

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.243

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-69-73

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУШИЛКИ С-40 ПРИ ДВУХСТАДИЙНОЙ СУШКЕ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ

ЗАГОРУЙКО МИХАИЛ ГЕННАДЬЕВИЧ , канд. техн. наук, старший научный сотрудник
zagorujko.misha2013@yandex.ru 

ПАВЛОВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
sapavlov777@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. В статье обоснованы безопасные режимы и методика расчёта двухстадийной технологии сушки с частичной рециркуляцией зерна, при которой зерно недосушивают в зерносушилке на 2...3% до кондиционной влажности, а горячее зерно охлаждают активным вентилированием наружным воздухом, досушивая при этом до кондиционной влажности. Безопасный режим двухстадийной сушки в С-40 предусматривает частичную рециркуляцию зерна с влажностью, близким к нормативному, и влажностью рециркулирующей смеси не более 18%. Рассчитанный из этого условия коэффициент рециркуляции используется для определения температуры рециркулирующей смеси зерна с учётом реверсивной составляющей в шахтной сушилке. Минимизация коэффициента рециркуляции позволяет выдержать допустимую неравномерность по сушке и минимальную трещиноватость. Расчёт процесса рециркуляционной сушки проведён по стандартной методике, но с уточнёнными значениями влажности и температуры смеси зерна. Проведены хозяйственные испытания сушилки С-40 по двухстадийной технологии на зерне кукурузы. Экспериментально установлено, что сушилка С-40 с коэффициентом рециркуляции, равным 2, и влажностью за цикл 4% при сушке зерна кукурузы с влажностью от 23,5 до 15,6%, при температуре агента сушки 95°C обеспечивает пропускную способность 10 т/ч (без охлаждения). Охлаждение осуществлялось на складе. Существенных изменений качества высушенного и охлажденного зерна не установлено: содержание крахмала и трещиноватости практически не изменилось, неравномерность высушенных семян не превысила исходные требования. Экспериментально установлена целесообразность перевода прямоточной сушилки С-40 на рециркуляционный способ.

Ключевые слова: сушка, зерно кукурузы, рециркуляция, двухстадийная технология, расчёты.

Формат цитирования: Загоруйко М.Г., Павлов С.А. Использование сушилки С-40 при двухстадийной сушке зерна кукурузы // Агроинженерия. 2021. № 3 (103). С. 69-73. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-69-73.

© Загоруйко М.Г., Павлов С.А., 2021



ORIGINAL PAPER

USE OF THE S-40 DRYER IN TWO-STAGE DRYING OF CORN GRAIN

MIKHAIL G. ZAGORUIKO , PhD (Eng), Senior Research Engineer
zagorujko.misha2013@yandex.ru 

SERGEY A. PAVLOV, PhD (Eng), Key Research Engineer
sapavlov777@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

Abstract. The paper provides rationale for safe modes and methods for calculating a two-stage drying technology with partial recirculation of grain, in which the grain is under-dried by 2...3% to the standard humidity in a grain dryer, and the hot grain is cooled by active ventilation with outside air, while drying it to the standard humidity. The safe mode of two-stage drying in S-40 provides for partial recirculation of grain with moisture removal close to the standard, and the moisture content of the recirculated mixture not exceeding 18%. The recirculation coefficient calculated based on this condition is used to determine the temperature of the recirculating grain mixture, taking into account the reversible component in the shaft dryer. The minimized recirculation

ratio provides for the permissible unevenness in drying and minimal fracturing. The recirculation drying process was analyzed according to the standard method, but with the adjusted values of moisture removal and temperature of the grain mixture. Economic tests of the S-40 dryer were carried out using a two-stage technology on corn grain. It has been experimentally established that the S-40 dryer with a recirculation coefficient of 2 and a moisture pick-up of 4% per cycle when drying corn grain with a moisture content of 23.5 to 15.6%, at a drying agent temperature of 95°C, provides a throughput of 10 t/h (without refrigeration). Cooling was carried out in the warehouse. No significant changes in the quality of dried and cooled grain have been established: the starch content and fracturing practically did not change; the unevenness of the dried seeds did not exceed the original requirements. The expediency of using the S-40 direct-flow dryer in the recirculation mode has been experimentally established.

Key words: drying, corn grain, recycling, two-stage technology, calculations.

For citation: Zagoruiko M.G., Pavlov S.A. Use of the S-40 dryer in two-stage drying of corn grain. *Agricultural Engineering*, 2021; 3 (103): 69-73 (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-69-73.

