

УДК 63.128

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В ЗЕРНЕ ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СУШКЕ



МАРИН Р.А.,
аспирант

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

Среди инновационных режимов сушки семян и зерна приоритет принадлежит осциллирующим. Но наименее изучены режимы с периодическими отлежками, позволяющие существенно повысить эффективность сушки семян и зерна, в том числе и повышенной влажности. Исследования переноса влаги необходимы для обоснования режимов безопасной и интенсивной сушки. Реализация этих режимов позволяет определить допустимый коэффициент теплоотдачи и длительность периодических отлежек. Это обусловлено необходимостью снижения градиента поверхностного влагосодержания и температуры зерна. Длительность сушки определяется выражением, в которое входят коэффициент диффузии, радиус зерновки, толщина оболочки (обезвоженной зоны) и величины влагосодержания ядра и оболочки. После испарения влаги интенсивность и безопасность сушки снижаются, поэтому отлежка необходима для перераспределения влаги. При определенных условиях ширина зоны испарения оказывается значительно меньше характерного размера высушиваемого тела, так что эту зону можно заменить, например, толщиной оболочки зерна. На основе допустимого влагосъема и плотности теплового потока при интенсивной сушке получено аналитическое выражение для расчета максимального коэффициента теплоотдачи и, соответственно, скорости агента сушки, которая зависит от его высоты, удельной поверхности зерна и доли теплоты, поступающей на испарение влаги. Для условий сушки зерна в зерносушилках скорость агента сушки не должна превышать 0,6 м в секунду. Определены значения допустимой величины коэффициента теплоотдачи (не более 40 Вт на кв. м в пересчете на один градус) и длительности отлежек, равной 10 мин. Получено, что соотношение длительности периода нагрева и охлаждения зерна равно 10:10, оптимальное значение этого соотношения – 15:20.

Ключевые слова: зерно, осциллирующая сушка, перенос влаги, отлежка зерна.

Повышение эффективности технологии и технических средств сушки семян и зерна предусмотрено Системой машин, соответствует тенденции развития сельскохозяйственной техники и возможно на основе инновационных технологий и режимов [1-3]. Среди них получили распро-

странение осциллирующие методы, позволяющие существенно снизить затраты тепла на сушку и в ряде случаев повысить производительность технических средств [4-8]. В составе последних наименее изучены режимы с периодическими отлежками, которые в наибольшей степени подходят для семен-

ного зерна повышенной влажности [9-11].

В общем случае исследование аспектов переноса влаги в зерновке связано с решением весьма сложной задачи движения двухфазной газожидкостной смеси при наличии фазового перехода и одновременного переноса тепла в трехфазной системе. Эта задача – нелинейная, так как коэффициенты в уравнениях движения и конвективной теплопроводности зависят от температуры, влагосодержания и других неизвестных величин.

Решения, которые могут быть получены лишь в частных случаях и имеют весьма громоздкий вид, затрудняют их практическое использование. Вместе с тем в ряде случаев такие факторы, как адсорбционно-связанная влага, перемещение жидкости в порах и другие, несущественны. Поэтому можно представить адекватные модели процессов, позволяющие получить корректные результаты, достаточные для практических целей. Так, для обоснования безопасного влагосъема можно рассматривать перенос влаги по допустимому влагосъему не более 6% за время непрерывной сушки.

Жидкость испаряется в узкой зоне, которая распространяется внутрь зерновки, но при этом интенсивность процесса снижается. Во время отлежки эта зона насыщается влагой, что позволяет повысить интенсивность и безопасность сушки.

Цель исследования – расчет допустимого значения коэффициента теплоотдачи, скорости агента сушки и длительности периодических отлежек при осциллирующей сушке и экспериментальная проверка показателей.

Расчет коэффициента теплоотдачи. В начале процесса сушки удаление влаги из семян идет быстро, однако мало влияет на изменение их качества. Установлено, что любое интенсивное (2-3%) удаление влаги с верхних покровов зерна многих сельскохозяйственных культур не отражается на их качестве [13]. Изменение влажности при одних и тех же условиях с течением времени замедляется. При этом качественные изменения материала зависят не от абсолютного съема влаги, а от величины отношения $\Delta W/W_n$, где ΔW – съем влаги, %; W_n – начальная влажность зерна, %. Поэтому допустимое уменьшение влажности зерна как функцию времени следует выражать не через среднюю скорость сушки, а через некоторую величину влагосъема.

