

Научная статья  
УДК 631.365  
doi: 10.28983/asj.y2023i1pp144-149

### Исследования по охлаждению зерна кукурузы в насыпи

Михаил Геннадиевич Загоруйко<sup>1</sup>, Сергей Анатольевич Павлов<sup>1</sup>, Игорь Андреевич Башмаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия.

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Россия

e-mail: info@rgau-msha.ru

**Аннотация.** В сельском хозяйстве России и зарубежья широко применяют двухстадийную сушку, когда зерно недосушивают до кондиционной влажности на несколько процентов и оставляют на досушку атмосферным воздухом, тем самым экономя затраты теплоты. При использовании данного приема возникают вопросы по определению минимальной скорости воздуха в слое, по расчету длительности отлежки перед вентилированием и в процессе самого вентилирования. Для разной толщины слоя материала длительность отлежки имеет большой разброс – от 6 ч до 24 ч. Это обусловлено тем, что длительность, как правило, устанавливают эмпирическим путем по увеличенному или уменьшенному влагосъему за процесс. Длительность охлаждения рассчитывают из рекомендуемых нормативных удельных подач воздуха в насыпь и его расхода на тонну охлажденного зерна, что часто приводит к завышенной длительности охлаждения. Поэтому целью данной работы является: обоснование и расчет допустимой удельной подачи воздуха, а также длительности отлежки и охлаждения зерна. Минимальная удельная подача воздуха при охлаждении нагретого зерна зависит от толщины слоя, коэффициента испарения влаги и логарифма разности относительной влажности паров влаги на поверхности зерновки и воздуха. Минимальная длительность отлежки нагретого зерна обусловлена увлажнением его наружной поверхности и зависит от коэффициента диффузии влаги, радиуса зерновки, толщины оболочки и логарифма разности текущего и равновесного влагосодержания. Длительность охлаждения насыпи можно рассчитывать по зависимостям для сушки зерна при фактических значениях параметров воздуха и насыпи. Хозяйственные исследования показали допустимость применения полученных зависимостей для расчета основных параметров процесса без снижения качества зерна.

**Ключевые слова:** двухстадийная сушка; кукуруза; удельная подача воздуха; отлежка; влагосъем.

**Для цитирования:** Загоруйко М. Г., Павлов С. А., Башмаков И. А. Исследования по охлаждению зерна кукурузы в насыпи // Аграрный научный журнал. 2023. № 1. С. 144–149. <http://10.28983/asj.y2023i1pp144-149>.

### AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

### Research on the cooling of corn grain in the mound

Mikhail G. Zagoruyko<sup>1</sup>, Sergey A. Pavlov<sup>1</sup>, Igor A Bashmakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FGBNU Federal Agro-Engineering Center VIM, Moscow, Russia.

<sup>2</sup>Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

e-mail: info@rgau-msha.ru

**Abstract.** Two-stage drying is widely used in agriculture in Russia and abroad when grain is under-dried to condition humidity by several percent and left to dry by atmospheric air, thereby saving costs of heat. When using this method, there are questions about determining the minimum air velocity in the layer, the calculation of retention time before and during the ventilating process itself. For different thicknesses of the material layer, the retention time varies greatly - from 6 h to 24 h. This is due to the fact that the duration is usually set empirically by the increased or decreased moisture content during the process. Cooling duration is calculated from the recommended normative specific air supply to the bulk and its consumption per ton of cooled grain, which often leads to overestimated cooling duration. Therefore, the purpose of this work is to substantiate and calculate the permissible specific air supply, as well as the duration of tempering and cooling of grain. Minimum specific air supply during cooling of heated grain depends on the layer thickness, the coefficient of moisture evaporation and the logarithm of the difference between the relative humidity of moisture vapor on the surface of grain and air. The minimum duration of tempering of heated grain is caused by moistening its outer surface and depends on



the coefficient of moisture diffusion, the radius of the grain, the thickness of the shell and the logarithm of the difference between the current and equilibrium moisture content. The duration of cooling of the embankment can be calculated according to the dependencies for drying grain at the actual values of air and embankment parameters. Economic studies have shown the admissibility of using the obtained dependencies for calculating the main parameters of the process without reducing the quality of grain.