Введение. При двухстадийной сушке зерно, недосушенное в зерносушилке на 2...3% до кондиционной влажности, охлаждают на складе активным вентилированием наружным воздухом и досушкой до кондиции. Для повышения эффективности сушки зерна используют рециркуляционные сушилки. При рециркуляционном способе в потоке высушивают сравнительно небольшую часть зерна, а большая часть направляется на рециркуляцию, при которой зерно периодически отлеживается. Рециркуляцию, как правило, используют в сушилках системы заготовок для сушки партий зерна с различной исходной влажностью. Установлено, что исходя из условия снижения энергозатрат, сохранения технологических и семенных качеств влажность смеси в сушилке должна составлять не выше 18%¹.

Циклы нагрева, отлёжки, охлаждения многократно повторяют^{2,3} [1-4]. При такой сушке зерна теплота передается зерну конвективным путем и перераспределяется в результате кондуктивного теплообмена между сухим нагретым и влажным холодным зерном. Рециркуляционный способ сушки развивается в двух направлениях: разработка новых сушилок и перевод прямоточных сушилок на рециркуляцию⁴ [5-7].

Опыт эксплуатации рециркуляционных сушилок показал, что они имеют некоторые недостатки по сравнению с прямоточными сушилками: непроизводительную потерю теплоты в шахте промежуточного охлаждения, повышенную неравномерность и травматизм высушенного зерна.

При рециркуляции влажосъём за цикл составляет $\Delta W \leq 1,0...1,5\%$, а частота рециркуляции $n > 5...10$, что вызывает повышенную неравномерность сушки. Очевидно, что чем ниже величина n , тем меньшая часть зерна отвлекается на рециркуляцию и тем ниже неравномерность высушенного зерна по влажности и травматизму. Следовательно, влажосъём за цикл целесообразно поддерживать нормативным.

При сушке семян и зерна в потоке влажосъём ограничен: $\Delta W = 4...6\%$. При необходимости большего влажосъёма делают отлёжку для сохранения семенных и продовольственных качеств, что исключает поточную сушку.

Рециркуляционная сушка в сельском хозяйстве находит ограниченное применение. Необходимо предложить способ, предусматривающий лишь частичную рециркуляцию, что меньше скажется на неравномерности сушки и травматизме зерна.

Цель исследований: разработка безопасных режимов сушки и методики расчёта процесса сушки с частичной рециркуляцией зерна.

Материал и методы. Способ сушки с частичной рециркуляцией зерна был проведен на зерносушилке С-40 в ООО «Рейнгольд» Орловской области. Зерно влажностью 23% высушивалось до конечной влажности 15,6% без охлаждения в сушилке, затем охлаждалось на складе при вентилировании наружным воздухом. Каждые 15 мин замерялись влажность и температура исходного и высушенного зерна, температура и влажность свежего и отходящего агента сушки. Каждые 30 мин замерялись расходы влажного зерна, смеси и природного газа. Для определения указанных параметров использовался измерительный комплекс «Терем-4». Из высушенного зерна отбирались навески на неравномерность сушки и трещиноватость.

Работа сушилки осуществлялась следующим образом (рис.). Влажное зерно 14 загружалось первым потоком нории 9 в сушилку, заполняя охлаждающую 3, сушильную 2 камеры и надсушильный бункер 1; запускался вентилятор 10, разжигалась топка 4 и высушивалась первая партия зерна посредством циркуляции через камеры сушилки и норию 9. Затем сушилка переводилась на рециркуляцию, подавалось влажное 14 зерно и выводилось высушенное 15. Агент сушки (подогретый воздух) готовился в топке 4, нагнетался в сушильную и охлаждающую камеры. Расходы влажного зерна и смеси устанавливались посредством привода 5 и задвижкой 7. Процесс контролировался влагомерами 11 и 12, поддерживая влагосодержание высушенного зерна неизменным. Отсечение рециркулирующего зерна производилось задвижкой 7 путем сброса зерна в норию 8.

Результаты и обсуждение. Расчёт параметров процесса и сушилки при частичной рециркуляции зерна по двухстадийной технологии проводился в такой последовательности. Уточнялся влажосъём за проход, определялись коэффициент рециркуляции n , расчётная и фактическая температура смеси зерна. Затем определялись длительность сушки, расходы нагрева влажного и рециркулирующего зерна.

¹ Малин Н.И. Технология хранения зерна. М.: Колос, 2005. 280 с.

² Анатазович В.И. Сушка пищевых продуктов: Справочное пособие. М.: ДеЛи, 2000. С. 15-17.

