11. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна: учеб. пособие / Н.И. Малин. – М.: КолосС, 2004. – 240 с.
12. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения: сокр. пер. с нем. / В. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер; пер. В.М. Комиссаров, Ю.Л. Фрегер; под ред. В.Г. Евдокимова. – М.: Машиностроение, 1979. – 525 с.
13. Рейтман И.Г. Дыхание и теплофизические свойства массы свежесорванных шишек хмеля / Сборник научных трудов // Научно-исследовательский и технологический институт хмелеводства. – Киев, 1981. Вып. 3: Хмелеводство. – С. 55-59.
14. Скороваров, М.А. Режимы сушки зерна / М.А. Скороваров; под ред. Б.В. Даммана. – М.: Хлебоиздат, 1959. – 68 с.
15. Трисвятский, Л.А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов: учебник / Л.А. Трисвятский, Б.В. Лесик, В.Н. Курдина, под ред. Л.А. Трисвятского. 4 изд. перераб. и доп. – М.: ВО Агропромиздат, 1991. – 415 с.
16. Филоненко, Г.К. Сушка пищевых растительных материалов: учеб. пособие / Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Я.М. Гольденберг и др. – М.: Изд-во «Пищевая промышленность», 1971. – 440 с.

Малин Н.И.

Использование метода «оптимальных» конечных параметров в моделировании кинетики двухступенчатой сушки зерна

*Российский государственный аграрный университет-Московская
сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-06-2020-93

idsp: ljjournal-06-2020-93

Аннотация

Дано описание сущности разработанного автором метода «оптимальных» конечных параметров и возможностей использования полученных на его основе обобщенных функциональных зависимостей эффективности обезвоживания и нагрева зерна для оценки сравнительной энергоэффективности различных вариантов и режимов сушки зерна. Отмечено, что описание кинетики двухступенчатой сушки зерна, в условиях использования агента сушки с изменяющимися по ходу процесса параметрами, вызывает, в отличие от описания одноступенчатой сушки, определенные трудности. Это связано с тем, что во вторую ступень сушки поступает зерно с частично обезвоженной поверхностью и повышенной, в сравнении с начальным значением, температурой. Доказана возможность и достаточная надежность использования метода «оптимальных» конечных параметров для моделирования процесса двухступенчатой сушки зерна. Для сравнительной оценки использованы результаты расчета одноступенчатой сушки зерна с усредненными по ступеням сушки параметрами агента сушки.

Ключевые слова: сушка зерна; эффективность обезвоживания; эффективность нагрева; кривая сушки; термограмма; моделирование.

Abstract

The essence of the method of «optimal» final parameters developed by the author and the possibilities of using the generalized functional dependences of the efficiency of dehydration and heating of grain obtained on its basis to assess the comparative energy efficiency of various options and modes of drying the grain are described. It is noted that the description of the kinetics of two-stage drying of grain, under conditions of using a drying agent with parameters varying during the process, causes, in contrast to the description of one-stage drying, certain difficulties. This is due to the fact that grain with a partially dehydrated surface and increased temperature in comparison with the initial value enters the second stage of drying. The possibility and sufficient reliability of using the method of «optimal» final parameters for modeling the process of two-stage drying of grain is proved.

For a comparative assessment, we used the results of calculating a single-stage drying of grain with the drying agent parameters averaged over the steps of drying.

Keywords: grain drying; dehydration efficiency; heating efficiency; drying curve; thermogram; modeling.

Действующая Инструкция по сушке зерна [1], ориентированная на все отечественные шахтные прямоточные и рециркуляционные зерносушилки, используемые на элеваторах, хлебоприемных, зерноперерабатывающих и других предприятиях АПК аналогичного функционального назначения, включая сельскохозяйственное производство, предусматривает возможность использования как одноступенчатых, так и двухступенчатых режимов сушки.

В исследовательской практике, для анализа кинетики сушки зерна, как и любых других влажных материалов, принято использовать совокупность трех кривых, в числе которых: кривая сушки (абсолютная влажность, то есть влажность в расчете на массу сухого вещества зерна, как функция времени); температурная кривая (температура зерна, как функция меняющихся в процессе сушки значений его абсолютной влажности), или, как более предпочтительный вариант – термограмма (температура зерна, как функция времени); кривая скорости сушки (скорость сушки, как функция абсолютной влажности зерна). Значения последней определяются путем обработки кривых сушки по специальной методике. Для построения кривых сушки и термограмм используются полученные экспериментально функциональные временные зависимости, соответственно абсолютной влажности и температуры зерна [2, с. 22].