Установлено, что для пшеницы повышенной влажности ($W \geq 23-24\%$) величину ΔW можно выразить как $\Delta W = 0,185 \tau + 3,0$, где τ – время сушки, мин.

Таким образом, у менее влажного зерна пшеницы с достаточной для практики точностью можно считать, что допустимый влагосъем зависит от начальной влажности зерна.

Для расчета допустимого влагосъема в зернов-

ке и определения безопасной скорости агента сушки будем полагать, что равенство скоростей миграции влаги к поверхности зерновки и отвода паров от поверхности обеспечат транспорт влаги в виде жидкости (первый период сушки), жидкости и пара (второй период сушки) без повреждения тканей семени и зародыша. Для этого рассмотрим приближенные модели тепломассопереноса в зерновке.

Физическая модель. Как только температура поверхности зерновки достигнет температуры адиабатического насыщения воздуха (температуры мокрого термометра), начинается первый период сушки, в котором агент сушки у поверхности зерновки насыщен водяными парами, а скорость процесса лимитируется скоростью их отвода от поверхности испарения в ядро потока сушильного агента. В этом периоде влага преимущественно из периферийных оболочек зерновки перемещается к поверхности, испаряется, а пары отводятся агентом сушки. Если в первом периоде граница испарения не перемещается, то во втором она углубляется внутрь зерновки.

Большая часть зерна, поступающая на сушку, имеет влажность меньше гигроскопической, поэтому допустимую величину скорости сушки можно записать в виде $\frac{dW}{d\tau} = 0,185$, а величину влагосъема – как $\Delta U = \frac{W_n - W_k}{100 - W_k}$,

где W_n – начальная влажность,
 W_k – конечная влажность, %.

При сушке зерна от 20 до 14% влагосъем составит:

$$\Delta U = 0,13 \tau, \quad (1)$$

где ΔU – влагосъем, кг вл./кг сух. мат.

Математическая модель. При конвективной сушке температурный градиент мал, и интенсивность сушки численно равна плотности потока теплоты, подводимого к поверхности зерновки, который можно записать следующим образом [13]:

$$-\frac{dW}{d\tau} = \frac{\alpha(t - \theta_{cp})S\eta}{G\rho r}, \quad (2)$$

где dW – влажность зерна, %;

$d\tau$ – время, ч;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;

ρ – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

S – площадь поверхности зерна, м²;

G – масса сухого вещества зерна, кг;

η – доля теплоты на испарение влаги;

t, θ_{cp} – температура агента сушки и средняя температура зерна, °С;

r – теплота парообразования, кДж/кг влаги.

Приняв форму зерновки шарообразной, заме-

ним комплекс на удельную поверхность f (м²/кг) и получим из (2):

$$\Delta U = \frac{3 \alpha f (t - \theta_{cp}) \tau \eta}{r}, \quad (3)$$

где $\eta = \frac{Q_{ис}}{Q_{ис} + Q_n}$ ($Q_{ис}$, Q_n – теплота на испарение влаги и нагрев зерна, Вт).

Для слоя зерна высотой H влагосъем, соответственно, равен:

$$\Delta U = \frac{3 \alpha f (t - \theta_{cp}) \tau \eta H}{r h_0}, \quad (4)$$

где h_0 – высота пограничного слоя ($h_0 = 2 \dots 3 d_3$, d_3 – эквивалентный диаметр зерновки, м).

Приравнивая правые части (1) и (4) относительно α , запишем:

$$\alpha = \frac{0,13 r H}{3 f (t - \theta_{cp}) \eta h_0}. \quad (5)$$

Величина α характеризует допустимую интенсивность теплоотдачи при постоянном температурном режиме сушки. Приняв во внимание, что при осциллировании температура зерна θ_{cp} в круглых скобках выражения (5) близка к предельно допустимой $\theta_{пд} = const$, получим допустимую величину α' для осциллирующего теплоподвода.

Зная значения α и α' , можно определить величину допустимой скорости агента сушки V_d как для постоянного, так и переменного V'_d теплоподвода.

