

## **ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В УСТАНОВКЕ КОНТАКТНОГО ТИПА ПРИ СУШКЕ МЕЛКОСЕМЕННЫХ КУЛЬТУР**

**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:** экспериментальные исследования, контактный теплообмен, режимные параметры, градиент температуры, семена, влагосъем, транспортирующий рабочий орган.

При создании современных эффективных сложных технических систем, реализующих с требуемым качеством и на высоком энергетическом уровне процессы теплового воздействия на сыпучие сельскохозяйственные материалы важно знать условия теплопереноса и влагопереноса. В данном исследовании целевой функцией стало научное обоснование основных теплофизических параметров изучаемого процесса теплового воздействия на высушиваемый продукт в целом, а также выявление влияния создаваемого температурного режима сушильной установки на температурный градиент при нагреве обрабатываемых семян, и в конечном счёте на эффективность всего процесса. При контактной сушке мелкосеменных культур осуществляются как внешние тепловые и влагообменные процессы - от поверхности обрабатываемых семян к внешней среде, так и внутренние - миграция теплоты и влаги внутри семян. Основным количественным фактором, наиболее полно описывающим механизм переноса влаги, служит критерий Био ( $Bi_m$ ). Этот критерий устанавливает связь между такими параметрами процесса контактной сушки, как интенсивность влагообмена на поверхности обрабатываемого зерна и его теплопроводность. Для влаги, содержащейся в обрабатываемом зерне, при рассмотрении последнего как коллоидного тела описание процесса влагообмена сводится к решению внутренней задачи. В этом случае удаление влаги с преобразованием её в пар напрямую зависит от энергозатрат на процесс тепловой обработки. Движущей силой данного процесса является возникающий при тепловом воздействии градиент температур. Исследованиями установлено, что кинетическим коэффициентом, в наиболее полной степени описывающим данное явление, служит коэффициент теплопроводности или термоградиентный коэффициент  $\delta$ . Данный показатель характеризует изменение влагосодержания в обрабатываемом зерне при температурном градиенте, равном одному градусу Цельсия. С целью подтверждения приведенных теоретических зависимостей были проведены экспериментальные исследования по выявлению особенностей контактного теплового воздействия на различные мелкосеменные культуры. По итогам проведённых исследований выявлено, что на температурный режим при сушке зерна в разработанной зерносушилке контактного типа наибольшее влияние оказывают следующие режимные параметры: температура греющей поверхности и частота вращения транспортирующего рабочего органа. В данном исследовании частоту вращения транспортирующего рабочего органа изменяли от 30 мин<sup>-1</sup> до 110 мин<sup>-1</sup>, а температуру греющей поверхности - в пределах от 40 °С до 100 °С. Выявлено, что

*градиент температуры нагрева зерна в разработанной установке для сушки зерна на оптимальных режимах сушки составляет 9...12 °С и несущественно зависит от вида обрабатываемых семян. При оптимизации режимных параметров процесса сушки семян одной культуры можно без потери качества эксплуатировать разработанную зерносушилку при тепловой обработке мелких семян других культур.*

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

### **Введение**

При создании современных эффективных сложных технических систем, реализующих с требуемым качеством и на высоком энергетическом уровне процессы теплового воздействия на сыпучие сельскохозяйственные материалы важно знать условия теплопереноса и влагопереноса [1, 2]. Определяющее значение при этом имеет температурный режим, создаваемый при эксплуатации зерносушилки. В конечном итоге именно от градиента температуры при нагреве зерна зависит правильность обоснования оптимальных режимных параметров процесса контактной сушки.

Таким образом, исследования, направленные на выявление влияния режимных параметров процесса контактной сушки зерна на температурный режим, являются актуальными и важными.

### **Материалы и методы исследований**

Многие исследователи отмечают сложность адекватной интерпретации процессов, протекающих при контактном нагреве зерна мелкосеменных культур [3, 4]. Это обусловило актуальность применения частных упрощенных способов моделирования. Несмотря на используемые ограничения, применяемые упрощенные модели позволяют с заданной степенью достоверности получить экспериментальные данные, анализ которых дает возможность наглядно описать исследуемый процесс и получить зависимости для прогнозирования работы исследуемой системы в целом [5].

