

УДК 631.367

DOI 10.18286/1816-4501-2021-1-6-12

## **ЗНАЧЕНИЕ ПОИСКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ СОЗДАНИИ КОНТАКТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ**

**Агеев Петр Сергеевич**, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

**Сутягин Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

**Курдюмов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

**Павлушин Андрей Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89050359200; e-mail: andrejpravlu@yandex.ru.

**Ключевые слова:** поисковые исследования, контактный теплообмен, параметры, энергозатраты, семена, влагосъем, транспортирующий рабочий орган.

При проведении экспериментальных исследований необходимо провести количество опытов, достаточное для того, чтобы получить адекватную оптимизационную модель процесса. На процесс тепловой обработки зерна в зерносушилке контактного типа влияет большое количество различных факторов. Исследование суммарного влияния большого количества факторов, сочетающихся в произвольных соотношениях, часто приводит к неясным закономерностям и ошибочным выводам. В связи с этим все факторы, которые влияют на процесс тепловой обработки зерна в предложенной установке, были ранжированы на основные, оказывающие наибольшее влияние на развитие процесса, несущие наибольшую информацию, и дополнительные, имеющие второстепенное значение. Используя метод формализации априорной информации, а также с учетом требований к факторам (управляемость, однородность и отсутствие корреляции между ними) нами были выявлены те из них, которые оказывают наибольшее влияние на процесс тепловой обработки зерна в разработанной установке: температура греющей поверхности и частота вращения транспортирующего рабочего органа. На основе изучения ранее выполненных исследований по тепловой обработке зерна, поисковых опытов, а также, исходя из конструктивных особенностей исследуемой установки, были выявлены диапазоны варьирования факторов. При проведении основного эксперимента в качестве оптимизационного критерия нами были выбраны суммарные удельные энергозатраты на процесс испарения 1 кг влаги из семян  $q$ , кДж/кг. Данный показатель объединил в себе и энергетические показатели процесса, и тепло-массообменные, так как зависит от количества потребляемой энергии и влагосъема. Методически правильно проведенные поисковые исследования позволили сузить область проводимых экспериментов и при минимально необходимом количестве опытов получить адекватные и достоверные результаты основного эксперимента. Оптимизация температуры греющей поверхности и частоты вращения ТРО при сушке семян рыжика позволили обеспечить суммарные удельных затраты энергии на испарения влаги 4,40...4,55 МДж/кг при разовом влагосъеме 2,6...3,1 %.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 19-316-90060 Аспиранты**

## Введение

Сушка зерна и семян – важнейшее мероприятие, направленное на обеспечение эффективной сохранности продукта. Для того, чтобы зерно не снижало свои семенные и продовольственные свойства, необходимо обеспечить соблюдение соответствующих режимных показателей процесса его послеуборочной сушки. Кроме проведения сушки семян в определённые сроки, необходимо обеспечить выполнение таких критериев эффективности работы сушилки, как: разовый влагосъём, максимальная температура нагрева семян на выходе из зоны сушки, минимизация травмируемости семян транспортирующим рабочим органом сушилки, а также отсутствие локальных перегревов продукта при его взаимодействии с элементами конструкции сушилки.

При проектировании сушилок и проведении исследований по оптимизации основных режимных и конструктивных параметров созданных устройств необходимо учесть все возможные внешние факторы, влияющие на процесс сушки зерна или семян. При этом нужно минимизировать количество и длительность проводимых исследований [1, 2].

Таким образом, поисковые исследования, направленные на ограничение области проводимого эксперимента, выявление основных действующих режимных факторов при дальнейшем поиске оптимизационного критерия с учётом достоверности и адекватности проводимых экспериментов при требуемом уровне значимости критериев полученных математических моделей, являются актуальными и важными.

