

## **Исследование импульсной сушки зерна в сушилке С-30**

### **Study of pulse drying of grain in the S-30 dryer**

**А. В. ГОЛУБКОВИЧ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук  
**С. А. ПАВЛОВ<sup>1</sup>**, канд. техн. наук  
**И. Д. ЛУКИН<sup>2</sup>**, инж.

<sup>1</sup> **Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Москва, Россия, vim@vim.ru**

<sup>2</sup> **Кировская машиноиспытательная станция, п.г.т. Оричи, Кировская обл., Россия, kirmis@orichi1a.kirov.ru**

**A. V. GOLUBKOVICH<sup>1</sup>**, DSc in Engineering  
**S. A. PAVLOV<sup>1</sup>**, PhD in Engineering  
**I. D. LUKIN<sup>2</sup>**, Engineer

<sup>1</sup> **All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russia, vim@vim.ru**

<sup>2</sup> **Kirov Machine-Testing Station, Orichi, Kirov region, Russia, kirmis@orichi1a.kirov.ru**

Для развития и совершенствования зерновой отрасли важное значение имеют инновационные технологии и технические средства сушки, позволяющие качественно и с минимальными затратами высушивать зерно. К таким технологиям относятся осциллирующие режимы, суть которых заключается в том, что на материал периодически воздействуют подогретым и неподогретым агентом сушки. Эти режимы предусматривают периодическое охлаждение зерна, что позволяет повысить температуру агента сушки и снизить затраты тепла. Однако периодическое охлаждение зерна неподогретым воздухом зачастую снижает эффект осциллирующего режима. Импульсный режим в отличие от осциллирующего характеризуется лишь снижением подачи жидкого топлива в сушилку и охлаждением зерна на величину, близкую к теоретической, что позволяет снизить потери теплоты и повысить эффективность сушки. Предложены математические методы расчета температуры и длительности воздействия на зерно слабо подогретого агента сушки. Для определения температуры слабо подогретого агента сушки и длительности его воздействия составлены и решены уравнения тепло-массопереноса в слое и зерновке, из которых получены расчетные выражения. При приемочных испытаниях зерносушилки С-30 проверены расчетные зависимости для определения этих параметров. В сушилку непрерывно подают влажное зерно и отводят высушенное и охлажденное, периодически включают и отключают в топке форсунку "большой огонь", оставляя в работе форсунку "малый огонь". Таким образом создается импульсный режим сушки. Максимальная температура подогретого агента сушки составила

105 градусов Цельсия, температура слабо подогретого агента сушки составила 46 градусов Цельсия. Установлено, что кривые изменения температуры и влажности зерна не отличаются от классических кривых при осциллирующем режиме сушки. Использование импульсного режима сушки позволило в 2 раза сократить амплитуду колебаний температуры агента сушки и снизить потери теплоты на 10–12 %. Температура слабо подогретого агента сушки не должна быть ниже предельно допустимой температуры нагрева зерна более чем на 8–10 градусов Цельсия.

**Ключевые слова:** сушка; зерно; импульсный режим; параметры.

Innovative technologies and technical means of drying which allow to dry the grain efficiently and with minimal costs are very important for development and improvement of grain industry. These technologies include the oscillating modes, the essence of which is that the material is periodically affected by heated and unheated drying agent. These modes provide periodical grain cooling, that allows to increase drying agent temperature and decrease heat losses. However, periodical grain cooling with unheated air often lowers the effect of oscillating mode. Pulse mode, unlike the oscillating one, is characterized only by decreased liquid fuel supply in the dryer, and grain cooling on a value close to theoretical one, which allows to decrease heat losses and increase dryer efficiency. The mathematical methods of calculation of temperature and duration of impact of low-heated drying agent on the grain are suggested. To determine the temperature of low-heated drying agent and its impact duration, the heat and mass transfer equations in layer and caryopsis were composed and solved; the calculated expressions were obtained from them. During acceptance testing of the S-30 dryer, the calculated dependences for determining these parameters were checked. The wet grain was continuously sent into grain dryer, the dried and cooled grain was withdrawn at the same time. The "big fire" nozzle in firebox was periodically enabled and disabled, and the "low fire" nozzle remained in working mode, thus a pulse mode of drying was created. The maximum temperature of heated drying agent was 105 degrees C, while the temperature of low-heated drying agent was 46 degrees C. It was established that curves of changing in temperature and moisture of grain did not differ from the classic curves under oscillating drying mode. The use of pulse drying mode allows to shorten by two times the amplitude of temperature oscillations of drying agent and to reduce heat losses by 10–12 %. The temperature of low-heated drying agent should not be below the maximum permissible heating temperature of grain by more than 8–10 degrees C.

