

- central concept and recent applications. Journal of Physics: Conference Series 201. 2010. – pp. 1-16.
14. Ismailov B.I. Analysis and Control of Dynamic Processes in Mechanical Parts of Power Equipment. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD). 2018. Pp. 347-352.
15. Vladimirska E.I., Ismailov B.I. Physics of Open System. Non-standard approaches in the context of studies of multidimensional coupled chaotic systems of fractional order. International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIECE), IEEE Bhubaneswar Subsection. India. 2018. Pp. 229-230.
16. Hegari A.S., Matouk A.E. Dynamical behaviors and synchronization in the fractional order hyperchaotic Chen system. Applied Mathematics Letters 24, 2011. Pp. 1938-1944.
17. Srivastava M. and all. Chaos control of fractional order Rabinovich-Fabrikant system and synchronization between chaotic and chaos controlled fractional order Rabinovich-Fabrikant system. Applied Mathematical Modelling. Volume 38, Issue 13, 1 July 2014, Pp. 3361-3372.
18. Han Qiang, SunLei, Zhu Darui, Liu Chongxin. A four-dimension fractional order hyperchaotic system derived from Liu-system and its circuit research. <http://www.paper.edu.cn>
19. Laskin N., Lambadaris I., Harmantiris, Devetsikiotis M. Fractional Levy Motion and Its Applications to Network Traffic Modeling. [Text]. // Computer Networks, vol. 40, issue 3, 2002. Pp. 363-375. DOI:10.1016/S1389-1286(02)00300-6.
20. Dubkov A.A., Spagnolo B., Uchikin V.V. Levy Flight Superdiffusion: An Introduction. Bifurcation and Chaos. September 2008. DOI: 10.1142/S0218127408021877 · Source: DBLP.
21. Kuramoto Y. 1975. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators. Int. Symp. on Mathematical Problems in Theoretical Physics (Lecture Notes in Physics) ed H Araki (Berlin: Springer) pp. 420-422.
22. Murray Shanahan. Metastable chimera states in community-structured oscillator networks. Chaos 20, 013108. 2010.
23. Vladimirska E.I. Otobrazhenie printsipov refleksii v matematicheskoy modeli prinyatiya udovletvoritelnyih resheniy. Tr. IV Mezhd. Konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya», SICPRO'05. Moskva 25-28 yanvarya 2005. M.: Institut problem upravleniya im. V.A.Trapeznikova RAN. 2005. Pp. 1681-1688.

УДК 664.723
ГРНТИ 65.29.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ СУШКИ ЗЕРНА

DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2019.5.69.499](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.5.69.499)

Малин Николай Иванович

д-р техн. наук, профессор

Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия
имени К.А. Тимирязева», Россия, г. Москва

MODELING OF THE KINETICS OF TWO-STAGE DIRECT-FLOW GRAIN DRYING

Malin Nikolay Ivanovich

dr tech. sciences, professorship

Federal state budget educational institution of higher education
«Russian state agrarian university –
Moscow Timiryzev agricultural academy», Russia, Moscow

АННОТАЦИЯ

Отмечено, что в условиях двухступенчатой сушки, используемой в шахтных прямоточных зерносушилках, во вторую ступень (иначе, - во вторую зону сушки), поступает зерно с частично обезвоженной поверхностью и повышенной, в сравнении с начальным значением, температурой. Поэтому при описании кинетики двухступенчатой сушки возникают проблемы с использованием кинетических зависимостей, используемых для описания одноступенчатой сушки. Предложена и описана процедура моделирования кинетики двухступенчатой сушки зерна. Приведены примеры (с графическим сопровождением) практической реализации процедуры моделирования, показавшей достаточную для инженерных расчетов надежность.

ABSTRACT

It is noted that in the conditions of two-stage drying used in direct-flow mine dryers, in the second stage (otherwise, in the second drying zone), grain comes in with a partially dehydrated surface and an increased temperature in comparison with the initial value. Therefore, when describing the kinetics of two-stage drying, problems arise with the use of the kinetic dependences used to describe one-stage drying. A procedure for modeling the kinetics of two-stage drying of grain is proposed and described. Examples are given (with graphic support) of

the practical implementation of the modeling procedure, which has so far achieved sufficient reliability for engineering calculations.