В данной работе целевой функцией проводимых нами исследований стало научное обоснование основных теплофизических параметров изучаемого процесса теплового воздействия на высушиваемый продукт в целом, так и выявление влияния создаваемого температурного режима сушильной установки на температурный градиент при нагреве обрабатываемых семян, и в конечном счёте, на эффективность всего процесса.

При контактной сушке мелкосеменных культур осуществляются как внешние тепловые и влагообменные процессы - от поверхности

обрабатываемых семян к внешней среде, так и внутренние - миграция теплоты и влаги внутри семян.

Следует отметить, что физическая природа внешнего тепло- влагообмена обусловлена перепадом парциального давления у поверхности обрабатываемых семян и внешней среды. Внутреннее движение влаги в обрабатываемых семенах зависит от вида обрабатываемой культуры и исходных свойств семян. При этом исследованиями установлен противоточный характер движения потоков влаги и теплоты в обрабатываемых семенах [6]. При интерпретации данного явления учёные часто склоняются к поиску аналогий исследуемого процесса контактной сушки семян с характерными параметрами процессов тепло- влагопереноса в коллоидных телах [7...11]. Подобный приём даёт возможность охарактеризовать протекающие тепловые процессы при контактной сушке мелкосеменных культур, а также получить достаточно достоверно и адекватно описать полученные данные посредством методов физического и математического моделирования.

### **Результаты исследований**

Проведённые исследования дали возможность использовать выявленные условия протекания тепло- влагообменных процессов в коллоидных телах для описания подобных явлений, протекающих при контактной сушке мелкосеменных культур.

Так, основным количественным фактором, наиболее полно описывающим механизм переноса влаги, служит критерий Био ( $Bi_m$ ). Этот критерий устанавливает связь между такими параметрами процесса контактной сушки, как интенсивность влагообмена на поверхности обрабатываемого зерна и его теплопроводность:

$$Bi_m = \frac{\beta R}{a_m}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент влагообмена, м/с;  $R$  – половина толщины обрабатываемого зерна, м;  $a_m$  – коэффициент потенциалопроводности обрабатываемого зерна м<sup>2</sup>/с.

Для случая, если  $Bi_m > 50$  реализуемая за-

дача является внутренней. Если  $Bi_m < 0,2$ , то необходимо решать внешнюю задачу. Для неравенства  $0,2 < Bi_m < 50$  решают так называемую смешанную задачу.

Для влаги, содержащейся в обрабатываемом зерне, при рассмотрении последнего как коллоидного тела описание процесса влагообмена сводится к решению внутренней задачи ( $Bi_m = 0,16$ ) [12]. В этом случае удаление влаги с преобразованием её в пар напрямую зависит от энергозатрат на процесс тепловой обработки. Движущей силой данного процесса является возникающий при тепловом воздействии градиент температур [13]. Исследованиями установлено, что кинетическим коэффициентом, в наиболее полной степени описывающим данное явление, служит коэффициент тепловлагопроводности или термоградиентный коэффициент  $\delta$ . Данный показатель характеризует изменение влагосодержания в обрабатываемом зерне при температурном градиенте, равном одному градусу.

Основываясь на изложенном выше, можно сделать заключение, что плотность потока влаги и изменение влагосодержания при воздействии тепловлагопроводности в процессе контактной сушки характеризуется зависимостями:

$$q_{mu} = -a_m \delta \rho_0 \nabla t_n, \quad (2)$$

$$\frac{dU}{d\tau} = a_m \delta \nabla^2 t_n, \quad (3)$$

где  $q_{mu}$  - плотность потока влаги в виде жидкости и пара в термодинамическом процессе, происходящем при постоянной температуре нагрева,  $кг/(м^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\rho_0$  - плотность абсолютно сухого тела,  $кг/м^3$ ;  $\nabla$  - дифференциальный оператор Лапласа,  $м^{-1}$ ;  $t_n$  - температура греющей поверхности,  $^\circ C$ ;  $\delta$  - коэффициент термовлагопроводности,  $кг\text{ влаги}/(кг\text{ сухого вещества} \cdot ^\circ C)$ ;  $U$  - влагосодержание зерна,  $кг/кг$ ;  $\tau$  - экспозиция контактной сушки,  $с$ .