**Keywords:** drying; grain; pulse mode; parameters.

## Введение

Для развития и совершенствования зерновой отрасли важное значение имеют инновационные технологии и технические средства сушки, позволяющие качественно и с минимальными затратами тепла высушивать зерно, предусмотренные "Системой технологий и машин" [1]. К ним относятся технологии с переменным теплоподводом, в т.ч. двухэтапные [2, 3], реверсивные [4], осциллирующие [5, 6], суть которых заключается в том, что на материал периодически воздействуют подогретым и неподогретым агентом сушки. Эти режимы предусматривают периодическое охлаждение зерна, что позволяет повысить температуру агента сушки и снизить затраты тепла.

Режимы осциллирующей сушки достаточно хорошо исследованы: определены рациональные параметры длительности продувки подогретым и неподогретым агентом сушки и температура подогретого агента [7]. Однако периодическое охлаждение зерна неподогретым воздухом зачастую снижает эффект осциллирующего режима.

Осциллирующий режим реализуется включением и отключением топочного устройства колонковых и шахтных зерносушилок, работающих под напором. Проходя через теплообменник отключенного топочного устройства, наружный воздух подогревается на 10–15 °С и поступает в слой зерна. При жидкостной топке повторное включение возможно после ее охлаждения до 35–40 °С, что обуславливает чрезмерное охлаждение зерна ( $\Delta\theta = 10...15$  °С вместо  $\Delta\theta = 3...5$  °С теоретически обоснованной величины). Это приводит к неоправданным потерям теплоты и снижению эффективности режима сушки.

Импульсный режим в отличие от осциллирующего характеризуется лишь снижением подачи жидкого топлива в сушилку и охлаждением зерна на величину, близкую к теоретической, что позволяет снизить потери теплоты и повысить эффективность сушки.

## Цель исследования

Цель исследования — расчет температуры и длительности воздействия на зерно слабо подогретого агента сушки и хозяйственная проверка импульсного режима сушки.

## Материалы и методы

Для определения температуры  $t_2$  слабо подогретого агента сушки составим тепловой баланс процесса. Тепло,  $Q$ , отданное зерном агенту сушки:

$$Q = \alpha F \eta (\theta'_{\text{пл}} - t_2) \tau_{\text{ок}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $F$  — поверхность зерна, м<sup>2</sup>/кг;  $\eta$  — доля теплоты, пошедшая на испарение влаги;  $\theta'_{\text{пл}}$  — предельно допустимая температура зерна при осциллирующем режиме, °С.

Предельно допустимая температура зерна при постоянной температуре агента сушки определяется по формуле [8]:

$$\theta'_{\text{пл}} = \frac{2350}{0,37(100 - W) + W} + 20 - 10 \log \tau^*,$$

где  $W$  — исходная влажность зерна, %;  $\tau^*$  — длительность сушки при симметричном осциллирующем режиме ( $\tau^* \approx 0,5\tau$ ).

Тепло  $Q$ , Вт, также можно выразить как:

$$Q = Gc\Delta\theta, \quad (2)$$

где  $G$  — масса зерна, кг;  $c$  — теплоемкость зерна, кДж/(кг · °С);  $\Delta\theta$  — величина охлаждения зерна, °С.