**Keywords:** two-stage drying; corn; specific air supply; ageing; moisture removal.

**For citation:** Zagoruyko M. G., Pavlov S. A., Bashmakov I. A. Model of artificial neural network in increasing the efficiency of harvesting potatoes by quality embedding of the planting material // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2023;(1):144–149. (In Russ.). <http://10.28983/asj.y2023i1pp144-149>.

**Введение.** Двухстадийная сушка, когда зерно недосушивают на 2...3 % до кондиционной влажности, но подсушивают до кондиционной при вентилировании наружным воздухом, широко распространена как за рубежом, так и в сельском хозяйстве России [1–4]. Преимущества этого способа по экономии затрат теплоты очевидны, так последние быстро возрастают при сьеме последних процентов при достижении кондиционной влажности зерна [5–7]. При использовании этого возникает ряд вопросов, в том числе по определению минимальной скорости воздуха в слое, расчету длительности отлежки перед вентилированием и продолжительности вентилирования [8].

Что касается минимальной скорости воздуха в слое, рекомендации ограничиваются зависимостями от влажности зерна и толщины вентилируемого слоя, но известные зависимости не связаны с относительной влажностью воздуха, тем более с совокупностью этих параметров.

Для разной толщины слоя материала длительность отлежки имеет большой разброс – от 6 до 24 ч [9, 10]. Это обусловлено тем, что длительность, как правило, устанавливают эмпирическим путем, по увеличенному или уменьшенному влагосъему за процесс.

Длительность охлаждения рассчитывают из рекомендуемых нормативных удельных подач воздуха в насыпь и его расхода на тонну охлажденного зерна, что часто приводит к завышению длительности охлаждения [11].

Цель статьи – обоснование и расчет допустимой удельной подачи воздуха, длительности отлежки и охлаждения зерна.

**Методика исследований.** При охлаждении нагретого зерна при малых удельных подачах воздуха возможно образование конденсата на свободной поверхности. Зерно при этом практически весь процесс имеет повышенные, существенно не отличающиеся от исходной, температуру и влажность, что приводит к размножению плесневых грибков, снижению качественных показателей. Для предупреждения образования корки и заплесневения рекомендуется периодически рыхлить слой, но это, как правило, редко приводит к положительным результатам. Однако эти негативные явления можно не допустить, если увеличить удельную подачу воздуха.

В соответствие с поставленной задачей составим материальный баланс испарения и переноса влаги при вентилировании зерновой насыпи.

Рассмотрим элементарный канал в насыпи, по которому фильтруется воздух. Будем полагать, что испарение влаги при сушке зерна происходит с поверхности воды, так как в результате отлежки зерно отпотекает с образованием жидкостной пленки на его оболочке, а длительность процесса охлаждения не приводит к обезвоживанию поверхности зерна [12].

При охлаждении зерна температуру и влагосодержание воздуха примем средними за период вентилирования. Массовый поток, кг/с, от поверхности зерна в канале к воздуху в результате испарения запишем [13]:

$$Q = \sigma(\varphi_0 - \varphi)dF, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент испарения, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\sigma = \frac{\alpha}{\lambda}$ ;  $\alpha, \lambda$  – коэффициенты теплоотдачи (Вт/м<sup>2</sup>·°С) и теплоемкости воздуха (кДж/кг·°С) соответственно;  $\varphi_0$  – среднее относительное влагосодержание паров влаги на поверхности зерна в канале;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха;  $dF$  – поверхность испарения, м<sup>2</sup>.

Этот поток равен изменению относительной влажности воздуха  $\varphi$  на элементе поверхности  $dF$  в единицу времени  $dt$ :



$$dQ = G d\varphi, \quad (2)$$

где  $G$  – расход воздуха, кг/с.

Из равенства правых частей выражений (1) и (2) находим:

$$\frac{\sigma}{G} dF = \frac{d\varphi}{\varphi_0 - \varphi}. \quad (3)$$

Интегрируя от 0 до  $F$  при  $\sigma = \text{const}$  получим:

$$G = \frac{\sigma F}{\ln \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{\varphi_0 - \varphi_2}}, \quad (4)$$

где;  $\varphi_1, \varphi_2$  – относительное влагосодержание воздуха на входе и выходе канала.

