органы имели следующие базовые параметры: диаметр окружности, описываемый кромками рабочих органов D=150 мм; шаг (частота установки) S=60 мм. Варьируемыми факторами были приняты: частота вращения рабочих органов n и количество установленных пальчиков j (табл. 2).

В процессе испытаний, в качестве параметра оптимизации принимался коэффициент вариации распределения топлива по контейнерам Cv, %. При этом неравномерность распределения топлива не должна

была превышать 33% [3]. Коэффициент вариации рассчитывался по формуле:

$$Cv = \frac{S_M}{x_{cp}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $S_M$  – среднее квадратичное отклонение, г;  
 $x_{cp}$  – среднее значение исследуемого параметра, г.

Математический анализ проводился в соответствии с методикой, представленной в работах А.Н. Леонова [4] и Г.А. Хейлиса [5]. Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Уровни варьирования факторов в эксперименте

Варьируемый параметр	j	n
Единицы измерения	шт.	мин <sup>-1</sup>
Кодовые обозначения	$x_1$	$x_2$
Основной уровень ( $x_i = 0$ )	16	50
Интервал варьирования	3	10
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	13	40
Верхний уровень ( $x_i = +1$ )	19	60

Все эксперименты проводились в трехкратной повторности. Полученные результаты усреднены и округлены. С целью исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними неконтролируемыми

емыми факторами, в ходе экспериментальных исследований выполнялась рандомизация опытов, под которой понимается чередование проведения отдельных опытов в случайном порядке. Это позволило сравнивать результаты подобных опытов вследствие усреднения влияния эффектов неконтролируемых факторов. Процедура рандомизации опытов выполнялась с помощью таблиц случайных чисел [6]. При этом, последовательно двигаясь по столбцам таблицы, были выбраны числа, соответствующие порядковым номерам проводимых опытов.

Матрица ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для двух факторов приведена в таблице 3.

**Таблица 3. Матрица планирования эксперимента**

Номер опыта	Уровень фактора		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$
1	1	-1	-1
2	1	1	-1
3	1	-1	1
4	1	1	1
5	1	-1	0
6	1	1	0
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	1	0	0

Проверка гипотезы об однородности дисперсий выполнялась с помощью критерия Кохрена, табличное значение которого выбиралось по таблице [5] и для чисел степеней свободы  $f_1 = 2$  и  $f_2 = 9$ ,  $G_{\alpha, f_k, k} = 0,478$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . После проведенных расчетов были получены экспериментальные значения критерия Кохрена: для древесной щепы – 0,47; для соломы – 0,32.

Из приведенных данных видно, что условие выполняется для каждого значения параметра оптимизации. Следовательно, гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречит экспериментальным данным, что позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости опытов.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены следующие регрессионные уравнения второго порядка для параметра оптимизации каждого вида топлива:

для древесной щепы:

$$Y_1 = 34,73 + 2,7x_1 + 1,65x_2 + 0,098x_1x_2 + 1,48x_1^2 - 1,05x_2^2; \quad (2)$$

для соломы:

$$Y_2 = 28,85 - 3,64x_1 - 0,82x_2 - 1,12x_1x_2 - 0,75x_1^2 + 0,9x_2^2. \quad (3)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных включал в себя определение значимости по-

лученных коэффициентов в уравнениях регрессии. Значимость коэффициентов уравнений проверялась по  $t$ -критерию Стьюдента. Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициентов. Табличное значение  $t$ -критерия Стьюдента  $t_{\alpha, f_6} = 2,1$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f_6 = 18$  [4, 5].

Так как полученные значения коэффициентов уравнения (для щепы – 1,13 и для соломы – 1,12) меньше табличного значения, то все коэффициенты уравнений регрессии являются значимыми.

Адекватность уравнений регрессии (2) и (3) экспериментальным данным проверялась по  $F$ -критерию Фишера.

Табличные значения критерия Фишера выбирались по таблице [4, 5] для чисел степеней свободы  $f_6$  и  $f_{ad}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и равнялись 4,26.

После проведения расчетов, были получены экспериментальные значения критерия Фишера (для щепы – 2,3, для соломы – 1,1). Так как расчетные значения критерия Фишера не превышают табличные, то, следовательно, полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные.

Для использования уравнений (2) и (3) в инженерных расчетах, они преобразовывались в раскодированный вид, заменой кодового значения факторов  $x_1$  и  $x_2$  на натуральные переменные:

$$x_1 = \frac{j-16}{3}, x_2 = \frac{n-50}{10}.$$

Таким образом, уравнения (2) и (3) в раскодированном виде приняли следующий вид:

для древесной щепы:

$$v_{щ} = 30,49 - 4,53j + 1,17n + 0,003jn + 0,16j^2 - 0,01n^2; \quad (4)$$

для соломы:

$$v_c = 23,54 + 3,33j - 0,38n - 0,04jn - 0,08j^2 + 0,009n^2. \quad (5)$$

Заключительным этапом математической обработки экспериментальных данных являлось определение оптимальной области значений исследуемых факторов на основании анализа поверхностей отклика, полученных методом двухмерных сечений (рис. 2).