Приравняем выражения (1) и (2) с учетом того, что частное  $F/G$  — это удельная поверхность зерна  $f$ , м<sup>2</sup>/кг. После решения относительно  $t_2$  получим:

$$t_2 = \frac{\alpha f \eta \tau_{\text{ок}} \theta'_{\text{пл}} + c \Delta\theta}{\alpha f \eta \tau_{\text{ок}}}. \quad (3)$$

Величину  $\tau_{\text{ох}}$  можно рассчитать на основе массопереноса в зерновке [7]. Пренебрегая сопротивлением переносу влаги в поверхностной зоне зерновки вследствие ее капиллярно-пористой структуры и теплопроводностью, массоотдачу агенту сушки с поверхности зерновки можно записать в виде:

$$dM = \beta \rho F (U_0 - U), \quad (4)$$

где  $\beta$  — коэффициент массоотдачи, м/с;  $\rho$  — плотность паров влаги, кг/м<sup>3</sup>;  $U_0$ ,  $U$  — начальное влагосодержание паровой пленки на поверхности материала и влагосодержание агента сушки, кг вл./кг сух. возд.

Также массоперенос можно выразить в виде:

$$dM = \frac{G'dU}{d\tau_{\text{ох}}}, \quad (5)$$

где  $G'$  — масса влаги в обезвоживаемой зоне зерновки, кг.

Приравняв правые части выражений (4) и (5), запишем:

$$\beta \rho F (U_0 - U) = \frac{G'dU}{d\tau_{\text{ох}}}. \quad (6)$$

Перепишем выражение (6), приняв сферическую форму зерновки с радиусом  $R$  и толщину обезвоживаемой зоны  $\delta$ :

$$\beta R^2 (U_0 - U) = \frac{[R^3 - (R - \delta)^3] dU}{3d\tau}. \quad (7)$$

Окончательно получим после упрощений:

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{\delta}{2\beta} \ln \frac{U_0 - U_1}{U_0 - U_2}, \quad (8)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  — начальное и конечное влагосодержание агента сушки, кг вл./кг сух. возд.

Известно, что величина  $\delta$  может быть выражена в виде [9]:

$$\delta = R \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{5(W_{\text{н}} - W_i)}{3(W_{\text{н}} - W_{\text{р}})}} \right], \quad (9)$$

где  $W_{\text{н}}$ ,  $W_{\text{р}}$  — начальная и равновесная влажность материала, %;  $\Delta W_i$  — циклическое снижение влаги.

$$\Delta W_i = \frac{W_{\text{н}} - W_{\text{к}}}{n},$$

где  $W_{\text{к}}$  — конечная влажность, %;  $n$  — количество циклов осциллирования.

Расчет по выражению (3) после подстановки  $\tau_{\text{ох}}$  из выражения (8) показывает, что величина  $t_2$  должна быть не ниже 8—10 °С относительно  $\theta'_{\text{пл}}$ , что позволит охладить зерно на 3—4 °С без существенных потерь теплоты с уходящим агентом сушки.

### Хозяйственная проверка

При приемочных испытаниях зерносушилки С-30 были уточнены предложенные расчетные зависимости определения температуры  $t_2$  и длительности воздействия на зерно  $\tau_{\text{ох}}$  слабо подогретого агента сушки.

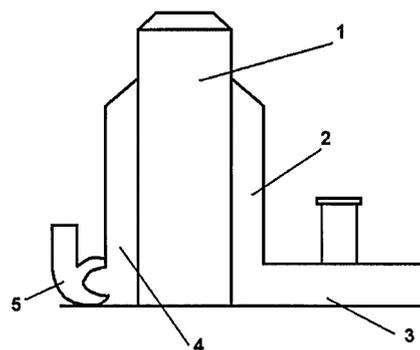


Рис. 1. Технологическая схема сушильной установки С-30

Сушилка С-30 (рис. 1) содержит шахту 1, диффузор 2, топку 3, воздушную камеру 4, вентилятор 5 и циклон (на схеме не показан).

В сушилку непрерывно подают влажное зерно и отводят высушенное и охлажденное, периодически включают и отключают в топке форсунку "большой огонь", оставляя в работе форсунку "малый огонь". Таким образом создается импульсный режим сушки.

На приемочных испытаниях высушивали продовольственное зерно влажностью  $W_1 = 21\%$  до  $W_2 = 13\%$ . Максимальная температура подогретого агента сушки  $t_1$  составила 105 °С, что соответствует расчетной величине  $\theta'_{\text{пл}}$  по источнику [6], а температура слабо подогретого агента сушки  $t_2$ , рассчитанная по выражению (3), составила 46 °С. Эти значения температур поддерживались автоматически с помощью датчиков, размещенных в воздушной камере.