На продолжительность вентилирования насыпи и влагосъем зерна существенное влияние оказывает длительность отлежки, которая должна быть достаточна для перераспределения влаги в зерновке. Это позволяет быстро досушить зерно до кондиционной влажности [14].

На наружной поверхности зерновки имеется большое количество макропор радиусом более 80...120 нм, от которых во все стороны расходятся многочисленные микропоры. Как известно, площадь активной поверхности капилляров зерна составляет 180...280 м<sup>2</sup>/г, что, примерно, в 220 тыс. раз больше его наружной поверхности [15, 16]. В процессе отлежки влага из центра зерновки по капиллярам перемещается к поверхности и увлажняет ее, причем наибольшая часть капилляров находится в оболочке.

Допустим, что при высокотемпературной сушке произойдет обезвоживание поверхностной зоны (оболочки) зерновки до равновесной влажности  $W_p$ , а вся влага сосредоточится в центре зерновки с радиусом  $R$ .

В течение отлежки влага из центра зерновки перераспределяется в ее объеме, и влажность оболочки сравнивается и превышает влажность ядра (зерновка отпотевает).

Количество влаги, перемещенной из ядра зерновки в оболочку:

$$dM = \frac{a_m \rho (U - U_p)}{R - \delta}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}, \quad (5)$$

где  $a_m$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность сухого вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $U_p, U$  – равновесное и текущее влагосодержание, кг вл./кг сух. возд.;  $R$  – радиус зерновки, м;  $\delta$  – толщина оболочки зерна, м;  $\delta = R \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{5(W_n - W_p)}{3(W_n - W_{cp})}} \right]$ ;  $W_n, W_{cp}, W_p$  – начальная, средняя и равновесная влажность зерна соответственно, %;  $W_{cp} = \frac{W_k + W_p}{2}$ ;  $W_k$  – конечная влажность зерна, %.

Этот поток влаги можно представить в виде:

$$dM = \frac{G_{вл} dU}{d\tau F}, \text{кг/м}^2 \text{с}, \quad (6)$$

где  $G_{вл}$  – масса удаленной влаги, кг;  $d\tau$  – время отлежки зерна, ч;  $F$  – массообменная поверхность, м<sup>2</sup>;  $F = 4 \cdot \pi R$ .

Приравняв правые части выражений (4) и (5), после интегрирования получим:

$$\tau = \frac{R(R - \delta) 10^{10}}{3,3 a_m} \ln \frac{U_1 - U_p}{U_2 - U_p}, \quad (7)$$

где  $U_1, U_2$  – влагосодержание зерновки исходное и после ее отлежки соответственно, кг вл./кг сух. мат.

При длительности отлежки не менее 6 ч оболочка увлажняется до образования на ней свободной влаги, после чего необходимо начать вентилирование.

Охлаждение отлежавшегося зерна фактически является его сушкой, при которой температура наружного воздуха на входе в насыпь можно принять постоянной, а температуру зерна – средней. Если известна скорость потока воздуха и удельная поверхность зерна, то можно воспользоваться выражением [17]:



$$\tau = \frac{\Delta U r H}{\alpha f (\theta_{cp} - t) h_i \eta}, \quad (8)$$

где  $\Delta U$  – влагосъем, 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  $h_i = (2 \dots 3d_3)$ , где  $d_3$  – эквивалентный диаметр зерновки, м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $f$  – удельная поверхность частиц материала, м<sup>2</sup>/кг;  $t$  – температура агента сушки, °С;  $\theta_{cp}$  – средняя температура материала, °С;  $\eta$  – доля теплоты на испарение влаги.

В ООО «Рейнгольд» Орловской области при сушке в зерносушилке С-40 зерна кукурузы охлаждали в складе с дополнительным съемом влаги. Были проведены исследования кинетики охлаждения зерна в части проверки рассчитанных значений удельной подачи воздуха, длительностей отлежки и охлаждения. Склад был оснащен системой заглубленных воздухораспределительных каналов, подключенных к мобильным вентиляторам с подачей каждого ~ 7200 м<sup>3</sup>/ч. Эти вентиляторы перемещали по длине склада по мере его заполнения зерном [18].

Цель хозяйственных исследований – проверка качественных показателей высушенного зерна.