Для определения оптимальных параметров распределителя, работающего на обоих видах топлива, полученные двухмерные сечения поверхностей отклика были наложены друг на друга согласно рисунку 3.

Анализ графических зависимостей (рис. 3) показал, что область оптимальных значений по величине неравномерности распределения топлива по поверхности колосниковой решетки для данных факторов находится в пределах, представленных в таблице 4.

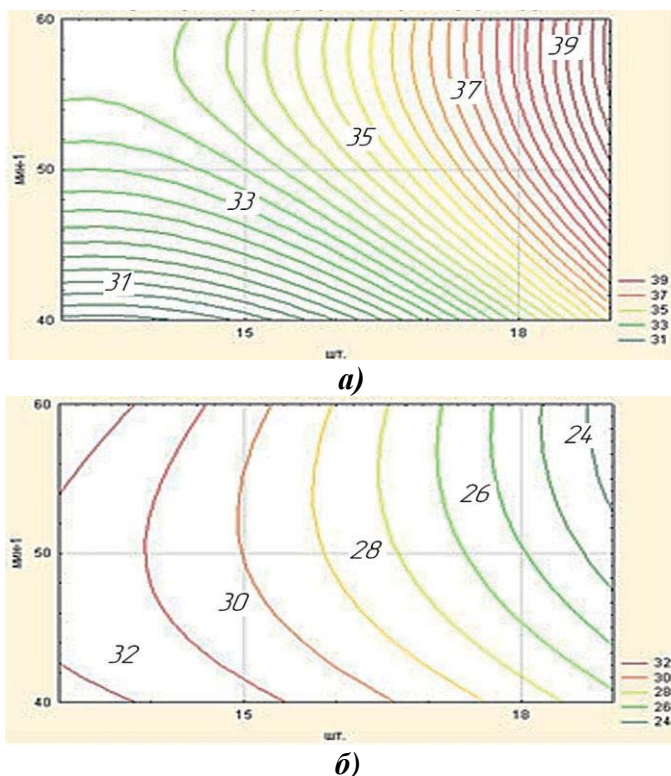


Рисунок 2. Двухмерные сечения поверхностей отклика зависимости неравномерности распределения топлива от количества пальчиков и частоты вращения рабочих органов для комбинированного распределителя  $Cv=f(j,n)$ : для древесной щепы (а); для соломы (б)

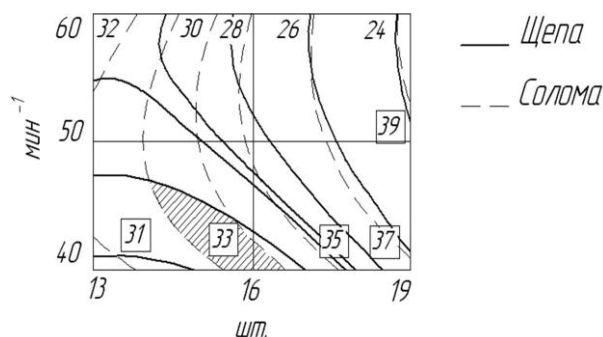


Рисунок 3. Наложение двухмерных сечений поверхностей отклика для щепы и соломы

Таблица 4. Величина оптимальных параметров, варьируемых при проведении эксперимента факторов

Фактор	Область оптимальных значений
	Комбинированный распределитель
Количество пальчиков, шт.	15...16
Частота вращения рабочих органов $n$ , мин <sup>-1</sup>	40...50

Оптимальным по неравномерности распределения признан распределитель топлива со следующими параметрами: количество пальчиков – 15 шт.; частота вращения рабочего органа – 45 мин<sup>-1</sup>.

#### Заключение

В результате экспериментальных исследований было установлено, что рабочий орган распределителя, оснащенный 15 пальчиками, при частоте его вращения 45 мин<sup>-1</sup>, обеспечивает неравномерность распределения топлива на уровне 33 %. С учетом того, что воздухонагреватель, не оборудованный распределителем топлива, создает неравномерность распределения топлива на измельченной соломе на уровне 73 %, а на древесной щепе 53 %, подтверждается, что применение распределителя топлива существенно уменьшает неравномерность его распределения на колосниковой решетке топки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экономические аспекты применения твердотопливных воздухонагревателей и местных видов топлива для сушки зерна / В.Н. Дашков [и др.] // Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза: монография / Институт технологических и естественных наук в Фалентах; отделение в Варшаве. – Варшава, 2018. – С. 38-40.
2. Поддубицкий, В.В. Теоретическое исследование движения частицы топлива в топочном пространстве / В.В. Поддубицкий, В.Н. Дашков, В.П. Чеботарев // Агропанорама. – 2020. – №2 (138). – С. 6-9.
3. Гусаров, В.М. Статистика: учеб. пособие для вузов / В.М. Гусаров. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 463 с.
4. Леонов, А.Н. Основы научных исследований в примерах и задачах / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис; под ред. А.Н. Леонова. – Минск: БГАТУ, 2013. – 136 с.
5. Хайлис, Г.А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.
6. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Роцин. – Л.: Колос, 1972. – 200 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 02.03.2021