При анализе зависимостей (2) и (3) становится очевидно, что тепловые характеристики процесса контактной сушки устанавливают характер его протекания. Кроме того, тепловые и массообменные процессы, протекающие при контактном нагреве зерна, являются взаимосвязанными. Процесс теплообмена в этом случае является определяющим. Всё это важно учитывать при теоретическом обосновании процесса теплового воздействия на обрабатываемое зерно в разрабатываемой контактной зерносушил-

ке. Требуется определить механизм протекания исследуемых процессов теплообмена и теплопередачи, благодаря чему тепловые характеристики разрабатываемого средства механизации будут обеспечивать выполнение технологических требований к исследуемому процессу.

Разработку средств механизации, реализующих на высоком энергетическом уровне процесс тепловой контактной сушки, в основном осуществляют по общепринятым методикам и схемам. Ограничительными условиями при этом являются обоснованные технологические требования к контактной зерносушилке, выполнение которых определяет характер биохимических и теплофизических процессов, протекающих в подвергнутом тепловой контактной сушке зерне.

Тепло- влагообменные процессы, протекающие при контактной сушке мелкосеменных культур, связаны с непосредственной передачей теплоты обрабатываемому зерну от греющей поверхности. Они должны надежно протекать в заданных границах, которые определяют особенности обрабатываемого зерна как живого организма. Ограничивающими факторами процесса контактной сушки являются максимальная температура нагрева зерна и максимальный разовый влагосъём.

При контактной сушке необходимо обеспечить транспортировку высушиваемого зерна слоем толщиной, не превышающей (или незначительно превышающей) максимальный размер зерновки обрабатываемой культуры. При этом зерно посредством теплопроводности получает определённое количество теплоты от греющей поверхности.

Характеристической чертой данного процесса является то, что изменения температуры нагрева обрабатываемого зерна  $t$  происходят как в пространстве, так и во времени:

$$t = f(x, y, z, \tau),$$

где  $x, y, z$  - пространственные координаты единичного зерна в декартовой системе координат,  $м$ ;  $t$  - экспозиция сушки,  $с$ .

Учитывая, что в разработанной контактной зерносушилке тепловому воздействию подвергается слой зерна, толщина которого близка к размерам единичного зерна, тогда примем, что температура обрабатываемого зерна изменяется только в одном направлении, например, в направлении  $z$ , в остальных направлениях она не изменяется ( $\frac{\partial t}{\partial x} = 0; \frac{\partial t}{\partial y} = 0$ ).

Таким образом, исследуемая задача является одномерной ( $t = f(z, \tau)$ ) и нам необходимо найти решение дифференциального уравнения теплопроводности для одномерного потока теплоты, передаваемой от греющей поверхности к обрабатываемому зерну:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (t > 0, 0 < z < \infty), \quad (4)$$

где  $a$  – температуропроводность зерна, подвергаемого контактной сушке,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Введем дополнительно начальные и граничные условия:

$$t(0, z) = t_0; \quad t(0, \tau) = t_n; \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial z} = 0.$$

Тогда зависимость (4) преобразуется в следующее выражение [13]:

$$\frac{t_n - t(z, \tau) - t_0}{t_n - t_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-\frac{z^2}{4a\tau}} \frac{dz}{2\sqrt{a\tau}}, \quad (5)$$

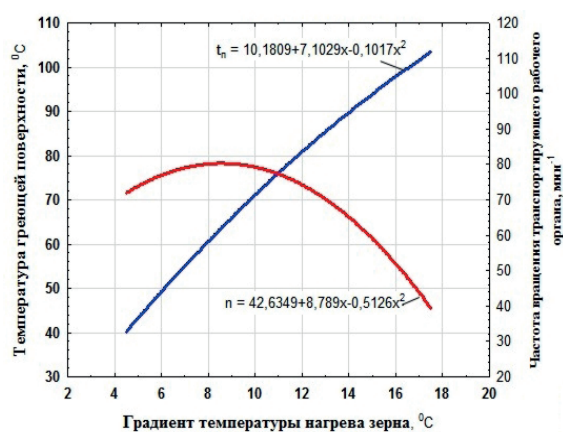
где  $t(z, \tau)$  – температура нагрева обрабатываемого зерна на расстоянии  $z$  от греющей поверхности через  $t, \text{с}$ , после начала процесса теплового воздействия,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_0$  – исходная температура зерна,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_n$  – температура греющей поверхности контактной зерносушилки,  $^\circ\text{C}$ ;