³ Комышняк Л.Д., Журавлев А.П., Реверс Н.Г. Эксплуатация рециркуляционных сушилок. М.: Агропромиздат, 1986. 232 с.

⁴ Шаршунов В.А., Рукшан Л.В. Сушка и хранение зерна. Минск: Мисанта, 2010. 111 с.

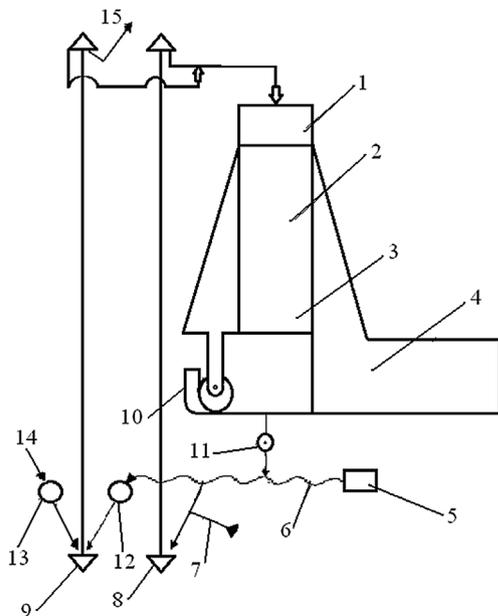


Рис. Схема сушилки С-40:

1 – бункер; 2 – сушильная камера; 3 – охлаждающая камера;
4 – топка; 5 – привод; 6 – приводной вал; 7 – задвижка;
8, 9 – нория; 10 – вентилятор; 11, 12, 13 – влагомер;
14 – влажное зерно; 15 – высушенное зерно

Fig. Diagram of the S-40 dryer:

1 – hopper; 2 – drying chamber; 3 – cooling chamber;
4 – top; 5 – drive; 6 – drive shaft; 7 – gate valve; 8, 9 – noria;
10 – fan-torus; 11, 12, 13 – moisture meter; 14 – wet grain;
15 – dried grain

Коэффициент рециркуляции n можно рассчитать по формуле [2]:

$$n = \frac{W_1 - W_p}{\Delta W}, \quad (1)$$

где W_1 , W_p – влажность исходного и рециркулирующего зерна, %; ΔW – влагосъём за цикл, %.

В случае двухстадийной сушки, когда из зерносушилки выходит нагретое до конечной температуры зерно, а охлаждение осуществляют вне её, $W_p = W_k$ (где W_k – конечная влажность зерна, %), выражение (1) можно записать как

$$n = \frac{W_1 - W_k}{\Delta W}. \quad (2)$$

Влажность смеси зерна в сушилке определяется следующим выражением:

$$W_{см} = \frac{W_1 + n \cdot W_k}{n + 1}. \quad (3)$$

Температуру смеси зерна $\theta_{см}$ можно определить из уравнения:

$$\theta_{см} = \frac{\theta_1 + n \cdot \theta_k}{n + 1}, \quad (4)$$

где θ_1 , θ_k – начальная и конечная температура зерна, °C.

Сушилка С-40 является шахтной с коробами, в ней реверсивный фактор сушки: зерно попеременно подвергается воздействию свежего и отработавшего агентов

сушки, то есть его фактическая температура $\theta_{ф}$ будет на величину $\Delta\theta$ ниже [8]:

$$\theta_{ф} = \theta_{см} - \Delta\theta. \quad (5)$$

Учёт реверсивного фактора позволит интенсифицировать процесс и уточнить методику расчёта длительности сушки.

Для расчёта длительности сушки в слое зернистых материалов широкое применение нашла формула А.В. Лыкова⁵:

$$\tau = \frac{\Delta U \cdot r \cdot H}{\alpha \cdot f \cdot (t - \theta_{ср}) \cdot \eta \cdot h_i}, \quad (6)$$

где ΔU – влагосъём, кг вл/кг сух. мат.; $\Delta U = U_1 - U_2$; U_1 , U_2 – влагосодержание влажного и высушенного зерна, кг вл/кг сух. мат.; r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг; H – высота слоя зерна и пограничного слоя $h_i = (2 \dots 3d_s)$, где d_s – эквивалентный диаметр зерновки, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°C; f – удельная поверхность частиц материала, м²/кг; t – температура агента сушки, °C; $\theta_{ср}$ – средняя температура материала, °C; η – доля теплоты на испарение влаги.

Величину η рассчитывают по выражению:

$$\eta = \frac{\Delta U \cdot r}{\Delta U \cdot r + (\theta_{ф} - \theta_1) c}, \quad (7)$$

где c – теплоёмкость зерна, кДж/кг·°C.

