

## Основы безопасной сушки семян

### Basics of safe drying of seeds

А. В. ГОЛУБКОВИЧ, д-р техн. наук

Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Москва, Россия, тел. + 7 (499) 1748818

A. V. GOLUBKOVICH, DSc in Engineering

All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russia, tel. + 7 (499) 1748818

В семеноводческих хозяйствах температуру агента сушки зачастую ограничивают предельно допустимой температурой нагрева, единовременный влагосъем составляет 3–6 % влаги, семена высушивают до влажности на 2–3 % больше кондиционной, в процессе сушки неоднократно перемешивают слой. Все это удорожает процесс и может привести к потерям урожая. В статье проанализированы существенные факторы, влияющие на безопасную сушку семян в плотном слое. Установлено, что наряду с предельно допустимой температурой нагрева следует учитывать скорость обезвоживания, удельную поверхность семян, коэффициент теплоотдачи и неравномерность влажности исходного и высушенного материала. Оценка параметров безопасной сушки семян проведена на основе математических моделей и известных эмпирических выражений по термостойкости и предельно допустимому влагосъему. Предложен расчет температуры агента сушки, обеспечивающей полную безопасность процесса, в том числе для селекционных семян. Допустимую температуру агента сушки рассчитывают по выражению, учитывающему удельную поверхность зерна, коэффициент теплоотдачи, теплоту парообразования, коэффициент, зависящий от допустимой скорости обезвоживания, а также предельно допустимую температуру нагрева семян. Максимальная высота слоя семян, высушиваемых без перемешивания, зависит от скорости агента сушки, диаметра зерновки, порозности слоя, коэффициента массоотдачи и влагосодержания агента сушки до и после слоя. Предельно допустимую температуру нагрева семян следует рассчитывать по формуле С. Д. Птицына, но за основу брать максимальную влажность 10 % навески.

**Ключевые слова:** семена; безопасная сушка; интенсификация процесса; температура агента сушки.

In seed-production farms, the temperature of drying agent is often limited by the maximum permissible temperature of heating; the simultaneous moisture removal is 3–6 %; seeds are dried to a moisture content that exceeds the normal one by 2–3 %; the layer is stirred several times during drying process. All of this increases the process cost and could lead to crop losses. The paper analyzes the essential factors influencing the safe drying of seeds in dense layer. It is found that along with the maximum permissible temperature of heating, account must be taken of the rate of dehydration, the specific surface of seeds, the heat transfer coefficient and the unevenness of moisture of basic material and of a dried-up one. The estimation of parameters for safe drying of seeds is carried out on the basis of mathematical models and well-known empirical expressions of the heat resistance and maximum permissible moisture removal. The article proposes the calculation of drying agent temperature that ensures the complete safety of the process, for breeder seeds also. Permissible temperature of drying agent is calculated by the expression that takes into account the specific surface of grain, the heat transfer coefficient, the heat of vaporization and the coefficient that depends on the permissible rate of dehydration, as well as the maximum permissible temperature of seeds heating. The maximum height of the layer of seeds being dried without stirring depends on the speed of drying agent, the diameter of grain, the porosity of layer, the mass transfer coefficient and the moisture content of drying agent before and after the layer. The maximum permissible temperature of seeds heating should be calculated according to the formula of S. D. Ptitsyn, but the maximum humidity of 10 % of weighed portion should be used as a basis.

**Keywords:** seeds; safe drying; process intensification; temperature of drying agent.

#### Введение

Для развития и повышения эффективности производства зерна важное значение имеет семеноводство, в т.ч. инновационные технологии и технические средства сушки семян [1–4].

Для получения высококачественных семян следует учитывать температуру нагрева, скорость обезвоживания и неравномерность влажности как исходных, так и высушенных семян. Эти факторы обеспечивают безопасное хранение и высокую урожайность.

На практике в семеноводческих хозяйствах, чтобы гарантированно обеспечить качество семян, температуру агента сушки ограничивают предельно допустимой температурой нагрева, единовременный влагосъем — 3–6 % влаги, семена высушивают до влажности на 2–3 % больше кондиционной, в процессе сушки неоднократно перемешивают слой. Все это затягивает и удорожает процесс и в случае неблагоприятных погодных условий или избыточного объема материала, единовременно поступающего на обработку, может привести к потерям урожая. Перемешивание, осуществляемое вручную, не только затрудняет обслуживание сушилки, но и не исключает образования очагов самосогревания при хранении.