Заменяя в зависимости (5) бесконечное расстояние  $z$  на заданное значение толщины обрабатываемого зернового слоя  $d$  и зная исходную температуру зерна  $t_0$ , максимальную температуру нагрева зерна после теплового воздействия в контактной зерносушилке  $t(d, t)$ , температуропроводность  $a$  обрабатываемого зерна, а также время его обработки  $t$  в разработанном средстве механизации, мы можем выявить максимальную температуру греющей поверхности зерносушилки  $t_n$ .

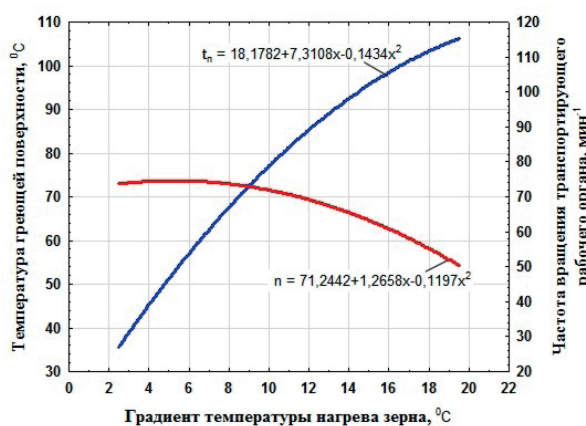
С целью подтверждения приведенных теоретических зависимостей нами были проведены экспериментальные исследования по выявлению особенностей контактного теплового воздействия на различные мелкосеменные культуры.

Опыты проводили при сушке зерна проса, рапса и рыжика на созданной и запатентованной нами контактной зерносушилке с транспортирующим рабочим органом, выполнением в виде однозаходной спирали Архимеда [14, 15].

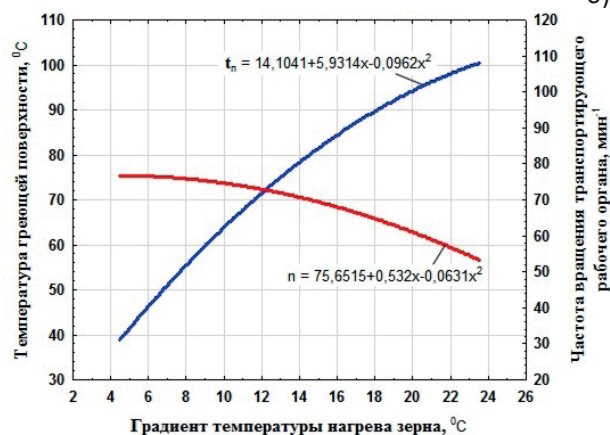
При проведении исследований основное внимание уделяли влиянию основных режимных параметров разработанного средства механизации на тепловой режим контактной сушки [16...18]. В процессе экспериментальных исследова-



а)



б)



в)

**Рис. – К обоснованию распределения градиента температуры в зависимости от режимных параметров:**

*а – просо; б – рапс; в – рыжик*

ований частоту вращения транспортирующего рабочего органа сушилки изменяли от  $30 \text{ мин}^{-1}$  до  $110 \text{ мин}^{-1}$ , а температуру греющей поверхности – в пределах от  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

После обработки полученных в результате проведённых экспериментов данных были определены зависимости, характеризующие влияние основных режимных параметров на



температуру нагрева зерна на выходе из контактной зерносушилки:

- просо

$$t_n = -167,0118 + 11,0707x - 0,1017x^2;$$

$$n = -323,6581 + 28,7796x - 0,5126x^2;$$

- рапс

$$t_n = -153,6765 + 12,3298x - 0,1434x^2;$$

$$n = 12,4258 + 5,4563x - 0,1197x^2;$$

- рыжик

$$t_n = -119,1665 + 9,2995x - 0,0962x^2;$$

$$n = 47,0161 + 2,7406x - 0,0631x^2,$$

где  $x$  – температура нагрева зерна на выходе из контактной зерносушилки, °C.