Ключевые слова: моделирование, прямоточная сушка, одноступенчатая и двухступенчатая сушка, восходящие и нисходящие режимы сушки, кривая сушки зерна, термограмма.

Keywords: modeling, straight-through dryers, single stage dryer, double stage dryer, ascending and descending modes of drying, curve drying grain, thermogram.

Понятие «прямоточная сушка» идентично сушке зерна в так называемых шахтных прямоточных зерносушилках непрерывного действия, нашедших широкое распространение на хлебоприемных, зерноперерабатывающих предприятиях и в сельскохозяйственном производстве [2, с. 14].

Согласно действующей Инструкции по сушке [1] режим сушки зерна в шахтных прямоточных зерносушилках непрерывного действия принято характеризовать предельной температурой нагрева зерна (определенной его термоустойчивостью применительно к конструктивным особенностям зерносушилки) и предельной температурой агента сушки. Остальные параметры (толщина слоя зерна, продолжительность пребывания его в зонах сушки, скорость агента сушки и т.д.) учитываются конструкцией зерносушилки и в понятие режима сушки не входят. При этом, в условиях сушки зерна в шахтных прямоточных зерносушилках, можно применять режимы с равномерным подводом теплоты на всем протяжении процесса (так называемые одноступенчатые режимы) и режимы, либо с увеличением теплового потока по ходу процесса (двуступенчатые восходящие режимы), либо с уменьшением теплового потока (двуступенчатые нисходящие режимы) [4, с. 12-13].

Применение двухступенчатых восходящих режимов сушки обосновано тем, что по мере обезвоживания зерна термоустойчивость его повышается, в результате чего возможно повышение температуры агента сушки, а следовательно, и температуры зерна на завершающих этапах пребывания его в сушилке. Использование двухступенчатых нисходящих режимов обосновано тем, что на начальной стадии процесса сушки температура зерна не может превысить температуру «мокрого» термометра (температуру испаряющейся жидкости) и, следовательно, можно использовать агент сушки повышенной температуры. По мере обезвоживания поверхности зерна температура его начинает расти и, следовательно, на завершающих этапах сушки температуру агента сушки следует понизить.

Для шахтных прямоточных зерносушилок инструктивно узаконено применение одноступенчатых и двухступенчатых восходящих режимов. Применять в этих сушилках двухступенчатые нисходящие режимы для большинства культур не рекомендуется вследствие возможного значительного перегрева плотного малоподвижного слоя зерна при подводе к нему на начальных этапах сушки высокотемпературного агента сушки (исключение составляет зерно риса, для которого, с целью предотвращения явления

трещинообразования, рекомендуется, использование нисходящих двухступенчатых режимов сушки).

Анализ действующих одноступенчатых режимов сушки зерна в шахтных прямоточных зерносушилках показал, что их значения установлены Инструкцией либо в привязке к первой (1с) или второй (2с) зоне сушки, либо определены (на примере зерна мягкой пшеницы 2, 3 и 4 классов) как полусумма температур t_{1c} и t_{2c} , рекомендуемых Инструкцией для двухступенчатой сушки в 1с и 2с зонах сушки.

При проведении натурных исследований кинетику сушки зерна (как и любых других влажных материалов) принято характеризовать совокупностью трех кривых: кривая сушки (абсолютная влажность, то есть влажность в расчете на массу сухого вещества зерна, как функция времени); температурная кривая (температура зерна, как функция его абсолютной влажности), или, как вариант – термограмма (температура зерна, как функция времени); кривая скорости сушки (скорость сушки, как функция абсолютной влажности зерна). Для построения кривых сушки и термограмм используются функциональные временные зависимости, соответственно абсолютной влажности и температуры материала. Для построения кривых скорости сушки проводится обработка кривых сушки по специальной методике.

В условиях моделирования процесса одноступенчатой сушки зерна (то есть при наличии соответствующих математических моделей), процедура построения кривых сушки и термограмм не вызывает проблем. Что же касается двухступенчатой сушки, то здесь возникают определенные проблемы, связанные с тем, что во вторую ступень (иначе – во вторую зону сушки) поступает зерно с частично обезвоженной поверхностью и с более высокой (чем на начальном этапе сушки) температурой. Таким образом, сложность моделирования процесса двухступенчатой сушки заключается в отсутствии для этого соответствующего алгоритма [3, с. 9].