### Материалы и методы исследований

Для обеспечения эффективной технико-экономической модели функционирования разработанной нами контактной сушилки [3, 4] на оптимизированных режимах требуется обеспечение максимально возможной пропускной способности. Ее необходимо реализовать с учетом технологических особенностей мелких семян, для сушки которых в основном и предназначено разработанное средство механизации. Кроме того, важно минимизировать энергетические затраты на процесс испарения влаги из обрабатываемого материала при соблюдении всех технологических параметров процесса сушки [5, 6].



Рис. 1 – Факторы процесса сушки семян

При выявлении решения экстремальной задачи – обосновании оптимального совместного влияния факторов на процесс сушки учитывали существующие представления о физическом смысле процесса теплового воздействия на обрабатываемый материал. При этом провели предварительный отсев несущественных действующих факторов, а также выявили взаимосвязанные факторы процесса. Обе указанные категории факторов при решении оптимизационной задачи в учёт не брали. Факторы, которые можно контролировать, составляли основу при обработке результатов проведённых экспериментальных исследований.

На рисунке 1 действующие факторы сгруппированы по механизму воздействия на процесс сушки.

Следует отметить, что внутригрупповые и межгрупповые параметры зависимы друг от друга. Например, параметры процесса тепловой контактной сушки оказывают влияние на общий механизм теплоподвода, т.е. влияют на теплотехнические и конструктивные параметры и др. Масштабный анализ протекающих при контактной сушке процессов даёт возможность раскрыть основные зависимости этих параметров от тех или иных факторов.

Для обоснования оптимальных режимов работы проектируемой сушилки при работе с мелкими семенами будем использовать факторы процесса, которые можно контролировать и которыми можно управлять (табл. 1).

Факторы, приведённые в таблице 1, являются входными параметрами в кибернетической модели проектируемой сушилки. Выходными параметрами в данном случае будут следующие: пропускная способность, потребляемая мощность и качество семян, подвергаемых тепловой обработке [7-10].

Классификация основных факторов процесса сушки семян

Наименование фактора	Обозначение	Размерность	Взаимосвязанные факторы
Температура греющей поверхности	$X_1$	°C	$X_9$
Скорость движения семян	$X_2$	м/с	$X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{11}$
Подача зерна в сушилку	$X_3$	кг/с	$X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{11}$
Шаг спирали	$X_4$	м	-
Высота витков спирали	$X_5$	м	-
Площадь поперечного сечения загрузочного бункера	$X_6$	м <sup>2</sup>	-
Площадь поперечного сечения выгрузного окна	$X_7$	м <sup>2</sup>	-
Диаметр спирали	$X_8$	м	-
Установленная мощность нагревательных элементов	$X_9$	кВт	$X_2, X_3$
Установленная мощность привода транспортирующего рабочего органа	$X_{10}$	кВт	$X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{11}$
Частота вращения спирали	$X_{11}$	с <sup>-1</sup>	$X_2, X_3$

Проранжируем выбранные факторы по степени важности. Следует отметить, что в разрабатываемой установке контактного типа для обеспечения качественного теплового воздействия на семена необходимо оптимизировать две системы: 1) систему распределения семян по греющей поверхности и одновременной их транспортировки единичным слоем; 2) систему теплоподвода, обеспечивающую равномерный и с минимальными тепловыми потерями подвод тепловой энергии к движущимся семенам.

С учетом существующих теоретических и экспериментальных обоснований процессов теплового воздействия на семена при контактном теплоподводе нами были выявлены факторы, оказывающие существенное действие на процесс: температура греющей поверхности  $X_1$  и частота вращения транспортирующего рабочего органа  $X_{11}$ . Причём данные параметры относятся к категории и управляемых, и контролируемых. Оптимизируя целевую функцию процесса сушки семян в разработанной сушилке, необходимо учитывать пропускную способность установки, которая, в свою очередь, зависит от скорости движения семян  $X_2$  или от частоты вращения транспортирующего рабочего органа  $X_{11}$ .