#### Цель исследования

Цель исследования — обоснование температуры агента сушки с учетом термостойкости, предельно допустимого влагосъема и максимальной высоты слоя, не требующей перемешивания.

Обоснованный выбор безопасных режимов сушки можно выполнить, например, на базе исследования приближенных моделей тепломассопереноса в зерновке.

#### Материалы и методы

Механизм сушки представим в следующем виде. Вследствие разности температур поверхности зерновки и ее центральной части (ядра) происходят перенос массы и паров, обусловленный разностью парциальных давлений, и испарение влаги. При этом возникает градиент концентрационной диффузии влаги, который служит движущей силой перемещения влаги из ядра зерновки к ее поверхности, причем скорость процесса зависит от характера и формы связи влаги с сухим веществом зерновок [5].

В процессе переноса влажность зерновок неравномерно распределяется по радиусу. Наружная поверхность имеет более низкую влажность по сравнению с

ядром, из которого влага перемещается к ней по капиллярам [6].

Интенсивность процесса сушки зависит, во-первых, от скорости продвижения влаги к поверхности зерновки, во-вторых, от скорости испарения влаги с поверхности в окружающую среду. Эти факторы непосредственно зависят от физико-химических свойств зерна и движущей силы процесса сушки, и их обоснованная взаимосвязь между собой обеспечивает безопасную сушку [7, 8].

При сушке зерна в плотном слое практически отсутствует период постоянной скорости, а его температура в пограничном слое быстро повышается, приближаясь к температуре агента сушки. Пренебрегая теплопроводностью и принимая конечную температуру зерна  $\theta_k = \theta_{\text{пл}}$  (где  $\theta_{\text{пл}}$  — предельно допустимая температура нагрева зерна, °C), количество передаваемого тепла  $Q$  определим по выражению:

$$Q = \alpha F(t_1 - \theta_{\text{пл}}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °C);  $F$  — поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $t_1$  — температура агента сушки, °C.

Это количество теплоты можно представить в виде:

$$Q = \frac{dUGr}{dt\eta}, \quad (2)$$

где  $dU$  — влагообъем, кг вл./кг сух. мат.;  $G$  — вес сухого вещества зерна, кг;  $dt$  — время, ч;  $r$  — теплота парообразования, кДж/кг;  $\eta$  — доля теплоты, пошедшей на испарение влаги.

Приравняв левые части выражений (1) и (2) и приняв форму зерновки шарообразной, заменим комплекс  $F/(Gr)$  на удельную поверхность  $f$ , м<sup>2</sup>/кг, и получим:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\alpha f(t - \theta_{\text{пл}})\eta}{r}, \quad (3)$$

где  $\eta = Q_{\text{ис}}/(Q_{\text{ис}} + Q_{\text{н}})$ ;  $Q_{\text{ис}}$ ,  $Q_{\text{н}}$  — теплота, затраченная на испарение влаги и нагрев, Вт.

Из выражения (3) следует, что интенсивность сушки увеличивается с возрастанием  $\alpha$ ,  $f$ ,  $(t - \theta_{\text{пл}})$ ,  $\eta$  и уменьшением  $r$ . Темп изменения интенсивности сушки  $dU/dt$  в зависимости от перечисленных параметров имеет сложный характер, обусловленный температурой, формой связи влаги с зерновками, физико-механическими свойствами зерна, механизмом движения влаги и тепла внутри зерновок.

## Результаты и их обсуждение

Величина  $\theta_{\text{пл}}$  — режимный параметр, который задается, величина  $f$  обусловлена физико-механическими свойствами культуры,  $r$ ,  $\eta$  — свойствами зерна и условиями проведения процесса. Так, например, при сушке семян с предварительным подогревом снижаются значения  $\eta$  и  $r$ , соответственно снижается и возрастает  $dU/dt$ . Влияние  $\alpha$  связано со скоростью агента сушки, с повышением  $t_1$  существенно возрастает величина  $\theta_{\text{пл}}$ .

Очевидно, что безопасная температура агента сушки в условиях, учитывающих не только термостойкость зерна, но и отсутствие механических и структурных повреждений, должна обеспечивать соответствие скоростей миграции влаги к поверхности зерновки и отвода паров от поверхности. Последнее обеспечит транспорт влаги в

зерновке преимущественно в виде жидкости (первый период сушки), жидкости и пара (второй период сушки) без повреждения тканей оболочки семени, зародыша и белкового комплекса ядра.

