

УДК 66.047

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СУШКЕ ЗЕРНА В МОБИЛЬНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКЕ

ГОЛУБКОВИЧ А.В.¹, ПЕХАЛЬСКИЙ И.А.¹, ЛУКИН И.Д.², МАРИН Р.А.¹,
докт. техн. наук, канд. техн. наук, гл. инженер, аспирант

¹Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1-й Институтский проезд, 5, 109428, Москва, Российская Федерация, e-mail: agolubkovich@yandex.ru

²Кировская машиноиспытательная станция, ул. Юбилейная, 1, п.г.т. Оричи, Кировская область, 612080, Российская Федерация

Рассмотрели особенности перемещения теплоты и влаги в зерновке и в слое зерна при осциллирующей сушке, одной из энергосберегающих технологий. По сравнению с широко распространенными в сельском хозяйстве технологиями при постоянстве температур агента сушки, она позволяет снизить энергозатраты на 20 процентов при сохранении или увеличении паспортной производительности сушилки. Отметили, что совершенствование технологии и технических средств сушки возможно при математическом моделировании процессов тепло- и массопереноса в зерновке с последующим переходом к слою зерна. Выявили основные условия обеспечения безопасной сушки семян при осциллирующем способе – это снижение длительности воздействия высокотемпературного агента сушки и увеличение его температурного потенциала, что повышает интенсивность процесса и снижает энергозатраты. Рассчитали характеристики режима сушки зерна и параметров сушилки, в том числе продолжительность периодов осциллирующей сушки, температуру высоко- и низкотемпературного агента сушки, длительность отлежки, высоту надсушильного бункера, используемого в качестве теплообменника в мобильной сушилке. В математических моделях учтены перенос влаги и теплоты в ядре и оболочке зерновки при большей допустимой температуре нагрева зерна, по сравнению со способом сушки при неизменной температуре агента. Определили основные параметры процесса и устройства в мобильной зерносушилке. Отметили, что с целью повышения эффективности и энергосбережения сушку следует проводить при температуре нагрева зерна, близкой к предельно допустимой. Выявили, что высота надшахтного бункера (теплообменника) должна быть не менее 0,7 м.

Ключевые слова: осциллирующая сушка, зерно, мобильная зерносушилка, тепло- и массоперенос.

Сушку зерна в сельском хозяйстве в основном ведут при постоянной температуре агента сушки. Однако при этом температура зерна быстро возрастает и достигает предельно допустимых значений, в то время как его влажность остается некондиционной. Это обстоятельство вынуждает использовать агент сушки с пониженной температурой. Но в этом случае возрастают энергозатраты и снижается производительность сушилки. Использование осциллирующего режима (попеременной подачи высоко- и низкотемпературного агента сушки) позволяет проводить процесс практиче-

ски до конца в условиях постоянной скорости сушки, а при наличии зон отлежки – в изотермическом режиме. При этом снижается энергозатратность процесса [1-6].

Цель исследований – расчет параметров процесса и сушилки, в том числе длительности периодов осциллирующей сушки, температуры высоко- и низкотемпературного агента сушки, длительности отлежки, высоты надсушильного бункера, используемого в качестве теплообменника на основе приближенных математических моделей тепло- и массопереноса в зерновке.

Методы и материалы. Математические модели основаны на переносе влаги в зерновке с учетом толщины оболочки зерновки и большей допустимой температуры нагрева зерна, по сравнению со способом сушки при неизменной температуре агента сушки.

Результаты и обсуждение. Примем, что при подаче высокотемпературного агента сушки влагосодержание оболочки зерновки, помещенной в пограничный слой сушилки, приближается к равновесному. Начинается перенос влаги из центральной части зерновки к периферии под влиянием концентрационной диффузии с последующим испарением на поверхности оболочки. При этом скорость агента сушки достаточна для отвода паров.

Массу перенесенной влаги запишем:

$$dM = a_m \rho (U - U_p) / R, \quad (1)$$

где a_m – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность сухого вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$;

U , U_p – текущее и равновесное влагосодержание зерновки, $\text{кг вл.}/\text{кг сух.мат.}$;

R – радиус зерновки, м .

Тот же поток влаги можно записать в виде:

$$dM = \frac{G dU}{F d\tau_n}, \quad (2)$$

где G – масса зерновки, кг ;

F – поверхность массообмена, м^2 ;

τ_n – длительность продувки высокотемпературным агентом сушки, с .