При экспериментальном решении оптимизационной модели по обоснованию параметров работы созданной сушилки важно применять целевую функцию, которая объединит в себе такие параметры, как универсальность, измеряемость, и, главное, иметь возможность быть четко интерпретированной на основе существующих физических законов. При проведении основного эксперимента в качестве оп-

тимизационного критерия нами были выбраны суммарные удельные энергозатраты на процесс испарения 1 кг влаги из семян  $q$ , кДж/кг. Данный показатель объединил в себе и энергетические показатели процесса, и тепло- массообменные, так как зависит от количества потребляемой энергии и влагосъёма.

#### Результаты исследований

При проектировании лабораторной сушилки с целью определения оптимальных параметров процесса контактной сушки нами были созданы расчётные модели с использованием специализированных программных продуктов, позволяющих осуществить расчётно-оптимизационное физическое моделирование основных конструктивных элементов разрабатываемого средства механизации (рис. 2).

Поисковые исследования по определению пропускной способности разработанного средства механизации в зависимости от изменения частоты вращения транспортирующего рабочего органа (ТРО) проводили в 3-х кратной повторности. При каждом эксперименте измеряли массу семян, прошедших за фиксированный временной промежуток через сушильную камеру. Частоту вращения транспортирующего рабочего органа сушилки изменяли в диапазоне от 0,5 с<sup>-1</sup> до 1,83 с<sup>-1</sup>. При обосновании данного частотного интервала руководствовались следующими выкладками. При частоте вращения менее 0,5 с<sup>-1</sup> пропускная способность разработанного средства механизации меньше 18 кг/ч, что делает эксплуатацию сушилки экономически неэффективной. Увеличение же частоты вращения ТРО более 1,83 с<sup>-1</sup> приводит к существенной