Для нашего случая выражение (6) можно записать в виде:

$$\tau_c = \frac{(U_1 - U_k) r \cdot H}{\alpha \cdot f \cdot (t - \theta_{ф}) \cdot \eta \cdot h_i}, \quad (8)$$

где U_1 , U_k – влагосодержание исходного и конечного зерна, кг вл/кг сух. мат.

Пропускная способность сушилки по влажному зерну определится из выражения:

$$\Pi = \frac{G_c}{\tau_c}, \quad (9)$$

где G_c – вместимость сушильной камеры, т.

Пропускная способность по смеси, т:

$$\Pi_c = \Pi \cdot n, \quad (10)$$

где n – коэффициент рециркуляции.

При высушивании зерна влагосъём за проход выбирался близким к нормативному при поточной сушке, но при этом влажность смеси $W_{см} \leq 18\%$. По рассчитанной величине коэффициента рециркуляции определялась температура смеси (рециркулирующего зерна) $\theta_{см}$ и уточнялась её фактическая величина $\theta_{ф} = \theta_{см} - \Delta\theta$, где $\Delta\theta = 1,5 \dots 2,0$ °C.

В формулу А.В. Лыкова для расчёта длительности сушки подставлялся фактический влагосъём $\Delta U_0 = U_1 - U_2$, где U_1 , U_2 – влагосодержание исходного и высушенного зерна, а средняя температура зерна принималась равной $\theta_{ф}$.

Значения параметров α , f , входящих в формулу А.В. Лыкова, вычислялись по скоростному режиму продувки и физико-механическим свойствам зерна, величина η рассчитывалась по влагосъёму и нагреву зерна за процесс сушки.

Основные показатели работы сушилки приведены в таблице.

⁵ Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1969. 472 с.

Таблица

Основные показатели сушки зерна кукурузы

Table

Main indicators of corn grain drying

Показатель <i>Indicator</i>	Величина показателя / <i>Value of the indicator</i>	
	1-й фон / <i>1st background</i>	2-й фон / <i>2st background</i>
Производительность, т/ч / <i>Capacity, t/h</i>	21,1	18,3
Расход рециркулирующего зерна, т/ч <i>Recirculating grain consumption, t/h</i>	8,0	7,2
Коэффициент рециркуляции / <i>Recycling rate</i>	0,33	0,42
Расход газа, м ³ /ч / <i>Gas consumption, m³/h</i>	228	265
Расход агента сушки, тыс. м ³ /ч <i>Drying agent consumption, thousand m³/h</i>	80	82
Влажность зерна, % / <i>Grain moisture content, %:</i>		
– начального / <i>initial</i>	23,5	23,0
– высушенного / <i>dried</i>	15,6	14,0
– смеси / <i>mixtures</i>	21,5	20,4
Плановый коэффициент / <i>Estimated ratio</i>	1,15	1,31
Нормативный влагосъём, % / <i>Standard water intake, %</i>	6	6
Температура агента сушки, °С <i>The temperature of drying agent, °C</i>	95	94
Температура зерна, °С / <i>Grain temperature, °C:</i>		
– до сушки / <i>before drying</i>	10	11
– после сушки / <i>after drying</i>	52	53
Неравномерность сушки, % / <i>Uneven drying, %</i>	+ 1,1 – 1,0	+ 1,2 – 0,8
Трещиноватость, % / <i>Fracturing, %:</i>		
– до сушки / <i>before drying</i>	7	10
– после сушки / <i>after drying</i>	9	12
Удельные затраты тепла, кДж/кг исп. влаги <i>Specific heat consumption, kJ/kg of the used water</i>	3560	3645

Установлено, что сушка с $n = 2$; $\Delta W = 4\%$ зерна кукурузы в С-40 с исходной влажностью 23,5% до конечной влажности 15,6% при температуре агента сушки $\sim 95^\circ\text{C}$ обеспечивает пропускную способность в 10 т/ч (без охлаждения, которое производилось на складе).

Существенные изменения качества высушенного и охлажденного зерна не установлены: содержание крахмала и трещиноватости практически не изменилось, неравномерность высушенных семян не превысила исходные требования.

Таким образом, при переводе прямоточной сушилки С-40 на рециркуляционный способ, при котором за проход реализуется допустимый влагосъём, технико-экономические показатели сушилки соответствуют показателям

лучших рециркуляционных сушилок. При этом нормативная трещиноватость не превышена.