Приравняв правые части выражений (1) и (2), получим:

$$\frac{a_m \rho (U - U_p)}{R} = \frac{G dU}{F d\tau_n}. \quad (3)$$

Величину G можно представить в следующем виде:

$$G = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho.$$

Тогда (3) можно записать:

$$d\tau_n = \frac{R^2 dU}{3 a_m (U - U_p)}, \quad (4)$$

после интегрирования:

$$\tau_n = \frac{R^2}{3 a_m} \ln \frac{U_1 - U_p}{U_2 - U_p}, \quad (5)$$

где U_1 , U_2 – влагосодержание зерновки до и после продувки высокотемпературным агентом сушки,

$$U_1 = \frac{U_0 + U_k}{2}; U_2 = \frac{U_0 + U_k}{2}.$$

Влагосодержание U в процессе сушки может меняться, но величину τ_n изменять нецелесообразно. Следует принять $\tau_n = \text{const}$ по среднему влагосодержанию зерновки, поэтому $U_1 = \frac{U_0 + U_k}{2}$, где U_0 , U_k – начальное и конечное влагосодержание, $\text{кг вл.}/\text{кг}$

сух.мат., а U_2 равно $\frac{U_0 + U_k}{2} - \Delta U$ (ΔU – допустимый влагосъем, для зерновки семян не более $0,06 \text{ кг}/\text{кг}$).

Теплоперенос в зерновке в процессе нагрева можно представить в виде [7]:

$$\alpha f \eta (t_1 - \theta_{cp}) = c \frac{d\theta}{d\tau_n}, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при нагреве, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

f – удельная поверхность зерна, $\text{м}^2/\text{кг}$;

η – доля теплоты, пошедшая на нагрев зерна;

t_1 , θ_{cp} – температура агента сушки и средняя температура зерна, $^\circ\text{C}$;

c – теплоемкость зерна, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$.

Характерной особенностью осциллирующего режима является снижение длительности воздействия высокотемпературного агента сушки на зерно. В результате допустима более высокая температура нагрева зерна. Это утверждение прямо следует из известной формулы Птицына С.Д. для расчета предельно допустимой температуры нагрева семян $\theta_{пд}$:

$$\theta_{пд} = \frac{2350}{0,37(100 - W) + W} + 20 - \log \tau,$$

где W – влажность зерна, %;

τ – длительность сушки, мин .

С целью повышения эффективности и энергосбережения сушку следует проводить при температуре нагрева зерна, близкой к предельно допустимой, которая в общем случае равна $\theta'_{пд} = \theta_{пд} \pm \Delta\theta$, а для симметричного осциллирующего режима при $\tau_n = \tau_{от}$ (где $\tau_{от}$ – длительность продувки неподогретым агентом сушки, ч) может быть записана как $\theta'_{пд} = \theta_{пд} \pm 3^\circ\text{C}$, для несимметричного – в пределах

$$1,5 \geq \frac{\tau_{ox}}{\tau_n} \geq 0,5; \Delta\theta = 3 \frac{\tau_{ox}}{\tau_n} [2].$$

Переходя от пограничного к реальному слою, решение (6) относительно t_1 можно записать в виде:

$$t_1 = \frac{\theta_1 e^{\frac{\tau_n}{A}} - \theta_2}{e^{\frac{\tau_n}{A}} - 1}, \quad (7)$$

где $A = \frac{ch}{\alpha f \eta h_n}$, $\theta_1 = \theta_{пд} - \Delta\theta$, $\theta_2 = \theta_{пд} + \Delta\theta$;

h , h_n – высота реального и пограничного слоя, м ; $h_n = 3d_3$;

d_3 – эквивалентный диаметр зерновки, м .

Температура неподогретого агента сушки t_0 может быть определена из балансовых уравнений охлаждения топki. Однако для ее расчета необходимо знать массу, поверхность теплообменных элементов топki и коэффициент теплопередачи, которые зачастую неизвестны. Возможен приближенный расчет t_0 на основе опытных данных:

$$t_0 = t_n + (5 \dots 12)^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где t_n – температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; 5°C в случае топki без теплообменника, а 12°C – с тепло-

обменником.

При несимметричном режиме величину $\tau_{\text{ок}}$ определяют из выражения, близкого по структуре (6), предварительно вычислив по (8) величину t_0 :

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{ch}{\alpha_1 f \eta_1 h_n} \ln \frac{\theta_2 - t_0}{\theta_1 - t_0}, \quad (9)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи при охлаждении, Вт/м²·°С;

η_1 – доля теплоты, возвращенная при охлаждении зерна.

Интенсификация процесса осциллирующей сушки в мобильной зерносушилке с одновременным энергосбережением может быть достигнута изотермическим режимом, который предполагает отлежку зерна перед осциллирующими циклами, в течение которого влага перемещается в оболочку и испаряется из нее без существенного термического сопротивления, так как оболочка в отличие от ядра имеет пористую структуру.