В условиях моделирования процесса одноступенчатой сушки зерна (то есть при наличии соответствующих математических моделей), процедура построения кривых сушки и термограмм не вызывает проблем. При необходимости моделирования процесса двухступенчатой сушки возникают определенные проблемы, связанные с тем, что во вторую ступень (во вторую зону) сушки поступает зерно с частично обезвоженной поверхностью и с температурой, отличающейся от температуры зерна на начальном этапе сушки.

Один из возможных вариантов моделирования кинетики двухступенчатой сушки в шахтных рециркуляционных зерносушилках показал [3] практически абсолютное совпадение конечных значений влажности зерна (с относительной погрешностью $\delta = 0,31\%$) и вполне допустимую для инженерных расчетов относительную погрешность ($\delta = 4,40\%$) при определении конечных значений температуры зерна на выходе из 2 зоны (ступени) сушки в условиях одноступенчатой (при средней для 1 и 2 ступеней температуре агента сушки t_{cp}) и двухступенчатой сушки (при последовательном сочетании рекомендуемых для 1 и 2 ступеней температуре агента сушки t_{1c+2c}).

Другой вариант сравнительных расчетов в условиях моделирования кинетики двухступенчатой сушки в шахтных прямоточных зерносушилках показал наличие относительной погрешности $\delta = 1,4\%$ при определении конечных значений влажности зерна и $\delta = 2,39\%$ при определении конечных значений температуры зерна [4].

Возможной причиной наличия указанных погрешностей (особенно по конечным значениям температуры: 4,4% для шахтной рециркуляционной зерносушилки и 2,39% для шахтной прямоточной зерносушилки) является несоответствие принимаемых в расчет значений влажности зерна и его температуры, которая используется в качестве начальной точки отсчета при переходе от первой ступени ко второй ступени сушки, то есть от температуры агента сушки t_{1c} к температуре t_{2c} . Кроме того, определенное, правда незначительное, влияние оказывает численное значение фактического времени перехода от первой ступени сушки ко второй (то есть когда оно не в целых единицах).

С целью исключения указанных недостатков предпринята попытка проверки возможности использования для моделирования процесса двухступенчатой сушки зерна метода «оптимальных» конечных параметров [2, с. 66-87, 95-97, 161-164].

Особенностью этого метода является возможность получения обобщенных зависимостей эффективности обезвоживания и нагрева зерна, с использованием соответствующих коэффициентов k_w и k_θ , измеряемых в долях единицы.

В частности, коэффициент эффективности влагосъема, учитывающий взаимосвязь исходной w_0^c и текущей w^c влажности в расчете на массу сухого вещества зерна (так называемой абсолютной влажности), определяется из соотношения:

$$k_w = (w_0^c - w^c) / (w_0^c - w_{2\text{опт}}^c), \quad (1)$$

где $w_{2\text{опт}}^c$ – конечная «оптимальная» влажность в расчете на массу сухого вещества зерна (%) при $k_w = 1$.

Коэффициент эффективности нагрева зерна k_θ , учитывающий взаимосвязь начальной θ_0 и текущей θ температуры зерна, определяется из соотношения:

$$k_\theta = (\theta - \theta_0) / (\theta_{2\text{опт}} - \theta_0), \quad (2)$$

где $\theta_{2\text{опт}}$ – конечная «оптимальная» температура зерна (°C) при $k_\theta = 1$.

Значения «оптимальных» значений влажности $w_{2\text{опт}}^c$ и температуры $\theta_{2\text{опт}}$ определяются экспериментальным путем, как функции основных параметров, определяющих условия проведения процесса сушки. В их числе могут быть: температура, скорость (как вариант, массовая скорость) и влагосодержание агента сушки; начальная влажность и температура поступающего в зону сушки зерна; толщина и состояние слоя зерна; другие параметры, учитывающие конструктивные и режимные особенности организации и проведения процесса сушки.