Предварительно вычислив число Нуссельта ($Nu = \frac{\alpha d_3}{\lambda}$), значение которого для плотного зернового слоя $Nu = 0,075 Re$, где $Re = \frac{V_d d_3}{\nu}$ – число Рейнольдса, можно будет определить V_d , м/с.

Значение $V_d = 0,5$ м/с при сушке селекционных семян рекомендовано в работе [14].

Расчет длительности отлежки

При осциллирующем режиме существенное влияние на процесс оказывает длительность отлежки, которая должна быть достаточной для перераспределения влаги в зерновках с насыщением поверхностной зоны (оболочки). Последнее не только обеспечивает безопасность сушки, но и позволяет интенсифицировать процесс.

Физическая модель. Под действием концентрационной диффузии влага из ядра при отлежке перемещается в оболочку, обезвоженную до U_p (где U_p – равновесное влагосодержание, кг/кг), и увлажняет ее до U_k (где U_k – кондиционное влагосодержание, кг/кг). Полагая, что влагосодержание оболочки $U_k \approx const$ и ядра $U_{яд} \approx const$, рассчитаем $\tau_{от}$ и обеспечим при осциллировании энергосберегающий режим сушки.

Ввиду цикличности процесса заменим величину влагосодержания ядра начальной стадии U_0 на

среднее значение $U_{cp} = \frac{U_0 + U_k}{2}$, а влагосодержание

оболочки – на кондиционное.

Математическая модель. Массу влаги, перемещенной из ядра в оболочку при отлежке, запишем в виде:

$$dM = \frac{a_m \rho (U_{cp} - U_p)}{2(R - \delta)}, \quad (6)$$

где a_m – коэффициент диффузии, м²/с;

ρ – плотность влаги, кг/м³;

δ – толщина оболочки, м.

Или:

$$dM = \frac{G_B dU}{d\tau_{от} F}, \quad (7)$$

где G_B – масса влаги, кг;

$d\tau_{от}$ – длительность отлежки, с;

F – площадь массообменной поверхности оболочки, м².

Величину G_B можно представить в виде:

$$G_B = V_0 \rho \approx \delta F \rho, \quad (8)$$

где V_0 – объем оболочки.

Приравнивая правые части выражений (6) и (7), после интегрирования и упрощения запишем:

$$\tau_{от} = \frac{2 \delta_3 (R - \delta)}{a_m} \ln \frac{U_{cp} - U_p}{U_k - U_p}. \quad (9)$$

При разработке моделей переноса влаги в зерновке принят ряд допущений. Допущения были сделаны также при выборе влагосодержания, в пределах которых рассчитывали $\tau_{от}$. В связи с этим были поставлены экспериментальные исследования, в которых изучали массоперенос в зерновке.

Целью экспериментальных исследований стала апробация расчетного выражения длительности отлежки для режимов осциллирующей сушки.

Исследовали поля влажности в зерновке для трех основных режимов осциллирующей сушки: без отлежек, с отлежкой нагретого зерна и с отлежкой охлажденного зерна. Изучили механизмы влагопереноса для этих режимов.

Материалы и методы. Программа работ предусматривала сушку увлажненного зерна пшеницы влажностью 20 и 24% в тонком слое (~10 мм) до 13-14% при следующих режимах:

- осциллирующий режим без отлежек с соотношением периодов нагрева и охлаждения 1:1 при экспозиции нагрева (охлаждения) 5; 10; 20 и 40 мин;
- осциллирующий режим с отлежками длительностью 5; 10; 20 и 40 мин после периода нагрева с указанными выше экспозициями;
- осциллирующий режим с отлежками длительностью 5; 10; 20 и 40 мин после периода охлаждения с указанными выше экспозициями;
- режим с постоянной температурой.

Методика исследований предусматривала через каждые 2-10 мин вентилирования зерна агентом сушки или воздухом (при охлаждении) отбор из кассеты навески зерна. Затем, удерживая пинцетом зерновку, срезали оболочку определяли влажность оболочки, ядра и зерновки. Причем масса срезаемых оболочек составляла не менее 0,5 г, масса ядер и зерен – по 5 г; погрешность взвешивания навесок из оболочек – $1 \cdot 10^{-4}$ г, навесок из ядер и зерновок – $1 \cdot 10^{-3}$ г. Скорость агента сушки – 0,5 м/с, температура агента сушки для осциллирующих режимов – 65°C, для режима с постоянной температурой – 55°C (семенной режим). Температура наружного воздуха, соответственно, 25 и 20°C.