**Результаты исследований.** Нагретое зерно от сушилки доставляли автотранспортом на склад, погрузчиком формировали насыпь на 4-канальной воздухораспределительной системе вентилятора, отлеживали, затем охлаждали наружным воздухом. По завершении охлаждения формировали следующую насыпь и т.д. Вентилятор перемещали и подключали к следующей воздухораспределительной системе.

При исследованиях измеряли следующие параметры:

температуру и влажность поступающего и охлажденного зерна;

температуру и относительную влажность наружного и уходящего воздуха.

Периодически и в конце охлаждения отбирали навески на качественные показатели зерна.

Температуру и относительную влажность наружного воздуха определяли на входе в вентилятор. Температуру и относительную влажность уходящего воздуха измеряли на выходе отсасывающего вентилятора. При расчетах использовали средние значения температуры и относительной влажности воздуха.

Основные показатели исследования процесса охлаждения зерна кукурузы приведены в таблице.

Основные показатели процесса охлаждения зерна

Показатель	Значение
Влажность зерна, %:	
до охлаждения	15,6
после охлаждения	13,5
Температура зерна, °С:	
до охлаждения	51
после охлаждения	13
Температура воздуха, °С:	
до охлаждения	12
после охлаждения	13
Относительная влажность воздуха, %:	
до охлаждения	62
после охлаждения	78
Удельный расход воздуха, м <sup>3</sup> /(т·ч)	26
Длительность отлежки, ч	12
Длительность охлаждения, ч	29





При хранении зерна в насыпи оно может иметь повышенные показатели температуры и влажности, что отрицательно сказывается на его устойчивости к болезням и качестве. Вентиляция атмосферным воздухом зерновой массы позволяет привести данные показатели в норму.

Исследования показали допустимость применения полученных зависимостей для расчета основных параметров процесса сушки. Применение полученных результатов при сушке в сельскохозяйственных предприятиях позволит оптимизировать сам процесс в целом, сократить время подачи воздуха, длительности отлежки и охлаждения при сохранении качественных показателей зерна.

В результате проведенных исследований на основе приближенных систематических моделей были определены минимальные значения удельной подачи воздуха, отлежки и охлаждения нагретого зерна в насыпи. Эти значения были использованы при хозяйственных исследованиях двухстадийной сушки зерна кукурузы. Изменения качественных показателей досушенного и охлажденного зерна не выявлены: содержание крахмала и трещиноватости практически не изменилось, неравномерность высушенных семян не превысила исходные требования.

**Заключение.** Минимальная удельная подача воздуха при охлаждении нагретого зерна зависит от высоты слоя насыпи, коэффициента испарения влаги и логарифма разности относительной влажности паров влаги на поверхности зерновки и воздуха.

Минимальная длительность отлежки нагретого зерна обусловлена увлажнением его наружной поверхности и зависит от коэффициента диффузии влаги, радиуса зерновки, толщины оболочки и логарифма разности текущего и равновесного влагосодержания.

Длительность охлаждения насыпи можно рассчитать по зависимостям для сушки зерна при фактических значениях параметров воздуха и насыпи.

Хозяйственные исследования показали допустимость применения полученных зависимостей для расчета основных параметров процесса сушки без снижения качества зерна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hansen R.C., Berry M.A., Klenner H.M., Gustafson R.I. Current Grain Drying Practices in Ohio // Applied Engineering in Agriculture. 1996. Vol. 12, 1. P. 65–69.
2. Особенности первичной обработки и хранения зерна в США // Экспресс-информация. Сер. Элеваторная промышленность. М., 1983. Вып. 14. 41 с.
3. Дорохов А.С., Бельшикина М.Е., Большева К.К. Производство сои в Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 3(47). С. 25–33.
4. Сорочинский В.Ф. Эффективный способ двухстадийной сушки зерна // Комбикормовая промышленность. 1996. № 4. С. 17–18.
5. Сорочинский В.Ф. Технология активного вентилирования сушки зерна риса // Пищевая промышленность. 1997. № 3. С. 10–11.
6. Богомолов И.С., Клейменова Н.Л., Копылов М.В. Исследование процесса сушки зерновых культур // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 14–19.
7. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. М., 2004. 240 с.
8. Загоруйко М.Г., Павлов С.А. Вентилирование насыпи нагретого зерна кукурузы // Аграрный научный журнал. 2020. № 9. С. 74–77.
9. Окунь Г.С., Чижиков А.Г. Тенденции развития технологии и технических средств сушки зерна. М., 1987. С. 41–42.
10. Андреева Е.В. Теоретические и экспериментальные исследования процесса двухэтапной сушки зерна // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2009. № 4. С. 1152.
11. Голубкович А.В., Павлов С.А., Ламкин Д.С. Расчет процессов двухэтапной сушки зерна // Техника в сельском хозяйстве. 2009. № 6. С. 16–19.
12. Бутайкин В.В. Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Саранск, 2012. 161 с.
13. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности / Г.Н. Данилова [и др.]. М., 1986. С. 168–170.