Известно, что первоначальное интенсивное ( $\Delta W = 2...3\%$ ) удаление влаги не отражается на качестве семян с.-х. культур [9]. Для пшеницы при влажности  $W \geq 23...24\%$  установлен предельный влагообъем:

$$\Delta W = 0,185\tau + 3, \quad (4)$$

где  $\tau$  — время сушки, мин.

Большая часть зерна, поступающего на сушку, имеет влажность меньше гигроскопической, поэтому для надежности целесообразно пренебречь вторым членом в правой части выражения (4). Тогда допустимую скорость сушки можно записать в виде:

$$\frac{dW}{d\tau} \leq A, \quad (5)$$

где  $A$  — постоянная величина для каждой культуры, например, для семян кукурузы и гороха  $A = 0,1$ , для мелких семян (клевера, льна, конопли)  $A = 0,28$ .

Приравняв правые части выражений (3) и (5) и заменив  $dW/dt$  на  $dU/dt$  (где  $dU = (W_0 - W_k)/(100 - W_k)$ ;  $W_0$ ,  $W_k$  — начальная и конечная влажность зерна, %), после сокращений получим:

$$t_1 = \frac{Ar}{\alpha f \eta} + \theta_{\text{пл}}. \quad (6)$$

Следовательно, температура агента сушки зависит не только от определяющей величины  $\theta_{\text{пл}}$ , но и от симплекса из коэффициента теплоотдачи, удельной поверхности, доли теплоты, пошедшей на испарение влаги, и коэффициента  $A$ , характеризующего допустимую скорость сушки. Отметим, что выражение (6) касается семян с выровненной исходной влажностью.

Так, при сушке семян пшеницы с начальной влажностью  $W_n = 23\%$  в плотном слое  $t_1 = 49^\circ\text{C}$  при  $V = 0,4$  м/с;  $\alpha = 18$  Вт/(м<sup>2</sup> · °C);  $f = 1$  м<sup>2</sup>/кг;  $\eta = 0,8$ ;  $A = 0,135$ ;  $r = 2600$  кДж/кг;  $\theta_n = 20^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{пл}} = 42^\circ\text{C}$ .

Для определения максимальной высоты слоя, при которой неравномерность влажности высушенного зерна не превысит  $\Delta W_d = \pm 1,5\%$  (согласно исходным требованиям), рассмотрим перенос влаги в слое.

Массу влаги, вынесенной агентом сушки из слоя, можно записать в виде:

$$dM = \beta \rho dF(U_0 - U), \quad (7)$$

где  $\beta$  — коэффициент массоотдачи, м/с;  $\rho$  — плотность паров влаги, кг/м<sup>3</sup>;  $dF$  — площадь, с которой испаряется влага, м<sup>2</sup>;  $U_0$ ,  $U$  — влагосодержание поверхностной пленки на зерновке и агента сушки, кг вл./кг сух. возд.

Ту же массу влаги можно представить как:

$$dM = GdU, \quad (8)$$

где  $G$  — расход паров агента сушки, кг/с.

Приравняв правые части выражений (7) и (8), получим:

$$\beta \rho dF(U_0 - U) = GdU. \quad (9)$$

Рассмотрев отдельный канал в слое, с поверхности которого испаряется влага, запишем [10]:

$$dF = \pi d_3 dh_0,$$

где  $d_3$  — эквивалентный диаметр канала в слое, м;  $d_3 = 2d\varepsilon/[3(1-\varepsilon)]$ ;  $d$  — эквивалентный диаметр зерновки, м;  $dh_0$  — приращение длины канала, м;  $\varepsilon$  — порозность слоя.

Величину  $G$  можно выразить следующим образом:

$$G = \frac{\rho V_0 \pi d_3^2}{4}, \quad (10)$$

где  $V_0$  — скорость агента сушки в канале, м/с;  $V_0 = V/\varepsilon$ ;  $V$  — скорость агента сушки над слоем, м/с.