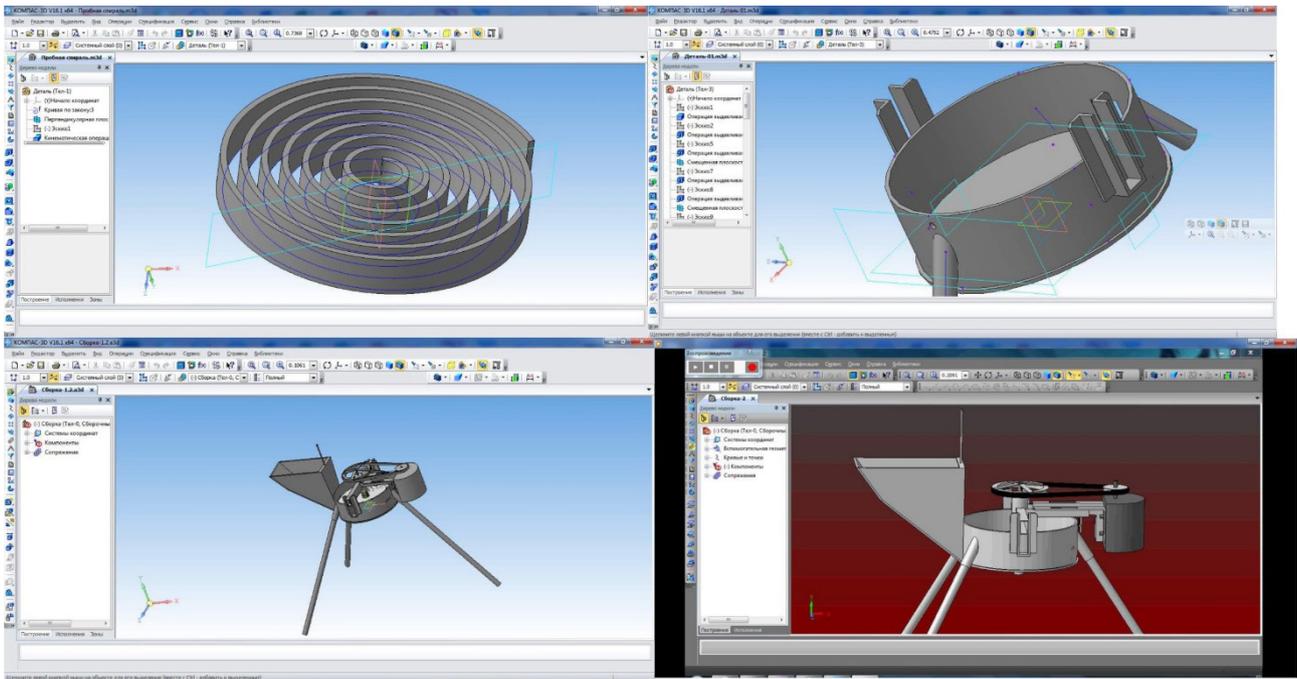


Рис. 2 – Этапы оптимизационного физического моделирования контактной сушилки

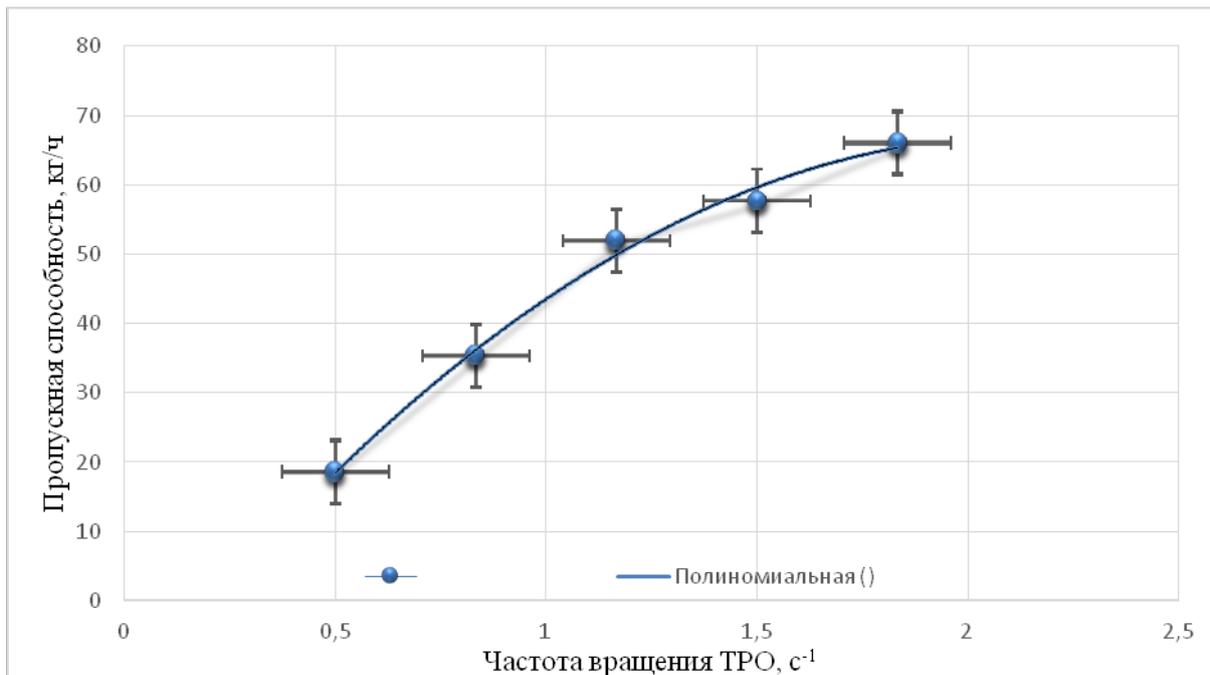


Рис. 3 – Зависимость пропускной способности контактной сушилки от частоты вращения ТРО

(более 30 %) травмируемости обрабатываемых семян. Кроме того, энергетическая модель процесса сушки при работе на таком режиме не позволяет обеспечить оптимальные затраты энергии на процесс испарения влаги из зерна. Полученные результаты поисковых экспериментов по обоснованию зависимости пропускной способности сушилки при использовании семян рыжика от частоты вращения ТРО изображены на рисунке 3.

При выборе вида аппроксимирующей

функции с использованием графической визуализации зависимости пропускной способности разработанной контактной сушилки от частоты вращения ТРО предпочтение отдавали функции с максимальным значением коэффициента детерминации  $R^2$  (табл. 2).