Каждые 3—10 мин записывали температуру и влажность зерна на входе и выходе из сушилки, температуру агента сушки  $t_1$  и  $t_2$  на входе в сушильную камеру, длительность периодов нагрева  $\tau_{\text{н}}$  и охлаждения  $\tau_{\text{ох}}$  зерна.

Величину  $\delta$  определяли из выражения (8), предварительно вычислив  $\Delta W_i$ , задаваясь частотой  $n$  циклов сушки (периодов охлаждения).

### Результаты и их обсуждение

Кривые изменения температуры и влажности зерна приведены на рис. 2. В связи с малым временем периодов нагрева ( $\tau_{\text{н}} = 8$  мин) и охлаждения ( $\tau_{\text{ох}} = 6$  мин) зерна и незначительными изменениями  $\Delta\theta$  и  $\Delta W$  кривые построены по их средним значениям за цикл. Установлено, что кривые изменения температуры и влажности зерна не отличаются от классических кривых при осциллирующем режиме сушки.

Изменение температуры агента сушки носит синусоидальный характер (рис. 3). В соответствии с изменением температуры агента сушки меняется температура зерна, — в начале процесса сушки установлен быстрый рост температуры с уменьшающейся амплитудой изменения величины  $\Delta\theta$ .

Для сравнения на график нанесена кривая изменения температуры зерна при осциллирующем режиме сушки для условия охлаждения топki до температуры 35—40 °С с периодами нагрева и охлаждения по 20 мин [9]. Если при импульсном режиме с охлаждением топki

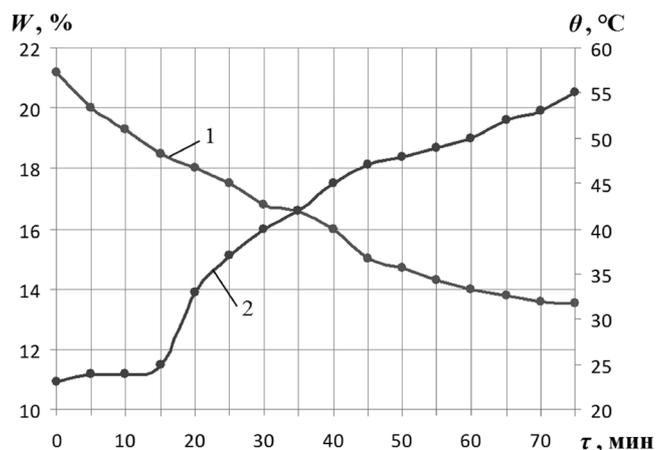


Рис. 2. Зависимости средней влажности зерна  $W$  (1) и средней температуры зерна  $\theta$  (2) от времени сушки  $\tau$

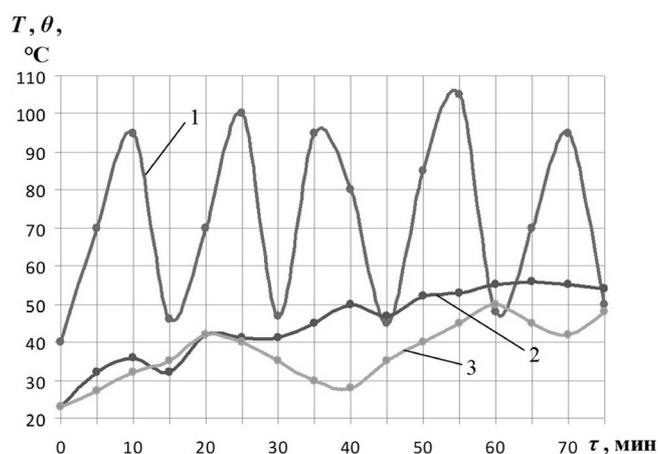


Рис. 3. Зависимости температуры агента сушки 1 и температуры зерна 2 от времени сушки, кривая 3 приведена по источнику [9]

до 40–45 °С амплитуда колебаний температуры  $\Delta\theta$  не превышает 3–4 °С, то при осциллирующем режиме она достигает 10–12 °С. С более глубоким охлаждением зерна возрастают потери тепла с отходящим агентом сушки. При реализации импульсного режима в сушилке С-30 ее паспортная производительность не изменилась, затраты тепла составили  $q = 4,5$  МДж/кг исп. вл., что на ~10–12 % ниже, чем при осциллирующем режиме сушки. Установлено, что расчетные выражения для  $t_2$  и  $\tau_{\text{ох}}$  отличаются от фактических не более чем на 15–20 %.