После интегрирования выражения (9) в пределах от 0 до  $h_0$ , от  $U_1$  до  $U_2$  и упрощения получим:

$$h_0 = \frac{Vd}{4\beta(1-\varepsilon)} \ln \frac{U_0 - U_1}{U_0 - U_2}, \quad (11)$$

где  $U_0$  — влагосодержание паровоздушной пленки на поверхности зерновки, кг вл./кг сух. мат.;  $U_1, U_2$  — начальное и конечное влагосодержание агента сушки, кг вл./кг сух. возд.

Расчет величин  $U_0, U_1, U_2$  приведен в работе [10].

Для зерна влажностью 20 % при  $V = 0,5$  м/с величина  $h_0$  составит 0,18 м, что близко к экспериментальным величинам [11].

Термостойкость семян с выровненной исходной влажностью определяют по формуле С. Д. Птицына:

$$\theta_{\text{пд}} = \frac{2350}{0,37(100 - W_{\text{н}}) + W_{\text{н}}} + 20 - 10 \log \tau, \quad (12)$$

где  $W$  — влажность зерна, %;  $\tau$  — длительность экспозиции, мин.

При сушке селекционных семян ценных сортов, которые характеризуются повышенной исходной неравномерностью влажности отдельных зерновок из-за ранних сроков уборки, в работе [12] предложено к значению  $W_{\text{н}}$  в выражении (12) прибавлять 10 %, что снижает величину  $\theta_{\text{пд}}$ .

В работе [13] предложено учитывать неравномерность влажности рассевом исходной навески и брать за основу 10 % с наибольшей величиной влажности, что наиболее обоснованно для выбора безопасной величины  $\theta_{\text{пд}}$ . Тогда формулу С. Д. Птицына запишем в виде:

$$\theta'_{\text{пд}} = \frac{2350}{0,37(100 - W_{10\%}) + W_{10\%}} + 20 - 10 \log \tau,$$

где  $W_{10\%}$  — влажность 10 % зерен с максимальной влажностью, %.

Выражения для расчета предельных значений перечисленных параметров сведены в таблицу.

#### Выражения для расчета предельных значений параметров

Параметр	Выражение
Температура агента сушки, °С	$t_1 = \frac{Ar}{\alpha f \eta} + \theta_{\text{пд}}$
Влагосъем, %	$\Delta W = A\tau$
Высота слоя без перемешивания, м	$h_0 = \frac{Vd}{4\beta(1-\varepsilon)} \ln \frac{U_0 - U_1}{U_0 - U_2}$
Термостойкость, °С	$\theta'_{\text{пд}} = \frac{2350}{0,37(100 - W_{10\%}) + W_{10\%}} + 20 - 10 \log \tau$

#### Выводы

Допустимую температуру агента сушки рассчитывают по двучленному выражению: первый член содержит удельную поверхность зерна, коэффициент теплоотдачи, теплоту парообразования и коэффициент, зависящий от допустимой скорости обезвоживания, второй член — предельно допустимую температуру нагрева семян.

Максимальная высота слоя семян, высушиваемых без перемешивания, зависит от скорости агента сушки, диаметра зерновки, порозности слоя, коэффициента массоотдачи и логарифма частного влагосодержания агента сушки до и после слоя.

Предельно допустимую температуру нагрева семян следует рассчитывать по формуле С. Д. Птицына, но за основу брать максимальную влажность 10 % навески.

#### Литература и источники

1. Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Сизов О. А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013, № 4. С. 8—11.
2. Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013, № 6. С. 6—10.
3. Дринча В. М., Цыдендоржиев Б. М., Павлов С. А. Основные концептуальные положения разработки технологий подготовки семян // Совершенные агротехнологии. 2010, январь—февраль. С. 52—54.
4. Домбровский С. Б., Дринча В. М., Павлов С. А. и др. Поточные технологии подготовки семян // Совершенные агротехнологии. 2010, март—апрель. С. 12—13.
5. Павлов С. А., Левина Н. С., Елизарова О. В. Экспериментальные исследования реверсивной сушки семян гороха // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. М.: ВИМ, 2015. С. 357—360.
6. Павлов С. А., Елизаров В. П. Исследование энергоэффективного режима сушки семян в инновационной сушилке // Международный научный е-симпозиум "Технические науки: интеграция науки и практики": Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 3. М., 2015. С. 80—88.
7. Павлов С. А. Обоснование безопасных скоростных режимов сушки семян // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. М.: ВИМ, 2015. С. 360—363.
8. Pavlov S. A., Golubkovich A. V. To calculation of drying modes of seeds in column reversible dryer // Science and education. Proc. of the VIII int. res. and pract. conf. Munich, Germany, 2015, pp. 16—19.
9. Птицын С. Д. Зерносушилки. М.: Машгиз, 1962. 52 с.
10. Голубкович А. В., Павлов С. А., Ламкин Д. С. Расчет процессов двухэтапной сушки зерна // Техника в сельском хозяйстве. 2009, № 6. С. 16—19.
11. Анискин В. И. Технологические и технические решения проблемы сохранности зерна в сельском хозяйстве: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 1986. 498 с.
12. Гамхошвили Р. М. Обоснование технологических и конструктивных параметров и разработка универсальной установки для сушки селекционных семян: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 21 с.
13. Анискин В. И., Окунь Г. С. Технологические основы оценки работы зерносушильных установок. М.: ВИМ, 2003. 167 с.