По результатам обработки экспериментальных данных (кривых сушки и термограмм), устанавливаются обобщенные (с учетом влияния всех перечисленных факторов) функциональные временные зависимости вида: $k_w = f(\tau)$ и

$k_\theta = f(\tau)$, использование которых позволяет, для заданных условий моделирования процесса сушки, получить зависимости вида:

$$w^c = w_0^c - k_w (w_0^c - w_{2\text{опт}}^c); \quad (3)$$

$$\theta = \theta_0 + k_\theta (\theta_{2\text{опт}} - \theta_0). \quad (4)$$

Для иллюстрации возможностей описываемого метода, на рис. 1 и 2 представлены, соответственно, обобщенные (как функции времени сушки) зависимости k_w и k_θ , а также частные случаи этих коэффициентов для условий использования агента сушки с температурой $t_{1c} = 130$ °C и $t_{2c} = 150$ °C.

Последующая обработка зависимостей вида (3) и (4) позволяет оценить энергетическую и экономическую эффективность сравниваемых вариантов сушки зерна.

С учетом изложенного, весьма важной представлялась проверка возможности использования метода «оптимальных» конечных параметров для моделирования процесса двухступенчатой сушки зерна.

Для этого были проведены расчеты, где в качестве исходных данных был принят вариант двухступенчатой сушки в шахтной прямоточной зерносушилке типа ДСП-32 от зерна пшеницы с абсолютной влажностью $w_0^c = 25,00\%$ и температурой зерна $\theta_0 = 5,0$ °C на входе в первую зону сушки, при рекомендуемой [1] предельной температуре нагрева зерна $\theta_2 = 60$ °C, в условиях использования агента сушки с температурой: в первой зоне сушки $t_{1c} = 130$ °C; во второй зоне сушки $t_{2c} = 150$ °C; средней, для условий одноступенчатой сушки в течение времени пребывания зерна в 1с и 2с зонах сушки, то есть при $\tau_{(1c+2c)}$, $t_{cp} = 137,7$ °C.

Рисунок 1 – Эффективность сушки зерна при различной температуре агента сушки

При расчете t_{cp} , на основе использования данных по времени пребывания зерна в первой (1с) и второй (2с) зонах (ступенях) сушки (τ_{1c} и τ_{2c}), а также значений температуры (t_{1c} , t_{2c}) и скорости агента сушки на входе в подводящие короба ($v_{п.к.1c} = v_{п.к.2c}$), была использована формула:

$$t_{cp} = \frac{t_{1c} v_{п.к.1c} \tau_{1c} + t_{2c} v_{п.к.2c} \tau_{2c}}{v_{п.к.1c} \tau_{1c} + v_{п.к.2c} \tau_{2c}}. \quad (5)$$

При этом, для расчета значений времени τ_{1c} и τ_{2c} были использованы данные по суммарной продолжительности пребывания зерна в 1с и 2с зонах сушки ($\tau_{(1c+2c)} = 52$ мин) и полезной вместимости зон сушки при насыпной плотности зерна пшеницы $\rho_n = 750 \text{ кг / м}^3$, соответственно, $E_{1c} = 16\,000 \text{ кг}$ и $E_{2c} = 10\,200 \text{ кг}$: $\tau_{1c} = 31,8 \approx 32,0$ мин; $\tau_{2c} = 52,0 - 31,8 = 20,2 \approx 20,0$ мин (округление до целых единиц было сделано с целью устранения возможных проблем при графическом построении процесса перехода между ступенями сушки).

Рисунок 2 – Эффективность нагрева зерна при различной температуре агента сушки

На первом этапе расчетов, на основе обработки приведенных на рис. 1 и 2 обобщенных функциональных временных значений коэффициентов эффективности влагоудержания k_w и нагрева k_θ , на эти рисунки были нанесены конечные значения k_w и k_θ , рассчитанные для $t_{cp} = 137,7^\circ\text{C}$, а затем построена представленная на рис. 3 межкритериальная зависимость вида $k_w = f(k_\theta)$ для анализируемых режимов сушки при t_{1c} и t_{2c} .