## Выводы

Использование импульсного режима сушки, при котором зерно вентилируют подогретым и слабо подогретым агентом сушки, позволяет примерно в 2 раза сократить амплитуду колебаний температуры агента сушки, снизить потери теплоты, в т.ч. с отработавшим агентом сушки, на 10–12 %.

Температура слабо подогретого агента сушки не должна быть ниже предельно допустимой температуры нагрева зерна более чем на 8–10 °С.

## 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. Peart R. M., Brook R., Okos M. R. Energy requirements for various methods of crop drying. Handbook of energy utilization in agriculture. Edited by D. Pimentel. USA, Boca Raton, FL: CRC Press, 1980, pp. 49–54.
3. Голубкович А. В., Павлов С. А. Оптимизация сушки зерна при осциллирующем режиме // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014, № 1. С. 10–14.
4. Павлов С. А., Голубкович А. В., Марин Р. А. и др. Особенности реверсивной сушки семян в колонковой сушилке // Тракторы и сельхозмашины. 2014, № 5. С. 40–41.
5. Голубкович А. В., Павлов С. А., Орехов А. П. и др. Сушка семян рапса в карусельной сушилке при осциллирующем режиме // Техника в сельском хозяйстве. 2011, № 4. С. 25–28.
6. Голубкович А. В., Павлов С. А. К методу расчета длительности осциллирующей сушки // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: Сб. докл. XII Международ. науч.-техн. конф. Ч. 1. М.: ВИМ, 2012. С. 640–645.
7. 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.
8. Птицын С. Д. Зерносушилки. М.: Машгиз, 1962. 52 с.
9. Иванов Н. Я. Исследование процесса сушки семенного и продовольственного зерна при переменных тепловых режимах: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1968. 137 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. Peart R. M., Brook R., Okos M. R. Energy requirements for various methods of crop drying. *Handbook of energy utilization in agriculture*. Edited by D. Pimentel. USA, Boca Raton, FL: CRC Press, 1980, pp. 49–54.
3. Golubkovich A. V., Pavlov S. A. Optimizing the grain drying in oscillating mode. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 10–14 (in Russ.).
4. Pavlov S. A., Golubkovich A. V., Marin R. A., Dadyko A. N. Features of reversal seed drying in a tower dryer. *Traktory i sel'khoz-mashiny*, 2014, no. 5, pp. 40–41 (in Russ.).
5. Golubkovich A. V., Pavlov S. A., Orekhov A. P., Kozlov V. I. Rapeseed drying in a rotary dryer under oscillating mode. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*, 2011, no. 4, pp. 25–28 (in Russ.).
6. Golubkovich A. V., Pavlov S. A. On a method of calculating the duration of oscillating drying. *Modernizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na baze innovatsionnykh mashinnykh tekhnologiy i avtomatizirovannykh sistem. Sb. dokl. XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modernization of agricultural production based on innovative machine technologies and automated systems. Proc. of XII Int. sci. and pract. conf.]. Part 1. Moscow, All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization Publ., 2012, pp. 640–645 (in Russ.).
7. Elizarov V. P., Pavlov S. A., Marin R. A., Dadyko A. N. Grain drying with variable heat supply in a tower grain dryer. *Traktory i sel'khoz-mashiny*, 2015, no. 12, pp. 24–25 (in Russ.).
8. Ptitsyn S. D. *Zernosushilki* [Grain dryers]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962, 52 p.
9. Ivanov N. Ya. *Issledovanie protsessy sushki semennogo i prodovol'stvennogo zerna pri peremennykh teplovykh rezhimakh* [Study of the process of drying seed and food grains under variable thermal conditions]. PhD in Engineering thesis. Moscow, 1968, 137 p.