При обосновании алгоритма процедуры моделирования кинетики двухступенчатой сушки, автором, в качестве критерия надежности, было решено использовать кривые сушки и термограммы зерна при среднем значении температуры агента сушки t_{cp} ($^{\circ}$ C), то есть в условиях использования одноступенчатого режима сушки в 1с и 2с зонах сушки.

Значение последней, с учетом позонных температур t_{1c} и t_{2c} , скорости агента сушки на входе в подвоящие короба $v_{п.к.1c}$ и $v_{п.к.2c}$, а также соответствующих значений чисел рядов

подводящих коробов в 1с и 2с зонах сушки $n_{\text{п.п.1с}}$ и $n_{\text{п.п.2с}}$, можно, с достаточной степенью точности,

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{1c}v_{\text{п.к.1с}}n_{\text{п.п.1с}} + t_{2c}v_{\text{п.к.2с}}n_{\text{п.п.2с}}}{v_{\text{п.к.1с}}n_{\text{п.п.1с}} + v_{\text{п.к.2с}}n_{\text{п.п.2с}}}. \quad (1)$$

Использование соотношения (1) предполагает приведение значений скорости агента сушки к стандартным для вентиляционной техники условиям, при температуре $t_{1c} = t_{2c} = 20$ °С и неизменной плотности ρ (кг / м³). При расчетах, требующих высокой точности, значения скорости агента сушки $v_{\text{п.к.1с}}$ и $v_{\text{п.к.2с}}$ в соотношении (1) следует заменить массовыми расходами $(v\rho)_{\text{п.к.1с}}$ и $(v\rho)_{\text{п.к.2с}}$ (кг / [м²·с]), в том числе с учетом влагосодержания d (г / кг) агента сушки.

Включение фактического значения средней температуры агента сушки t_{cp} в формулы, описывающие кинетику процесса обезвоживания и нагрева зерна [6, с. 67, 75, 162-163], предположительно позволяет получать примерно одинаковые значения параметров зерна по влажности и температуре на выходе из 2с зоны сушки в условиях одноступенчатой (при t_{cp}) и двухступенчатой сушки при $t_{(1c+2c)}$.

Для того, чтобы получить описание кинетики процесса обезвоживания зерна в условиях двухступенчатой сушки, то есть в условиях перехода от температуры t_{1c} (в 1с зоне сушки) к температуре t_{2c} (в 2с зоне сушки), необходимо последовательно провести следующие расчеты:

по заданным значениям начальных и конечных значений абсолютной влажности зерна, рассчитать время пребывания его отдельно в 1с и 2с зонах сушки (то есть, соответственно τ_{1c} и τ_{2c} , мин) при использовании t_{cp} , и общее время пребывания зерна в обеих зонах сушки $\tau_{(1c+2c)}$, мин;

по уравнению кинетики обезвоживания рассчитать текущие значения абсолютной влажности зерна при температурах t_{1c} и t_{2c} , как функции времени τ_{1c} , с получением соответствующих значений абсолютной влажности w_{1c}^c , при t_{1c} и t_{2c} , то есть на выходе из 1с зоны сушки;

по абсолютной разности влажности w_{1c}^c в условиях использования агента сушки с температурами t_{2c} и t_{1c} , определить значение поправки на влажность $\Delta w_{(1c-2c)}$ (%);

внести полученную поправку $\Delta w_{(1c-2c)}$ в уравнение кинетики обезвоживания и рассчитать текущие значения абсолютной влажности зерна, как функцию температуры t_{2c} , приняв в качестве начала процесса значение абсолютной влажности зерна w_{1c}^c , полученной при температуре t_{1c} , с точкой отсчета продолжения времени от τ_{1c} до $\tau_{(1c+2c)}$.

Для обоснования надежности изложенного алгоритма моделирования кинетики обезвоживания зерна, последовательно были

определить по упрощенному соотношению [5, с. 128]

проведены (на примере шахтной прямоточной зерносушилки типа ДСП-32) следующие расчеты:

рассчитана кинетика обезвоживания зерна пшеницы со слабой клейковиной (абсолютная влажность $w_0^c = 25.00\%$; температура $\theta_0 = 5.0$ °С) в условиях использования агента сушки с температурой: $t_{1c} = 130$ °С; $t_{2c} = 150$ °С; $t_{\text{cp}} = 137.4$ °С в течение времени пребывания зерна в 1с и 2с зонах сушки, то есть при $\tau_{(1c+2c)}$; установлено значение абсолютной влажности зерна на выходе из 2с зоны сушки в условиях использования агента сушки с температурой

$$t_{\text{cp}} = 137.4 \text{ °C};$$

$$w_{2c}^c = 17.08\%;$$

определенено значение абсолютной влажности зерна на выходе из 1с зоны сушки в условиях использования агента сушки с температурой

$$t_{1c} = 130 \text{ °C};$$

$$w_{1c}^c = 19.43\%;$$

определенено значение абсолютной влажности смеси зерна на выходе из 1с зоны сушки в условиях использования агента сушки с температурой

$$t_{2c} = 150 \text{ °C}; w_{1c}^c = 18.12\%;$$

рассчитана поправка на влажность:

$$\Delta w_{(1c-2c)} = 19.43 - 18.12 = 1.31\%;$$

рассчитана, с учетом поправки $\Delta w_{(1c-2c)}$, кинетика обезвоживания зерна в 2с зоне сушки в условиях использования агента сушки с температурой $t_{2c} = 150$ °С от начальной влажности $w_{1c}^c = 18.12\%$, определено значение абсолютной влажности зерна на выходе из 2с зоны сушки: $w_{2c}^c = 17.32\%$;

определенена сравнительная относительная погрешность методов определения конечных значений абсолютной влажности зерна в условиях одноступенчатой и двухступенчатой сушки, то есть при температурах агента сушки t_{cp} и $t_{(1c+2c)}$:

$$\delta_w = |17.08 - 17.32| \cdot 100 / 17.08 = 1.40\%.$$

Результаты проведенных расчетов кинетики обезвоживания зерна в условиях одноступенчатой и двухступенчатой сушки приведены на рис. 1 и 2.

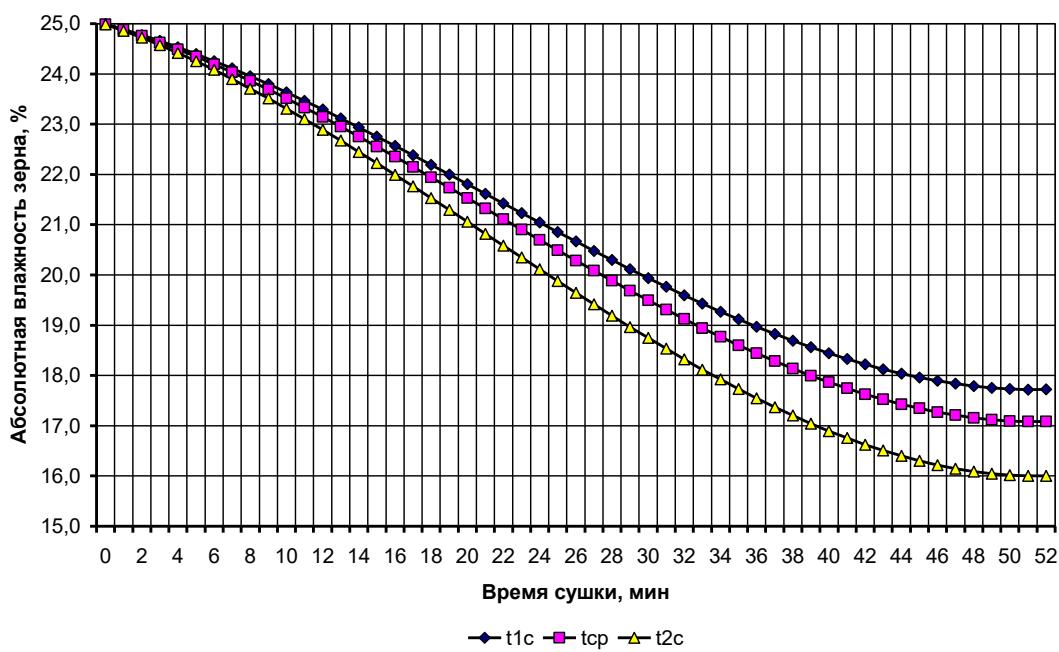


Рисунок 1. Кривые сушки зерна пшеницы в 1с и 2с зонах сушки шахтной прямоточной зерносушилки в условиях использования одноступенчатых режимов