Опыты проводили на лабораторной установке, в конструкции которой имеются кассета с решетчатым дном диаметром 120 мм и высотой 0,2 м, калорифер и вентилятор. Увлажненную навеску засыпали в кассету, продували агентом сушки, высушивая до кондиционной влажности, периодически отбирая навески для определения влажности. Осциллирующий режим осуществляли периодическим отключением и включением калорифера. Температура агента сушки поддерживалась автоматически.

Результаты и обсуждение. Кривые изменения влажности зерновки и ее частей при сушке приведены на *рисунке 1*. Из графика видно, что влаж-

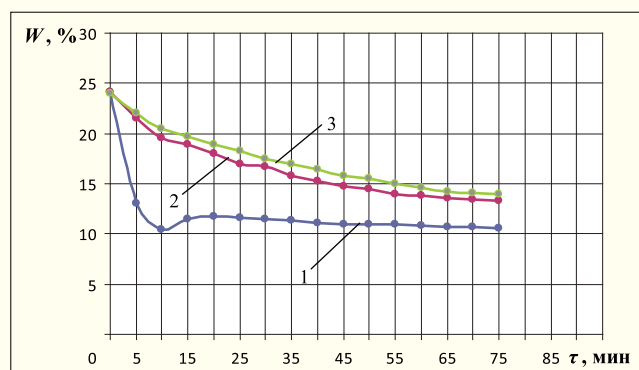


Рис. 1. Изменение влажности W в зависимости от времени τ при осциллирующей сушке: 1 – оболочки, 2 – ядра, 3 – зерновки

ность оболочки сначала резко снижается, затем слегка повышается, а потом постепенно уменьшается.

Это явление может быть объяснено следующим образом. Уже в первом периоде процесса происходит углубление объема, из которого испаряется влага. Скорость этого углубления возрастает с увеличением интенсивности влагоотдачи. Вследствие энергичного нагрева на поверхности зерна возникает значительный температурный градиент. Резкое уменьшение влагосодержания поверхностного

слоя происходит в результате интенсивного испарения влаги с поверхности зерна.

Углубление зоны испарения приводит к возрастанию гидродинамического сопротивления поверхностной пленки и к структурным изменениям слоя, вследствие чего возможно некоторое увеличение в этом слое концентрации влаги, более интенсивно мигрирующей из внутренних слоев к зоне испарения из-за заметного увеличения коэффициента диффузии.

Проведенные исследования показывают, что режим сушки оказывает существенное влияние на поле влагосодержания. Жесткий режим приводит к пересушиванию поверхности зерна, более интенсивному углублению поверхности испарения, созданию больших градиентов влажности. Поэтому целесообразно увеличивать количество удаляемой влаги, повышая высоту слоя, а не температуру агента сушки. С этой же точки зрения сушку зерна высокой влажности ($W > 25\%$) рационально вести при более мягких режимах, чтобы поверхность испарения располагалась возможно ближе к геометрической поверхности материала.

От режима сушки зависит характер распределения влаги в зерне и, соответственно, изменяется величина поверхностного градиента влагосодержания. При жестких режимах сушки высоковлажного зерна интенсивный теплообмен с поверхностью продукта вызывает соответствующее испарение влаги, находящейся в капиллярах оболочек (стыковая влага макропор либо влага капиллярного состояния), что может привести в дальнейшем к превышению допустимой температуры, усадке и снижению качества зерна.

Благодаря пористой структуре оболочка зерновки легко насыщается при отлежке и легко отдает влагу при сушке. При увлажнении она существенно увеличивает свою толщину (с 0,07 до ~0,12 мм), в результате аккумулируется достаточно большое количество влаги. Оболочка служит своеобразным «насосом»: если чередовать периоды отлежки и вентилирования, то будет осуществлен изотермический режим и снижены удельные затраты тепла при сохранении качественных показателей семян.

В общем случае осциллирующий режим сушки обуславливает более мягкие условия обезвоживания зерновки из-за меньшей интенсивности испарения, что благоприятно сказывается на сохранении качественных показателей зерна. В случае отлежки допускается не только интенсификация процесса, но и влагосъем более 6%.