Как видно из полученных данных, максимальное приближение к исследуемому процессу наблюдается при использовании полиномиальной зависимости. Это объясняется тем, что при увеличении частоты вращения ТРО коэф-

Таблица 2

К определению вида аппроксимирующей функции

Вид зависимости	Характеристическое уравнение	R <sup>2</sup>
Линейная	$y = 35,164x + 4,876$	0,9548
Полиномиальная	$y = -17,983x^2 + 77,124x - 15,604$	0,9936
Логарифмическая	$y = 36,842\ln(x) + 42,762$	0,9927
Степенная	$y = 39,601x^{0,9827}$	0,9688
Экспоненциальная	$y = 14,523e^{0,9088x}$	0,8746

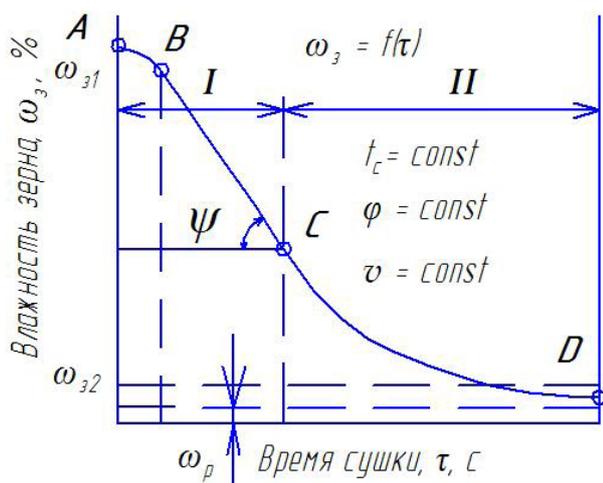


Рис. 4 – Кривая скорости сушки мелкосеменных культур:

$\omega_z$  – влажность семян, %; (индексы 1 и 2 – соответственно параметры семян до и после сушки);  $t_c$ ,  $\phi$ ,  $v$  – соответственно температура, относительная влажность и скорость движения воздуха в сушильной установке, °C; %; м/с

коэффициент отставания скорости семян от скорости ТРО возрастает нелинейно.

Важным фактором, оказывающим влияние на процесс удаления влаги из семян, является также температурный режим в сушилке. Важной особенностью сушки мелкосеменных культур является то, что стадия прогрева настолько кратковременна, что её на кривой сушки практически не обнаруживают (рис. 4).

В первом периоде сушки с прогревом семян интенсивность удаления влаги из них возрастает, характеризуясь линейной зависимостью (линия BC). Данный процесс продолжается при снижении влажности семян до определённого значения (первая критическая влажность, точка C). Далее интенсивность испарения влаги затормаживается – начинается второй период сушки (линия CD). После достижения равновесной влажности процесс испарения влаги из семян останавливается.

При этом физическую сущность контактного подвода теплоты к обрабатываемым семенам в разработанной сушилке можно представить в виде следующей зависимости:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2},$$

где  $\theta = [t_{(z,\tau)} - t_{II}]$  – разность между переменной температурой семян  $t_{(z,\tau)}$  и температурой греющей поверхности  $t_{II}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Или, решив предыдущее выражение [11-13], получим:

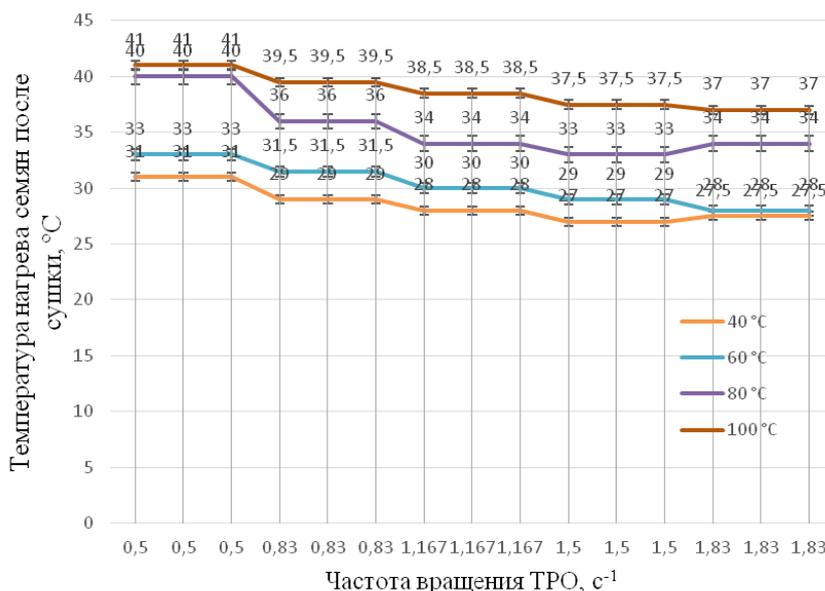


Рис. 5 – Зависимость температуры нагрева семян рыжика от частоты вращения ТРО при различной температуре греющей поверхности

$$\frac{d\theta(z,t)}{dz} = \frac{a_T}{\lambda} (t_n - t_0) \exp\left[\frac{a_T}{\lambda} \left(z + \frac{a_T}{\lambda}\right)\right] \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_T t}} + \frac{a_T}{\lambda} \sqrt{a_T t}\right)\right],$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $z$  – толщина высушиваемого слоя семян, м.

В процессе поисковых исследований нами было экспериментально определено влияние частоты вращения ТРО на температуру нагрева семян рыжика. Исследования проводили при переменной температуре греющей поверхности сушилки (рис. 5), которую изменяли в диапазоне от 40 °С до 100 °С. Все исследования также проводили в 3-х кратной повторности.

### Обсуждение

Как видно из полученного графика, во всём выбранном нами экспериментальном диапазоне изменения теплового режима не наблюдается достижения у обрабатываемых семян критической температуры нагрева (> 40 °С), то есть сушка семян в разработанном средстве механизации не приведёт к снижению их посевных свойств [14-18].

Проведённые исследования по оптимизации влияния основных режимных параметров на разовый влагосъём, и, как следствие, на суммарные энергозатраты выявили эффективность разработанного устройства. Так, на оптимальных режимах работы, при температуре греющей поверхности 75 °С, частоте вращения транспортирующего рабочего органа 1,45 с<sup>-1</sup> и суммарных удельных затратах энергии на процесс испарения влаги из семян рыжика 4,5 МДж/кг достигается разовый влагосъём 2,6...3,1 %, что подтверждает высокую эффективность работы созданного устройства и правильность выбранной области проводимых исследований.

### Заключение

Таким образом, при разработке и проведении экспериментальных исследований сушилки семян контактного типа важно учитывать все значимые факторы. В данном исследовании варьируемыми и контролируруемыми факторами процесса сушки стали температура греющей поверхности и частота вращения ТРО (скорость движения семян). Методически правильно проведённые поисковые исследования позволили сузить область проводимых экспериментов и при минимально необходимом количестве опытов получить адекватные и достоверные результаты основного эксперимента. Оптимизация температуры греющей поверхности и частоты вращения ТРО при сушке семян рыжика позволила обеспечить суммарные удельных затраты

энергии на испарения влаги 4,40...4,55 МДж/кг при разовом влагосъёме 2,6...3,1 %,