Для того, чтобы получить описание кинетики процесса нагрева зерна в условиях двухступенчатой сушки, то есть в условиях перехода от температуры t_{1c} (в 1с зоне сушки) к температуре t_{2c} (в 2с зоне сушки), необходимо последовательно, с учетом вышеприведенных исходных данных, провести следующие расчеты:

по уравнению кинетики нагрева рассчитать текущие значения температуры зерна при температурах t_{1c} и t_{2c} , как функции времени τ_{1c} , с получением соответствующих значений температуры θ_{1c} (°C), то есть на выходе из 1с зоны сушки;

по абсолютной разности полученных при τ_{1c} значений температуры зерна при использовании агента сушки с температурами t_{2c} и t_{1c} , определить значение температурной поправки $\Delta\theta_{(1c-2c)}$ (°C);

внести полученную температурную поправку $\Delta\theta_{(1c-2c)}$ в уравнение кинетики нагрева и рассчитать текущие значения температуры зерна, как функцию $\tau_{(1c+2c)}$ при температуре t_{2c} , приняв в качестве начала процесса значение температуры зерна θ_{1c} , полученной при температуре t_{1c} , с точкой отсчета продолжения времени от τ_{1c} до $\tau_{(1c+2c)}$.

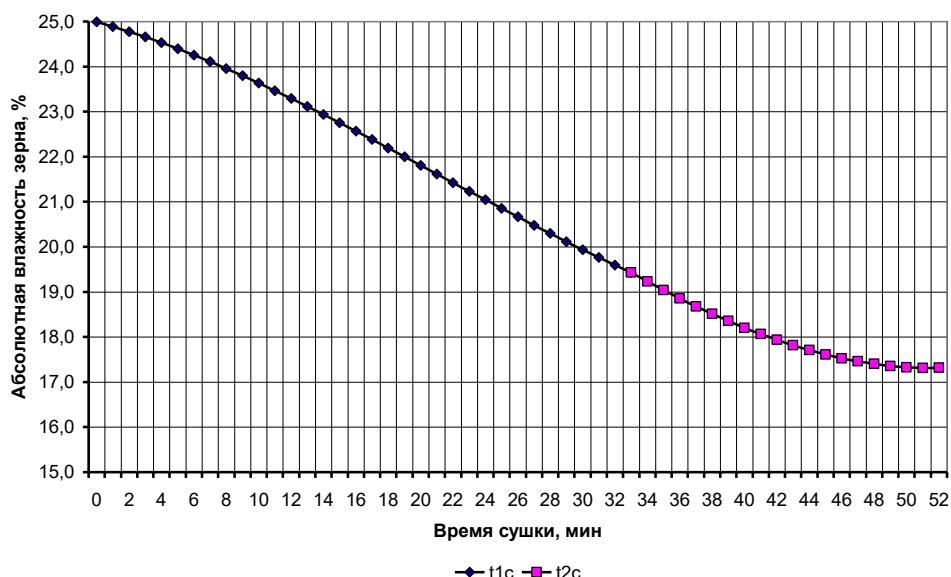


Рисунок 2. Кривые сушки зерна пшеницы в 1с и 2с зонах сушки шахтной прямоточной зерносушилки в условиях использования двухступенчатого режима

Для обоснования надежности изложенного алгоритма моделирования кинетики нагрева зерна, последовательно были проведены (при вышеописанных условиях) следующие расчеты:

рассчитана кинетика нагрева зерна пшеницы (абсолютная влажность

$w^c_0 = 25.00\%$; температура $\theta_0 = 5.0$ °C) в условиях использования агента сушки с температурой: $t_{1c} = 130$ °C; $t_{2c} = 150$ °C; $t_{cp} = 137.4$ °C в течение времени пребывания смеси зерна в 1с и 2с зонах сушки, то есть при $\tau_{(1c+2c)} = 52$ мин; установлено значение температуры зерна на выходе из 2с зоны сушки в условиях использования агента сушки с температурой $t_{cp} = 137.4$ °C:

$$\theta_{2c} = 59.5 \text{ °C};$$

определенено значение температуры зерна на выходе из 1с зоны сушки в условиях использования агента сушки с температурой $t_{1c} = 130$ °C:

$$\begin{aligned} \theta_{(1c)} &= \\ &= 44.47 \text{ °C}; \end{aligned}$$

аналогично определено значение температуры зерна на выходе из 1с зоны сушки в условиях использования агента сушки с температурой

$$t_{2c} = 150 \text{ °C}; \theta_{(2c)} = 52.36 \text{ °C};$$

по абсолютной разности значений температуры зерна, полученных при использовании агента сушки с температурами t_{2c}