Разность влажностей ΔW между ядром и оболочкой является определяющим фактором при выборе режима сушки: чем она ниже, тем меньше поверхностный градиент влагосодержания и тем мень-

ше вероятность механических повреждений оболочки и трещинообразования в зерновках крупносеменных культур. Минимальная величина ΔW характерна для режима с отлежкой после периода охлаждения. После периода нагрева ΔW несколько возрастает, достигая максимальной величины при осциллирующем режиме без отлежек. Без сомнения, снижение величины ΔW повышает безопасность процесса сушки, в частности семенного зерна.

После нагрева оболочка зерновки достигает

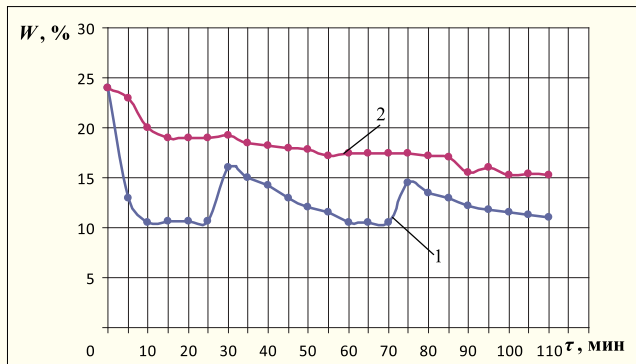


Рис. 2. Изменение влажности зерновки при осциллирующем режиме с отлежкой подогретого зерна: 1 – оболочка; 2 – ядро; длительность отлежки – 10 мин

влажности, близкой к равновесной, при отлежках намечаются резкие скачки ее значений. Причем амплитуда этих скачков со временем уменьшается (рис. 2).

Следует отметить существенное повышение влажности оболочки после отлежки и некоторое снижение влажности ядра. Эти изменения характерны для всего периода сушки, но наибольшее изменение амплитуды ΔW установлено в начале процесса.

Для практической реализации осциллирующих режимов в зерносушилках важное значение имеет обоснованная величина длительности отлежки. Естественно, чем она меньше, тем ниже стоимость зерносушильного оборудования и выше пропускная способность сушилки. Однако с увеличением длительности отлежки происходит более полное выравнивание полей влажности в зерновках с последующей интенсификацией процесса и повышается безопасность сушки.

Зависимость изменения ΔW от времени отлежки приведена на рисунке 3. Можно отметить, что вначале величина ΔW возрастает прямо пропорционально $\tau_{от}$, затем экспоненциально снижается и после 40 мин практически не меняется. На наш взгляд,

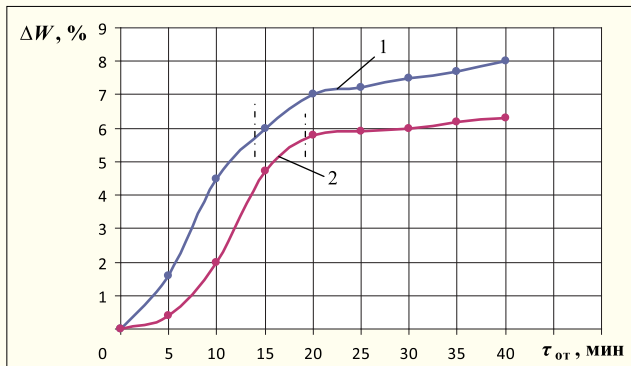


Рис. 3. Изменение $\Delta W = (W_{я} - W_{об})$ в зависимости от длительности отлежки $\tau_{от}$: 1, 2 – после подогрева и охлаждения зерна соответственно; длительность периодов нагрев-охлаждение – 10:10 мин; - - - - - расчетные значения $\tau_{от}$

целесообразно ограничиться величиной $\tau_1=15$ мин и $\tau_2=20$ мин, соответственно, для режима осциллирования с отлежкой после периода нагрева и для периода охлаждения, где ΔW возрастает прямо пропорционально изменению $\tau_{от}$.