Графическая визуализация зависимости изменения температуры зерна в процессе контактного нагрева в разработанном средстве механизации (градиента температуры нагрева) от основных режимных параметров процесса сушки представлена на рисунке.

### Обсуждение

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования показали эффективность разработанной зерносушилки контактного типа при сушке мелкосеменных культур. Так, разовый влагосъём  $D_w$  на обоснованных оптимальных режимах не превышал 5,7 %, а температура нагрева зерна на выходе из зерносушилки  $x$  не превышала 38,4 °C (при заданных технологическими требованиями  $\Delta\omega_{\max} \leq 6$  % и  $x_{\max} \leq 40$  °C). Всё это обеспечивает сохранение биологической активности обрабатываемого зерна. Также установлена несущественность различий режимных параметров и их влияния на влаго- теплообменные процессы при сушке различных мелкосеменных культур. Это свидетельствует об универсальности разработанного средства механизации и его высокой эффективности.

### Заключение

Таким образом, на температурный режим при сушке зерна в разработанной зерносушилке контактного типа большое влияние оказывают следующие режимные параметры: температура греющей поверхности и частота вращения транспортирующего рабочего органа. После проведения экспериментальных исследований в границах частоты вращения транспортирующего рабочего органа в пределах 30...110 мин<sup>-1</sup>, а температуры греющей поверхности - 40...100 °C выявлено, что градиент температуры нагрева зерна в разработанной установке для сушки зерна на оптимальных режимах сушки составляет 9...12 °C и несущественно зависит от вида об-

рабатываемых семян. Следовательно, оптимизировав режимные параметры процесса сушки семян одной культуры, можно без потери качества эксплуатировать разработанную зерносушилку при тепловой обработке мелких семян других культур.

### Библиографический список

1. 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.
2. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // AIChE Journal. – 2011. – 47, pp. 1052-1059.
3. 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.
4. Converse, H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin / H.H. Converse // Amer. Soc. Agr. Engrs., 2016. - № 855.- pp. 254-256.
5. 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. - Санкт-Петербург: Лань, 2020. - 624 с. - ISBN 978-5-8114-5282-8.
6. 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.
7. 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.
8. 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, плодоовощной продукции и виноградарства: дисс... доктора технических наук / Савченко Светлана Вениаминовна - Москва, 2009. – 387 с.
9. 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.
10. 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.

11. 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.

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

13. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.

14. Пат. 2465527 Российская Федерация, МПК F26B 17/04. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сулягин; патентообладатель - ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. - Заявка № 2011119459; заявл. 13.05.11; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30. (5 стр.).

15. Пат. 2436630 Российская Федерация, МПК B02B 1/00. Устройство для сушки зерна /

В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сулягин; патентообладатель - ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. - Заявка № 2010122224; заявл. 31.05.10; опубл. 20.12.11, Бюл. № 35. (5 стр.).

16. 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.

17. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский - М.: Наука, 1976. - 279 с.

18. 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.

## FEATURES OF TEMPERATURE REGIME IN A CONTACT TYPE UNIT WHEN DRYING SMALL SEED CROPS

**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: experimental studies, contact heat exchange, operating parameters, temperature gradient, seeds, moisture removal, transporting working body.*