Для расчета минимальной длительности отлежки рассмотрим массоперенос в оболочке. Будем полагать, что для отлежки достаточно периода, за который оболочка зерновки, обезвоженной до равновесного влагосодержания, достигнет уровня, равного влагосодержанию ядра. При этом учтем, что при отлежке влагосодержание оболочки изменяется – от равновесного до текущего.

Массу влаги, перемещенную в оболочку, а затем испаренную из нее, можно записать как:

$$g_m = \frac{a'_m \rho (U - U'_p)}{R}, \quad (10)$$

где U , U'_p – текущее и среднее после отлежки влагосодержание оболочки, кг вл./кг сух.мат.;

a'_m – коэффициент диффузии влаги в оболочке, м²/с.

Этот поток влаги представим также в виде:

$$g_m = \frac{G dU}{F d\tau_{\text{от}}}, \quad (11)$$

где $G = V_{\text{об}} \rho$, а так как $\delta \ll R$, то $G \approx F \delta \rho$.

Приравняв правые части (10) и (11), после сокращения и интегрирования определим τ_i :

$$\tau_i = \frac{R \delta}{a'_m} \ln \frac{U_1 - U'_p}{U_2 - U'_p}. \quad (12)$$

Зная длительность отлежки τ_i , определим высоту надшахтного бункера (тепломассообменника):

$$H = \frac{4 \Pi_{\text{ш}} \tau_i}{\pi D_n \gamma},$$

где $\Pi_{\text{ш}}$ – производительность циркуляционного шнека, т/ч;

D_n – диаметр надсушильного бункера, м;

γ – объемная масса зерна, кг/м³.

Рассчитаем τ_i и H в мобильной зерносушилке типа SSI.

Примем: $R = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ м; $U_0 = 0,3$ кг/кг; $U_k = 0,16$ кг/кг; $U'_p = 0,14$ кг/кг; $a'_m = 0,2 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $\Delta U = 0,06$ кг/кг.

Получим: $\tau_i = 0,45$ ч.

При $\Pi_{\text{ш}} = 8$ т/ч; $\tau_i = 0,45$ ч; $D = 3,0$ м; $\gamma = 750$ кг/м³ получим $H \approx 0,7$ м.

Выводы. Осциллирующий способ сушки зерна позволяет повысить эффективность мобильной зерносушилки за счет повышенной температуры агента сушки, так как снижается длительность воздействия высокотемпературного агента сушки на зерно.

Для подготовки качественных семян и зерна длительность периода продувки высокотемпературным агентом сушки должна быть ограничена допустимой температурой нагрева $\theta'_{\text{пл}}$, которая на 3-5°С выше, чем при постоянной температуре агента.

Температура низкотемпературного агента сушки определяется теплообменом наружного воздуха с теплопринимающими поверхностями топки, а длительность периода воздействия на зерно ограничивают величиной его охлаждения, равной величине нагрева.

Изотермический режим осциллирующей сушки в мобильной зерносушилке предполагает отлежку зерна в надшахтном бункере, во время которой оболочка зерновки насыщается влагой до влагосодержания, равного влагосодержанию ядра зерновки, причем длительность отлежек регулируется производительностью циркуляционной норрии.

Литература:

1. Голубкович А.В., Павлов С.А., Бельняк Л.И., Марин Р.А. Осциллирующая сушка семян и зерна в колонковой сушилке СЗТ-16 // Инновационные технологии и техника нового поколения – основа модернизации сельского хозяйства: Сб. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – М.: ВИМ, 2011. – С. 385-399.
2. Голубкович А.В., Павлов С.А., Орехов А.П., Козлов В.И. Сушка семян рапса в карусельной сушилке при осциллирующем режиме // Техника в сельском хозяйстве. – 2011. – № 4. – С. 25-28.

3. 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 Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – М.: ВИМ, 2012. – С. 640-645.

4. Голубкович А.В., Павлов С.А., Лукин И.Д., Машковцев М.Ф. Расчет параметров осциллирующей сушки зерна в мобильной зерносушилке // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 5. – С. 28-29.

5. Черноиванов В.И., Орлик Л.С., Федорен-

ко В.Ф., Буклагин Д.С., Мишулов Н.П., Гольяпин В.Я., Колчина Л.М., Кузьмина Т.Н., Соловьева Н.Ф., Кокоченко В.В., Шилова Е.П., Казинникова Т.А., Измайлов А.Ю., Евтюшенков Н.Е., Лобачевский Я.П., Личман Г.И., Марченко Н.М., Марченко О.С., Ревенко Н.А., Сизов О.А. и др. Тенденции развития сельскохозяйственной техники за рубежом. Научный аналитический обзор: По матер. Междунар. vyst. «SIMA-2007»/Министерство сельского хозяйства РФ. М.: 2007.