14. Мельник Б.Е., Малин Н.И. Справочник по сушке и активному вентилированию зерна. М., 1980. 175 с.
15. Чеботарев В.П. Низкотемпературная сушка и режимное хранение зерна. Минск, 2011. С. 41.
16. Технологии в растениеводстве / Е.М. Юдина [и др.]. Краснодар, 2015. 119 с.
17. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М., 1984. 306 с.
18. Загоруйко М.Г., Павлов С.А. Использование сушилки С-40 при двухстадийной сушки зерна кукурузы // *Агроинженерия*. 2021. № 3(103). С 69–73.

#### REFERENCES

1. Hansen R.C., Berry M.A., Klener H.M., Gustafson R.I. Current Grain Drying Practices in Ohio. *Applied Engineering in Agriculture*. 1996; 12, 1: 65–69. (In Russ.)
2. Features of primary processing and storage of grain in the U.S. *Express Information. Ser. Elevator Industry*. 1983; 14. 41 p. (In Russ.)
3. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E., Bolsheva K.K. Soybean production in the Russian Federation: major trends and prospects for development. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2019; 3(47): 25–33. (In Russ.)
4. Sorochinskiy V.F. Effective way of two-stage drying of grain. *Feed industry*. 1996; 4: 17–18. (In Russ.)
5. Sorochinskiy V.F. Technology of active ventilating drying of rice grains. *Food Industry*. 1997; 3: 10–11. (In Russ.)
6. Bogomolov I.S., Kleimenova N.L., Kopylov M.V. Research of drying process of grain crops. *Polzunov Herald*. 2021; 4: 14–19. (In Russ.)
7. Malin N.I. Energy-saving drying of grain. Moscow, 2004. 240 p. (In Russ.)
8. Zagoruyko M.G., Pavlov S.A. Ventilation of heated corn mound. *The Agrarian Scientific Journal*. 2020; 9: 74–77. (In Russ.)
9. Okun G.S., Chizhikov A.G. Development trends of technology and technical means of drying grain. Moscow, 1987: 41–42. (In Russ.)
10. Andreeva E.V. Theoretical and experimental studies of two-stage drying process of grain. *Engineering and technical support of the agroindustrial complex. Abstract Journal*. 2009; 4: 1152. (In Russ.)
11. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Lamkin D.S. Calculation of two-stage drying processes of grain. *Technics in agriculture*. 2009; 6: 16–19. (In Russ.)
12. Butyaikin V.V. Technology of storage and processing of agricultural products. Saransk, 2012. 161 p. (In Russ.)
13. Collection of tasks on heat exchange processes in the food and refrigeration industry / G.N. Danilova et al. Moscow, 1986: 168–170. (In Russ.)
14. Melnik B.E., Malin N.I. Reference book on drying and active ventilation of grain. M Moscow, 1980. 175 p. (In Russ.)
15. Chebotarev V.P. Low-temperature drying and storage mode of grain. Minsk, 2011: 41. (In Russ.)
16. Technologies in crop production: textbook / E.M. Yudina et al. Krasnodar, 2015. 119 p. (In Russ.)
17. Sazhin B.S. Fundamentals of drying technique. Moscow, 1984. 306 p. (In Russ.)
18. Zagoruyko M.G., Pavlov S.A. Using the C-40 dryer for two-stage drying of corn grain. *Agroengineering*. 2021; 3(103): 69–73. (In Russ.)

*Статья поступила в редакцию 16.10.2022; одобрена после рецензирования 2.11.2022; принята к публикации 15.11.2022.*

*The article was submitted 16.10.2022; approved after reviewing 2.11.2022; accepted for publication 15.11.2022.*