### Библиографический список

1. Курдюмов, В.И. Теоретические аспекты распределения теплоты в установке контактного типа при сушке зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Инновации в сельском хозяйстве. - 2015. – № 2 (12). - С.159-161.
2. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. - 2011. – № 6. - С. 56-58.
3. Пат. 2465527 Российская Федерация, МПК F26B 17/04. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; патентообладатель - ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. – Заявка № 2011119459; заявл. 13.05.11; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30. (5 стр.).
4. Пат. 2436630 Российская Федерация, МПК B02B 1/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; патентообладатель - ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. – Заявка № 2010122224; заявл. 31.05.10; опубл. 20.12.11, Бюл. № 35. (5 стр.).
5. Pabis, Stanisław. Grain drying: theory and practice / Stanisław Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. New York: John Wiley, 2018. Description: xii, 303 p.: ISBN: 0471573876.
6. Николаев, В. А. Очистка зерна от примесей и его предварительная сушка: монография / В.А. Николаев. - Ярославль: Ярославская ГСХА, 2017. - 212 с. - ISBN 978-5-98914-180-7.
7. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // AIChE Journal. – 2011. – 47, pp. 1052-1059.
8. Мойзес, Б. Б. Статистические методы контроля качества и обработка экспериментальных данных / Б.Б. Мойзес, И.В. Плотникова, Л.А. Редько. - Томск: ТПУ, 2016. - 119 с. - ISBN 978-5-4387-0700-4.
9. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1976. – 279 с.
10. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В. Р. Алёшкин, П. М. Роцин. - Л.: Колос. Ленингр. отделение, 1980. – 168 с.
11. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
12. Yadollahinia, A.R. Design and fabrication

of experimental dryer for studying agricultural products / A.R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // *Int. J. Agri. Biol.* - 2010. - 10, pp. 61-65.

13. Kwanchai, C. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials / C. Kwanchai, D. Sakamon, S Somchart // *Drying Technology.* – 2010. – 28:1, pp. 20-29.

14. Converse, H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin / H.H. Converse// *Amer. Soc. Agr. Engrs.*, 2016. - № 855.- pp. 254-256.

15. Технология послеуборочной обработки, хранения и предреализационной подготовки продукции растениеводства: / В.И. Манжесов, И.А. Попов, И.В. Максимов [и др.]; под общей редакцией В.И. Манжесова. - 4-е изд., стер. - Санкт-

Петербург: Лань, 2020. - 624 с. - ISBN 978-5-8114-5282-8.

16. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна / Н.И. Малин. - М.: Колос, 2004. – 240 с.

17. Пахомов, В.И. Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-энергией. / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, – 2000. - № 9. – С. 8-11.

18. Савченко, С.В. Развитие научных основ и практических методов повышения эффективности технологии зерносушения: 05.18.01 технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодово-овощной продукции и виноградарства: диссертация доктора технических наук / Савченко Светлана Вениаминовна - Москва, 2009. – 387 с.

## THE IMPORTANCE OF RESEARCH EXPERIMENT WHEN DEVELOPING A CONTACT GRAIN DRYER

**Ageev P.S., Sutyagin S.A., Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A.  
FSBEI HE Ulyanovsk SAU**

**432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1; tel.: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.**

*Key words: research studies, contact heat exchange, parameters, energy consumption, seeds, moisture removal, conveying working body.*

When conducting experimental studies, it is necessary to carry out a number of experiments sufficient for obtaining an adequate process improvement model. The process of grain heat treatment in a contact type grain dryer is influenced by a large number of different factors. The study of the total influence of a large number of factors, combined in arbitrary correlation, often leads to unclear patterns and erroneous conclusions. In this regard, all factors that influence the process of grain heat treatment in the developed installation were ranked into the main ones, which have the greatest influence on process development, carrying the greatest information, and additional ones, which are of secondary importance. Applying the method of a priori information formalization, as well as taking into account the requirements for factors (controllability, homogeneity and lack of correlation between them), we identified those of them that have the greatest impact on the process of grain heat treatment in the developed installation: the temperature of the heating surface and the rotation frequency of the conveying working body. Based on the study of previously performed studies on grain heat treatment, research experiments, and also, based on the design features of the developed installation, the factor variation ranges were identified. When conducting the main experiment, we chose the total specific energy consumption for evaporation process of 1 kg of moisture from seeds  $q$ , kJ / kg as a criterion for improvement. This parameter combined the process energy parameters, as well as heat, mass transfer, as it depends on the amount of energy consumed and moisture removal. Methodologically correct research experiment allowed us to narrow the field of experiments and, with the minimum required number of experiments, to obtain adequate and reliable results of the main experiment. Improvement of the heating surface temperature and CVB rotation frequency during drying of camelina seeds made it possible to provide the total specific energy consumption for moisture evaporation of 4.40 ... 4.55 MJ / kg with a one-time moisture removal of 2.6 ... 3.1 %.