*When creating modern effective complex technical systems that realize the processes of thermal impact on bulk agricultural materials with the required quality and at a high energy level, it is important to know the conditions of heat and moisture transfer. The target function of our research was scientific substantiation of the main thermophysical parameters of the studied process of thermal effect on the drying product as a whole, as well as identification of the effect of the created temperature regime of the drying unit on the temperature gradient when heating the treated seeds, and, ultimately, on the efficiency of the entire process. In case of contact drying of small-seeded crops, both external heat and moisture exchange processes are carried out - from the surface of the treated seeds to the external environment, and internal - the migration of heat and moisture inside the seeds. The main quantitative factor that most fully describes the mechanism of moisture transfer is the Bio criterion ( $Bi_m$ ). This criterion establishes a relation between such parameters of the contact drying process as the intensity of moisture exchange on the surface of the processed grain and its moisture conductivity. The description of the process is reduced to solving an internal problem for the moisture contained in the processed grain, when considering the latter as a colloidal body,  $Bi_m = 0.16$ . In this case, the removal of moisture with its transformation into steam directly depends on the energy consumption for the heat treatment process. The driving force of this process is the temperature gradient arising from thermal action. Studies have established that the kinetic coefficient, which most fully describes this phenomenon, is the thermal and moisture conductivity coefficient or the thermal gradient coefficient  $\delta$ . This parameter characterizes the moisture content change in the processed grain at a temperature gradient equal to one degree Celsius. In order to confirm the above theoretical dependencies, experimental studies were carried out to identify the features of contact thermal effects on various small-seed crops. Based on the results of the studies, it was revealed that the following operating parameters have the greatest influence on temperature regime during grain drying in the developed contact type grain dryer: the temperature of the heating surface and the rotation frequency of the transporting working body. In this study, the rotation frequency of the transporting working body was changed from  $30 \text{ min}^{-1}$  to  $110 \text{ min}^{-1}$ , and the temperature of the heating surface - in the range from  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . It was revealed that the temperature gradient of grain heating in the developed installation for grain drying at appropriate drying modes is  $9 \dots 12 \text{ }^\circ\text{C}$  and does not significantly depend on the type of processed seeds. When improving the operating parameters of the drying process of seeds of one crop, it is possible to operate the developed grain dryer without loss of quality during heat treatment of small seeds of other crops.*

### *Bibliography:*

1. 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.
2. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // *AIChE Journal*. - 2011. - 47, P. 1052-1059.
3. 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.
4. Converse, H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin / H.H. Converse // *Amer. Soc. Agr. Engrs.*, 2016. - №. 855. - P. 254-256.
5. Technology of post-harvest processing, storage and pre-sales preparation of crop production / V.I. Manzhosov, I.A. Popov, I.V. Maximov [and others]; edited by V.I. Manzhosov. - St. Petersburg: Lan, 2020. - 624 p. - ISBN 978-5-8114-5282-8.
6. 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.
7. 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.
8. Savchenko, S.V. Development of scientific foundations and practical methods to improve the efficiency of grain drying technology: 05.18.01 technology of processing, storage and processing of grasses, legumes, cereals, fruits and vegetables and viticulture: dissertation of Doctor of Technical Sciences / Savchenko Svetlana Veniaminovna - Moscow, 2009. - 387 p.
9. Efficiency increase the of post-harvest grain processing / 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.
10. Pabis, Stanislaw. Grain drying: theory and practice / Stanislaw Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. New York: John Wiley, 2018. Description: xii, 303 p. : ISBN: 0471573876.

11. Nikolaev, V. A. Grain purification from impurities and its preliminary drying: monograph / V.A. Nikolaev. - Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy, 2017. - 212 p. - ISBN 978-5-98914-180-7.
12. Malin, N.I. Energy-saving grain drying / N.I. Malin. - M.: Kolos, 2004. - 240 p.
13. Lykov, A.V. Theory of thermal conductivity / A.V. Lykov. - M.: Higher school, 1967. - 599 p.
14. Pat. 2465527 Russian Federation, IPC F26B 17/04. A device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin; patentee – FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - Application No. 2011119459; app. 13.05.11; publ. 27.10.12, Bul. № 30. (5 pages).
15. Pat. 2436630 Russian Federation, IPC B02B 1/00. A device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin; patentee - FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - Application No. 2010122224; app. 31.05.10; publ. 20.12.11, Bul. № 35. (5 pages).
16. Moises, B.B. Statistical quality control methods and experimental data processing / B.B. Moises, I.V. Plotnikova, L.A. Redko. - Tomsk: TPU, 2016. - 119 p. - ISBN 978-5-4387-0700-4.
17. 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.
18. Melnikov, S.V. Planning an experiment in the study of agricultural processes / S.V. Melnikov, V.R. Alyoshkin, P.M. Roshchin. - L.: Kolos, Leningrad department, 1980. - 168 p.