## References

1. Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Sizov O. A. Prospective ways of using energy-efficient and environmentally friendly machine technologies and means. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2013, no. 4, pp. 8–11 (in Russ.).
2. Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P. System of machines and technologies for complex mechanization and automation of agricultural production for the period until 2020. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2013, no. 6, pp. 6–10 (in Russ.).
3. Drincha V. M., Tsyndendorzhiev B. M., Pavlov S. A. The main conceptual principles of development of technologies for seed preparing. *Sovershennyye agrotekhnologii*, 2010, January-February, pp. 52–54 (in Russ.).
4. Dombrovskiy S. B., Drincha V. M., Pavlov S. A., Tsyndendorzhiev B. M. Post-harvest technologies for seed preparing. *Sovershennyye agrotekhnologii*, 2010, March-April, pp. 12–13 (in Russ.).
5. Pavlov S. A., Levina N. S., Elizarova O. V. Experimental studies of reverse drying of pea seeds. *Intellektual'nye mashinnye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva. Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Intelligent machine technologies and equipment for the implementation of the State Agricultural Development Programme. Proc. int. sci. and pract. conf.]. Part 1. Moscow, All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, 2015, pp. 357–360 (in Russ.).
6. Pavlov S. A., Elizarov V. P. Study of energy-efficient mode of seed drying in an innovative dryer. *Mezhdunarodnyy nauchnyy e-simpozium "Tekhnicheskyye nauki: integratsiya nauki i praktiki". Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [International scientific e-symposium "Engineering: integrating science and practice". Proc. int. sci. and pract. conf.]. Part 3. Moscow, 2015, pp. 80–88 (in Russ.).
7. Pavlov S. A. Substantiation of safe speed modes of seed drying. *Intellektual'nye mashinnye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva. Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Intelligent machine technologies and equipment for the implementation of the State Agricultural Development Programme. Proc. int. sci. and pract. conf.]. Part 1. Moscow, All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, 2015, pp. 360–363 (in Russ.).
8. Pavlov S. A., Golubkovich A. V. To calculation of drying modes of seeds in column reversible dryer. *Science and education. Proc. of the VIII int. res. and pract. conf.* Munich, Germany, 2015, pp. 16–19.
9. Ptitsyn S. D. *Zernosushilki* [Grain dryers]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962, 52 p.
10. Golubkovich A. V., Pavlov S. A., Lamkin D. S. Calculating the processes of two-stage grain drying. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*, 2009, no. 6, pp. 16–19 (in Russ.).
11. Aniskin V. I. *Tekhnologicheskyye i tekhnicheskyye resheniya problemy sokhrannosti zerna v sel'skom khozyaystve* [Technological and technical solutions to the problem of grain preservation in agriculture]. DSc in Engineering thesis. Moscow, 1986, 498 p.
12. Gamkoshvili R. M. *Obosnovaniye tekhnologicheskikh i konstruktivnykh parametrov i razrabotka universal'noy ustanovki dlya sushki selektsionnykh semyan* [Substantiation of technological and design parameters and development of a universal installation for drying of breeding seed]. PhD in Engineering thesis abstract. Moscow, 1975, 21 p.
13. Aniskin V. I., Okun' G. S. *Tekhnologicheskyye osnovyy otsenki raboty zernosushil'nykh ustanovok* [Technological basics of evaluation of grain drying units]. Moscow, All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, 2003, 167 p.