Согласно рис. 1 и 2, при использовании режима $t_{1c} = 130^\circ\text{C}$, по истечении времени пребывания зерна в 1с зоне сушки ($\tau_{1c} = 32,0$ мин), коэффициенты эффективности влагоудержания k_w и нагрева k_θ и оставляют, соответственно: 0,766 и 0,868. А если обратиться к рис. 2 и 3, несложно заметить, что в условиях использования в 1с зоне агента сушки с температурой $t_{1c} = 150^\circ\text{C}$, коэффициент эффективности нагрева, при одинаковом с $t_{1c} = 130^\circ\text{C}$ значении $k_w = 0,766$ (при

$t_{1c} = 150^\circ\text{C}$ это значение достигается за время $\tau \approx 26,4$ мин), принимает значение $k_\theta \approx 0,970$. Иначе говоря, в условиях достижения зерном одинакового для сравниваемых режимов значения влажности, имеет место несовпадение в температурах нагрева зерна. Это, как отмечалось выше, несколько усложняет процедуру перехода от одного режима к другому в условиях моделирования процесса двухступенчатой сушки зерна.

Рисунок 3 – Взаимозависимость коэффициентов эффективности влагоудержания k_w и нагрева зерна k_θ при различных значениях температуры агента сушки

Для решения поставленной задачи моделирования процесса двухступенчатой сушки, причем с минимальной погрешностью относительно одноступенчатого режима, с использованием определяемой по выражению (5) средней по ступеням сушки температуры агента сушки t_{cp} , была дана оценка трех возможных вариантов расчетов: с поправкой на k_θ при одинаковых значениях k_w ; с поправкой на k_w при одинаковых значениях k_θ ; с поправкой на k_θ и k_w при одинаковых значениях времени (при $\tau_{1c} = 32,0$ мин).

Реализация всех перечисленных вариантов расчетов базировалась на построении приведенных на рис. 4 и 5 зависимостей $k_w = f(\tau)$ и $k_\theta = f(\tau)$, а затем, на их основе, в расчетах текущих значений абсолютной влажности и температуры зерна.

Рисунок 4 – Эффективность влагоудаления в условиях двухступенчатой сушки зерна

Базой для сравнения (и оценки погрешности) служили рассчитанные по (3) и (4) значения абсолютной влажности и температуры зерна в условиях одноступенчатого режима с $t_{\text{ср}} = 137,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $w_2^c = 15,18\%$; $\theta_2 = 59,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вариант 1. Согласно рис. 1, к моменту завершения процесса сушки зерна в 1с зоне сушки при $t_{1c} = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau_{1c} = 32,0 \text{ мин}$), эффективность влагоудаления $k_w = 0,766$. Согласно рис. 3, при этом значении k_w разница значений эффективности нагрева k_θ для условий использования агента сушки с температурами $t_{1c} = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{1c} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет: $\Delta k_\theta = 0,966 - 0,868 = 0,098$.

С учетом этой поправки Δk_θ , при одинаковых значениях $k_w = 0,766$, которое в условиях использования агента сушки с температурой $t_{1c} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается за 26,4 мин, то есть при $\Delta k_w = 0$, конечные значения абсолютной влажности и температуры, в условиях использования на второй ступени агента сушки с $t_{2c} = 150,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, составили: $w_2^c = 14,8\%$; $\theta_2 = 55,55 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рисунок 5 – Эффективность нагрева в условиях двухступенчатой сушки зерна

Относительная погрешность:

по абсолютной влажности $\delta_w = 100 \cdot |15,18 - 14,08| / 15,18 = 7,25\%$;

по температуре $\delta_\theta = 100 \cdot |59,63 - 55,55| / 59,63 = 6,84\%$.

Вариант 2. Согласно рис. 2, к моменту завершения процесса сушки зерна в 1с зоне сушки при $t_{1c} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau_{1c} = 32,0$ мин), эффективность нагрева $k_{\theta} = 0,868$. Согласно рис. 3, при этом значении k_{θ} разница значений эффективности влагосьема k_w для условий использования агента сушки с температурами $t_{1c} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{1c} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет: $\Delta k_w = 0,559 - 0,766 = -0,207$.