### Bibliography

1. Kurdyumov, V.I. Theoretical aspects of heat distribution in a contact-type installation during grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin // *Innovations in agriculture.* - 2015. - №. 2 (12). - P.159-161.
2. Efficiency improvement of post-harvest grain treatment / V.I. Kurdyumov, G.V. Karpenko, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin // *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences.* - 2011. - №. 6. -P. 56-58.
3. Pat. 2465527 Russian Federation, IPC F26B 17/04. A device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin; patent holder – FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - Application №. 2011119459; appl. 13.05.11; publ. 27.10.12, Bul. №. 30. (5 pages).
4. Pat. 2436630 Russian Federation, IPC B02B 1/00. A device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin; patentee - patent holder – FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - Application №. 2010122224; appl. 31.05.10; publ. 20.12.11, Bul. №. 35. (5 pages).
5. Pabis, Stanisław. Grain drying: theory and practice / Stanisław Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. New York: John Wiley, 2018. Description: xii, 303 p.: ISBN: 0471573876.
6. Nikolaev, V. A. Purification of grain from impurities and its preliminary drying: monograph / V.A. Nikolaev. - Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy, 2017. -- 212 p. - ISBN 978-5-98914-180-7.
7. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // *AIChE Journal.* – 2011. – 47, P. 1052-1059.
8. Moises, B.B. Statistical methods of quality control and processing of experimental data / B.B. Moises, I.V. Plotnikova, L.A. Redko. - Tomsk: TPU, 2016. -- 119 p. - ISBN 978-5-4387-0700-4.
9. Adler, Yu.P. Planning an experiment in the search for suitable conditions / Yu.P. Adler, E.V. Markova, Yu.V. Granovsky - Moscow: Nauka, 1976. -- 279 p.
10. Melnikov, S.V. Planning an experiment in studies of agricultural processes / S.V. Melnikov, V.R. Alyoshkin, P.M. Roshchin. - L.: Kolos. Leningrad department, 1980. -- 168 p.
11. Lykov, A.V. Theory of thermal conductivity / A.V. Lykov. - M.: Vysshaya shkola, 1967. -- 599 p.
12. Yadollahinia, A.R. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products / A.R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // *Int. J. Agri. Biol.* - 2010. - 10, P. 61-65.
13. Kwanchai, C. Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate materials / C. Kwanchai, D. Sakamon, S Somchart // *Drying Technology.* – 2010. – 28:1, P. 20-29.
14. Converse, H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin / H.H. Converse// *Amer. Soc. Agr. Engrs.*, 2016. - № 855.- P. 254-256.
15. Technology of post-harvest processing, storage and pre-off take preparation of crop products: / V.I. Manzhesov, I.A. Popov, I.V. Maximov [and others]; edited by V.I. Manzhesov. - 4th ed., stereot. - St. Petersburg: Lan, 2020. - 624 p. - ISBN 978-5-8114-5282-8.
16. Malin, N.I. Energy-saving grain drying / N.I. Malin. - M.: Kolos, 2004. -- 240 p.
17. Pakhomov, V.I. Improvement of heat treatment of feed grain with microwave energy. / V.I. Pakhomov, V.D. Kaun // *Mechanization and Electrification of Agriculture*, - 2000. - № 9. - P. 8-11.
18. Savchenko, S.V. Development of scientific foundations and practical methods for increasing the efficiency of grain drying technology: 05.18.01 technology of treatment, storage and processing of cereals, legumes, cereal products, fruits and vegetables and viticulture: dissertation of Doctor of Technical Sciences / Savchevko Svetlana Veniaminovna - Moscow, 2009. - 387 p.