Выводы

1. Безопасный режим двухстадийной сушки сушилки С-40 предусматривает частичную рециркуляцию зерна с влагосъёмом, близким к нормативному, но влажность рециркулирующей смеси не должна превышать 18%.

2. Минимизация коэффициента рециркуляции позволяет выдержать допустимую неравномерность по сушке и минимальную трещиноватость.

3. Расчёт процесса рециркуляционной сушки следует проводить по стандартной методике, но с уточненными значениями влагосъёма и температуры смеси зерна.

Библиографический список

1. Пермяков В.Н., Масалимов И.Ж., Ганеев И.Р. и др. Поточная технология сушки зерна кукурузы // Техника и оборудование для села. 2010. № 1. С. 16-17.
2. Сорочинский В.Ф. Сравнительная оценка технологий конвективной сушки зерна // Комбикорма. 1999. № 4. С. 18-20.
3. Shen L., Gao M., Zhu Y. et al. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021; 70: 102673. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102673.
4. Sousa T.L., Sousa K.A., Santos D.C. et al. Bioingredient produced with fermentation of corn bran and «Cerrado» cashew byproduct using *Rhizopus oligosporus* and forced-air oven drying: Mathematical modeling and evaluation of quality parameters. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2021; 26: 100262. DOI: 10.1016/j.bcdf.2021.100262.
5. Charmongkolpradit S., Somboon T., Phatchana R. et al. Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021; 25: 100886. DOI: 10.1016/j.csite.2021.100886.
6. Li B., Zeng Z., Zhang X. et al. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2021; 11 (6): 2772. DOI: 10.3390/app11062772.
7. Анатазевич В.И., Шульдинер Ю.Ф. Способы реконструкции шахтных зерносушилок с переводом их на сушку с рециркуляцией зерна // Экспресс-информация. Серия «Элеваторная промышленность». М.: ЦНИИ-ТЭИ Минзага СССР, 1988. Вып. 9. 16 с.
8. Елизаров В.П., Павлов С.А., Марин Р.А. и др. Сушка зерна с переменным теплоподводом в колонковой зерносушилке // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 12. С. 24-25.

Критерии авторства

Загоруйко М.Г., Павлов С.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Загоруйко М.Г., Павлов С.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.01.2021

Одобрена после рецензирования 29.04.2021

Принята к публикации 29.04.2021

References

1. Permyakov V.N., Masalimov I.Zh., Ganeev I.R. et al. Potochnaya tekhnologiya sushki zerna kukuruzy [Flow technology of drying corn grain]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2010; 1: 16-17. (In Rus.)
2. Sorochinsky V.F. Sravnitel'naya otsenka tekhnologiy konvektivnoy sushki zerna [Comparative evaluation of technologies for convective drying of grain]. *Kombikorma*, 1999; 4: 18-20. (In Rus.)
3. Shen L., Gao M., Zhu Y. et al. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021; 70: 102673. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102673.
4. Sousa T.L., Sousa K.A., Santos D.C. et al. Bioingredient produced with fermentation of corn bran and «Cerrado» cashew byproduct using *Rhizopus oligosporus* and forced-air oven drying: Mathematical modeling and evaluation of quality parameters. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2021; 26: 100262. DOI: 10.1016/j.bcdf.2021.100262.
5. Charmongkolpradit S., Somboon T., Phatchana R. et al. Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021; 25: 100886. DOI: 10.1016/j.csite.2021.100886.
6. Li B., Zeng Z., Zhang X. et al. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2021; 11 (6): 2772. DOI: 10.3390/app11062772.
7. Anatasevich V.I., Shuldiner Yu.F. Sposoby rekonstruktsii shakhtnykh zernosushilok s perevodom ikh na sushku s retsirkulyatsiyey zerna [Methods of reconstruction of mine grain dryers with their transfer to drying with grain recirculation]. *Ekspress-informatsiya. "Elevatornaya promyshlennost'" series*. Moscow: TSNITEI Ministry of Agriculture of the USSR, 1988; 9:16. (In Rus.)
8. Elizarov V.P., Pavlov S.A., Marine R.A. et al. Sushka zerna s peremennym teplopodvodom v kolonkovoy zernosushilke [Grain drying with variable heat supply in a column-type dryer]. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2015; 12: 24-25. (In Rus.)

Contribution

M.G. Zagoruiko, S.A. Pavlov performed theoretical studies, and based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. M.G. Zagoruiko, S.A. Pavlov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 12.01.2021

Approved after reviewing 29.04.2021

Accepted for publication 29.04.2021