С учетом этой поправки Δk_w , при одинаковых значениях $k_{\theta} = 0,868$, которое в условиях использования агента сушки с температурой $t_{1c} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается за 20,4 мин, то есть при $\Delta k_{\theta} = 0$, конечные значения абсолютной влажности и температуры, в условиях использования на второй ступени агента сушки с $t_{2c} = 150,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, составили: $w_2^c = 13,32\%$; $\theta_2 = 55,93\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Относительная погрешность:

по абсолютной влажности $\delta_w = 100 \cdot |15,18 - 13,32| / 15,18 = 11,94\%$;

по температуре $\delta_{\theta} = 100 \cdot |59,63 - 55,9| / 59,63 = 6,20\%$.

Вариант 3. Согласно рис. 1 и 2, к моменту завершения процесса сушки зерна в 1с зоне сушки при $t_{1c} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\tau_{1c} = 32,0$ мин), эффективность влагосьема $k_w = 0,766$, а эффективность нагрева $k_{\theta} = 0,868$. При указанной продолжительности процесса, при использовании агента сушки с температурой $t_{1c} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, эффективность влагосьема $k_w = 0,947$, а эффективность нагрева $k_{\theta} = 1,041$.

Таким образом, разница значений коэффициентов эффективности влагосьема и нагрева по истечении времени $\tau_{1c} = 32,0$ мин составляет, соответственно: $\Delta k_w = 0,947 - 0,766 = 0,181$; $\Delta k_{\theta} = 1,041 - 0,868 = 0,173$.

С учетом численных значений поправок Δk_w и Δk_{θ} , принятых в условиях использования в течение 32 мин на первой ступени агента сушки с температурой $t_{1c} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, конечные значения абсолютной влажности и температуры зерна, в условиях использования на второй ступени агента сушки с $t_{2c} = 150,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, составили: $w_2^c = 15,45\%$; $\theta_2 = 58,16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Относительная погрешность:

по абсолютной влажности $\delta_w = 100 \cdot |15,18 - 15,45| / 15,18 = 1,78\%$;

по температуре $\delta_{\theta} = 100 \cdot |59,63 - 58,16| / 59,63 = 2,46\%$.

Итоговые результаты расчетов абсолютной влажности w^c и температуры θ в условиях одноступенчатой (при t_{cp}) и двухступенчатой сушки (при последовательном чередовании t_{1c} и t_{2c}) по варианту 3 представлены на рис. 6 и 7.

Основные результаты и выводы:

Проведенные исследования подтвердили возможность использования метода «оптимальных» конечных параметров для построения модели двухступенчатой сушки зерна в условиях использования одновременных поправок на k_w и k_{θ} на момент перехода зерна из первой ступени сушки во вторую;

Рисунок 6 – Кривая сушки в условиях двухступенчатой сушки зерна

Рисунок 7 – Термограмма в условиях двухступенчатой сушки зерна

Имеющая место относительная погрешность в определении конечных значений абсолютной влажности (1,78%) и температуры зерна (2,46%) несущественна для инженерных расчетов, и может быть отнесена к разряду систематических ошибок, не влияющих на итоговые результаты сравнительных исследований;

функциональные возможности исследованного метода моделирования двухступенчатой сушки, могут обеспечить проведение объективной оценки энергоэффективности различных вариантов организации процесса сушки, в том числе путем изменения температуры, массовой скорости и влагосодержания агента сушки.

1. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосе-мян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. – 61 с.
2. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна: учеб. пособие / Н.И. Ма-лин. – М.: КолосС, 2004. – 240 с.
3. Малин, Н.И. Моделирование кинетики двухступенчатой рециркуляционной сушки зерна / Международный технико-экономический журнал. – Москва, 2019. № 4. – С. 7-14.
4. Малин, Н.И. Моделирование кинетики двухступенчатой прямоточной сушки зерна / Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). № 12 (69), 2019. 5 часть. – С. 11-16.

Робакидзе К.Г., Курочкина Н.Е.

Значение спортивного питания в жизни спортсмена

*Самарский государственный экономический университет
(Россия, Самара)*

doi: 10.18411/lj-06-2020-94

idsp: ljjournal-06-2020-94

Аннотация

Развитие российского рынка товаров для спорта связано с развитием физической культурой в целом. Физическая культура сопровождает человека на протяжении всей жизни. С самого детства идёт приобщение к спорту, например: различные секции. Для зрелого возраста существуют фитнес-клубы или спортивные залы, люди пожилого возраста, которые тоже обеспокоены своим здоровьем, постоянно прогуливаются на свежем воздухе. Исходя из этого повышается интерес к различным