6. 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.

7. Голубкович А.В., Павлов С.А. Оптимизация сушки зерна при осциллирующем режиме // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – № 1. – С. 10-13.

MODELLING OF HEAT AND MASS TRANSFER AT OSCILLATING DRYING IN MOBILE GRAIN DRYER

A.V.Golubkovich¹, I.A.Pekhal'skiy¹, I.D. Lukin², R.A.Marin¹

¹All-Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, e-mail: agolubkovich@yandex.ru

²Kirov Machinery Testing Station, Yubileynaya St., 1, set. Kirov region, 612080, Russian Federation

Features of heat and mass transfer in a grain dryer and in a kernel at oscillating drying, one of energy saving technologies, were considered. In comparison with widespread in agriculture technologies at constancy of agent of drying temperatures it allows to reduce energy consumption by 20 percent at preservation or increase in nameplate capacity of the dryer. It was noted that improvement of technology and technical means of drying are possible at mathematical modeling of processes of heat and mass transfer in a grain dryer with the subsequent transition to a grain layer. The basic conditions of ensuring safe seeds drying at an oscillating method are decrease in duration of influence of the high-temperature drying agent and increase in its temperature potential that increases intensity of process and reduces energy consumption. Calculated Characteristics of the grain drying mode and parameters of the dryer, including duration of the periods of oscillating drying, temperature highly- and the low-temperature agent of drying, the lying duration, height of the over-the-dryer hopper used as a heat and mass exchanger in the mobile dryer. Transfer of moisture and heat in a kernel and its cover at a bigger admissible temperature of grain heating in mathematical models in comparison with method at an invariable temperature of the drying agent were considered. Key parameters of process and the device in a mobile grain dryer were determined. To increase efficiency and energy saving drying should be carried out at a temperature of grain heating close to maximum permissible. Height of the over-the-dryer hopper) should be not less than 0.7 m.

Keywords: Oscillating drying; Grain; Mobile grain dryer; Heat and mass transfer.

References

1. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Belen'kaya L.I., Marin R.A. Ostsilliruyushchaya sushka semyan i zerna v kolonkovoy sushilke SZT-16 [Oscillating drying of seeds and grain in tower drier SZT-16]. Innovatsionnye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya – osnova modernizatsii sel'skogo khozyaystva: Sb. dokl. XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 1. Moscow: VIM, 2011. pp. 385-399 (Russian).

2. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Orekhov A.P., Kozlov V.I. Sushka semyan rapsa v karusel'noy sushilke pri ostsilliruyushchem rezhime [Rape seeds drying in rotary dryer at oscillating mode]. Tekhnika v sel'skom khozyaystve. 2011. No. 4. pp. 25-28 (Russian).

3. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. K metodu rascheta dlitel'nosti ostsilliruyushchey sushki [Revisiting method of calculation of oscillating drying duration]. Modernizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na baze innovatsionnykh mashinnykh tekhnologiy i avtomatizirovannykh sistem: Sb. dokl. XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 1. Moscow: VIM, 2012. pp. 640-645 (Russian).

4. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Lukin I.D., Mashkovtsev M.F. Raschet parametrov ostsilliruyushchey sushki zerna v mobil'noy zernosushilke [Calculation of parameters of grain oscillating drying in mobile grain-dryer] Traktory i sel'khoz mashiny. 2013. No. 5. pp. 28-29 (Russian).

5. Chernov Ivanov V.I., Orsik L.S., Fedorenko V.F., Buklagin D.S., Mishurov N.P., Gol'tyapin V.Ya., Kolchina L.M., Kuz'mina T.N., Solov'eva N.F., Kokochenko V.V., Shilova E.P., Kazinnikova T.A., Izmaylov A.Yu., Evtyushenkov N.E., Lobachevskiy Ya.P., Lichman G.I., Marchenko N.M., Marchenko O.S., Revenko N.A., Sizov O.A., et al. Tendentsii razvitiya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki za rubezhom [Tendencies of development of agricultural machinery abroad]. Nauchnyy analiticheskiy obzor: Po mater. Mezhdunar. vyst. «SIMA-2007». Ministerstvo sel'skogo khozyaystva RF. Moscow: 2007 (Russian).

6. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Optimizatsiya sushki zerna pri ostsilliruyushchem rezhime [Optimization of drying of grain at oscillating mode]. Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. 2014. No. 1. pp. 10-13 (Russian).