Отметим, что отлежка затягивает процесс сушки, повышает стоимость зерносушилки (необходимы камеры отлежки при поточной работе или вместительный надсушильный бункер при циклической работе сушилки). Очевидно, что чем больше длительность отлежки, тем выше влагосъем, но в конечном итоге целесообразно ограничиться отлежкой, при которой влагосъем возрастает прямо пропорционально времени.

Установлено, что рассчитанная длительность отлежки обеспечивает перемещение до 85% всей влаги в течение 40 мин в зерне, как после периода подогрева, так и после охлаждения [9].

Выводы. В ходе исследования получено аналитическое выражение для расчета максимального коэффициента теплоотдачи и, соответственно, скорости агента сушки как с постоянным, так и переменным теплоподводом.

Допустимая скорость агента сушки в плотном слое зерна зависит от высоты слоя, удельной поверхности зерна, его температуры и доли теплоты, поступающей на испарение влаги. В условиях сушки, характерных для зерносушилок, величина скорости агента сушки не должна превышать 0,6 м/с.

Отлежка обусловлена необходимостью снижения градиента поверхностного влагосодержания и температуры зерна. Ее длительность определяется выражением, в которое входят коэффициент диффузии, радиус зерновки, толщина оболочки обезвоженной зоны и влагосодержание зерна.

Литература

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. Черноиванов В.И., Орси́к Л.С., Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Мишу́ров Н.П., Голья́пин В.Я., Колчина Л.М., Кузьмина Т.Н., Соловьева Н.Ф., Кокоченко В.В., Ши́лова 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 // *Научно-аналитический обзор (По материалам Международной выставки «SIMA-2007»)* – М.: Росинформагротех, 2007. – 308 с.
3. Мазитов Н.К., Лобачевский Я.П., Саханов Р.Л., Шарафиев Л.З., Садриев Ф.М., Салахов А.Ф., Дмитриев С.Ю., Рахимов З.С. Эффективность инновационной технологии производства продукции растениеводства в условиях ВТО – при низкой себестоимости и высокой рентабельности на основе использования отечественной техники // *Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2.* – М.: ВИМ, 2013. – С. 50-54.
4. Голубкович А.В., Павлов С.А., Беленькая 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. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1.* – М.: ВИМ, 2011. – С. 392-399.
5. 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.
6. Пат. № 2539860 РФ. Способ осциллирующей сушки зерна и устройство для его осуществления / Павлов С.А., Голубкович А.В., Лукин И.Д., Машковцев М.Ф. // *Бюл.* 2015. № 3.
7. Пат. № 2559003 РФ. Способ комбинированной сушки семян и зерна / Голубкович А.В., Павлов С.А., Мазаева Г.В., Тараканова Л.А., Нурбагандова Р.М., Сунгатуллина В.Н. // *Бюл.* 2015. № 22.
8. 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.
9. Голубкович А.В., Павлов С.А. Оптимизация сушки зерна при осциллирующем режиме // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2014. – № 1. – С. 10-14.
10. Голубкович А.В., Пехальский И.А., Лукин И.Д., Марин Р.А. Моделирование тепло- и массопереноса при осциллирующей сушке зерна в мобильной зерносушилке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2015. – № 5. – С. 25-28.
11. Елизаров В.П., Павлов С.А., Марин Р.А., Дядыко А.Н. Сушка зерна с переменным теплоподводом в колонковой зерносушилке // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2015. – № 12. – С. 24-26.
12. Птицын С.Д. Зерносушилки. – М.: Машиз, 1962. – 180 с.
13. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
14. Гамхошвили Р.М. Обоснование технологических и конструктивных параметров и разработка универсальной установки для сушки селекционных семян сельскохозяйственных культур: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1975. – 21 с.

RESEARCH OF MOISTURE TRANSFER IN GRAIN AT OSCILLATING DRYING

R.A. Marin

All-Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru

Among the innovative modes of seeds and grain drying the priority belongs to the oscillating one. But the modes with periodic lying allowing to increase significantly efficiency of seeds and grain drying including the increased moisture are least studied. Researches of moisture transfer are necessary for justification of the modes of safe and intensive drying. Realization of these modes allows to define heat-transfer coefficient and lying periods duration. It is caused by need of decrease in a gradient of surface moisture content and temperature of grain. Drying duration can be defined by equation which enter diffusion coefficient, the caryopsis radius, hull thickness (the dehydrated zone) and the size of moisture content of a kernel and a hull. After moisture evaporation intensity and safety of drying decrease therefore the lying is necessary for moisture redistribution. Under certain conditions width of an evaporation zone turns out to be much less characteristic size of the dried-up body so this zone can be replaced, for example, with grain hull thickness. On the basis of an admissible moisture removal and density of a thermal stream at intensive drying analytical expression was received. It can be used for calculation of the maximum heat-transfer coefficient and, respectively, of the drying agent speed which depends on its height, a specific surface of grain and

a share of the warmth required for moisture evaporation. For conditions of drying of grain in the grain dryers the speed of the drying agent should not exceed 0.6 m per a second. The authors defined values of admissible size of heat-transfer coefficient (no more than 40 W per sq. m in terms of one degree) and lyings duration which is equal 10 min. The ratio of duration of the period of heating and cooling of grain is equal 10:10, optimum value of this ratio is 15:20.

Keywords: Grain; Oscillating drying; Moisture transfer; Grain lying.

References

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. *Perspektivnye puti primeneniya energo- i ekologicheskikh effektivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv [Long-term ways of use of energy and environmentally efficient machine technologies and techniques]*, *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013. No. 4. pp. 8-11 (Russian).
2. Chernoi 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., Evtushenkov 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'sko khozyaystvennoy tekhniki za rubezhom [Trends in development of agricultural machinery abroad]*. *Nauchno-analiticheskiy obzor (Po materialam Mezhdunarodnoy vystavki «SIMA-2007»)*. Moscow: Rosinformagrotekh, 2007. 308 pp. (Russian).
3. Mazitov N.K., Lobachevskiy Ya.P., Sakhapov R.L., Sharafiev L.Z., Sadriev F.M., Salakhov A.F., Dmitriev S.Yu., Rakhimov Z.S. *Effektivnost' innovatsionnoy tekhnologii proizvodstva produktsii rastenievodstva v usloviyakh VTO – pri nizkoy sebestoimosti i vysokoy rentabel'nosti na osnove ispol'zovaniya otechestvennoy tekhniki [Efficiency of innovative production technology of production of plant industry in conditions of WTO – at low prime cost and high profitability on basis of domestic machinery use]*. *Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 2*. Moscow: VIM, 2013. pp. 50-54 (Russian).
4. 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. 392-399 (Russian).
5. 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).
6. Pat. № 2539860 RF. *Sposob ostsilliruyushchey sushki zerna i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Way of oscillating grain drying and the device for its implementation]*. Pavlov S.A., Golubkovich A.V., Lukin I.D., Mashkovtsev M.F. *Byul.* 2015. № 3.
7. Pat. № 2559003 RF *Sposob kombinirovannoy sushki semyan i zerna [Way of combined drying of seeds and grain]*. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Mazaeva G.V., Tarakanova L.A., Nurbagandova R.M., Sungatullina V.N. *Byul.* 2015. № 22.
8. 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).
9. 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).
10. Golubkovich A.V., Pekhal'skiy I.A., Lukin I.D., Marin R.A. *Modelirovanie teplo- i massopere nosa pri ostsilliruyushchey sushke zerna v mobil'noy zernosushilke [Modeling of heat and mass transfer at oscillating drying of grain in mobile dryer]*. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2015. No. 5. pp. 25-28 (Russian).
11. Elizarov V.P., Pavlov S.A., Marin R.A., Dadyko A.N. *Sushka zerna s peremennym teplo podvodom v kolonkovoy zernosushilke [Grain drying with a variable heatsupply in tower dryer]*. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No. 12. pp. 24-26 (Russian).
12. Ptitsyn S.D. *Zernosushilki [Grain dryers]*. Moscow: Mashgid, 1962. 59 pp. (Russian).
13. Sazhin B.S. *Osnovy tekhniki sushki [Bases of drying technology]*. Moscow: Khimiya, 1984. 320 pp. (Russian).
14. Gamkhoshvili R.M. *Obosnovanie tekhnologicheskikh i konstruktivnykh parametrov i razrabotka universal'noy ustanovki dlya sushki selektsionnykh semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Justification of technological and design characteristics and development of universal imachine for drying of selection seeds of crops]*. *Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk*. Moscow, 1975. 21 pp. (Russian).