(при τ_{1c}) и t_{1c} (при τ_{1c}), рассчитана температурная поправка: $\Delta\theta_{(2c-1c)} = 52.36 - 44.47 = 7.89$ °C;

рассчитана, с учетом поправки на температуру $\Delta\theta_{(2c-1c)}$, кинетика нагрева зерна в 2с зоне сушки в условиях использования агента сушки с температурой $t_{2c} = 150$ °C, определено значение температуры зерна на выходе из 2с зоны сушки: $\theta_{2c} = 58.08$ °C;

определенена сравнительная относительная погрешность методов определения конечных значений температуры зерна в условиях одноступенчатой и двухступенчатой сушки, то есть при температурах агента сушки t_{cp} и $t_{(1c+2c)}$:

$$\delta_0 = |59.5 - 58.08| \cdot 100 / 59.5 = 2.39\%.$$

Результаты проведенных расчетов кинетики нагрева зерна в условиях одноступенчатой и двухступенчатой сушки приведены на рис. 3 и 4.

Основные результаты и выводы:

предложен алгоритм описания кинетики двухступенчатой сушки влажных материалов при $t_{(1c+2c)}$, надежность которого, в сравнении с одноступенчатыми режимами сушки зерна пшеницы в шахтной прямоточной зерносушилке при t_{cp} , подтверждена допустимыми для инженерных расчетов погрешностями конечных значений влажности ($\delta_w = 1.40\%$) и температуры зерна ($\delta_0 = 2.39\%$);

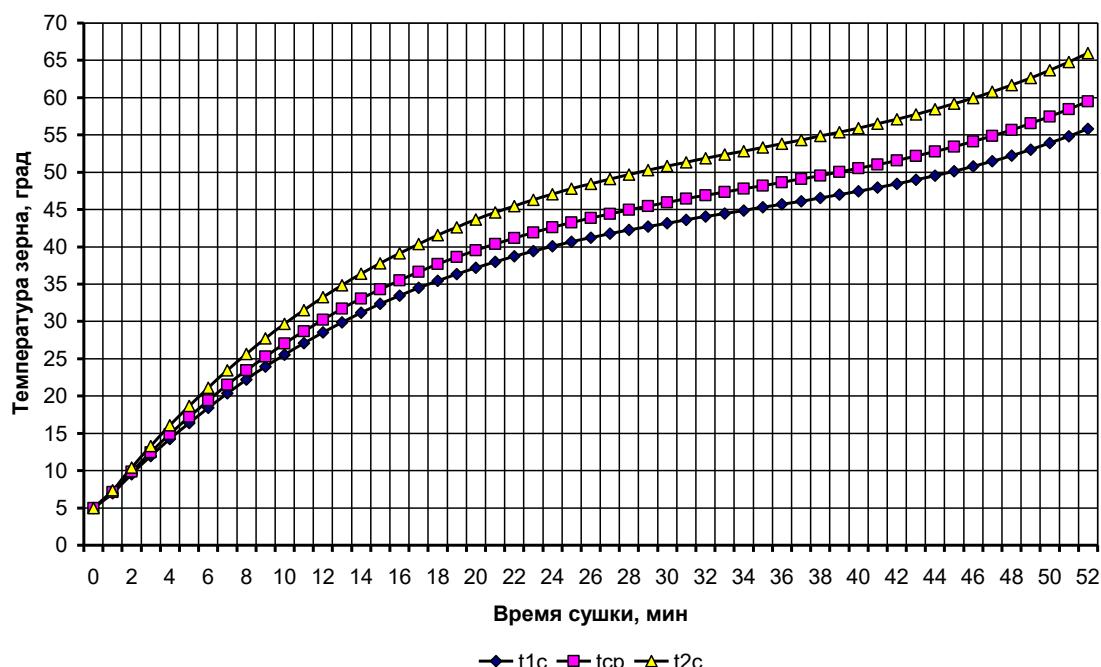


Рисунок 3. Термограммы зерна пшеницы в 1с и 2с зонах сушки шахтной прямоточной зерносушилки в условиях использования одноступенчатых режимов

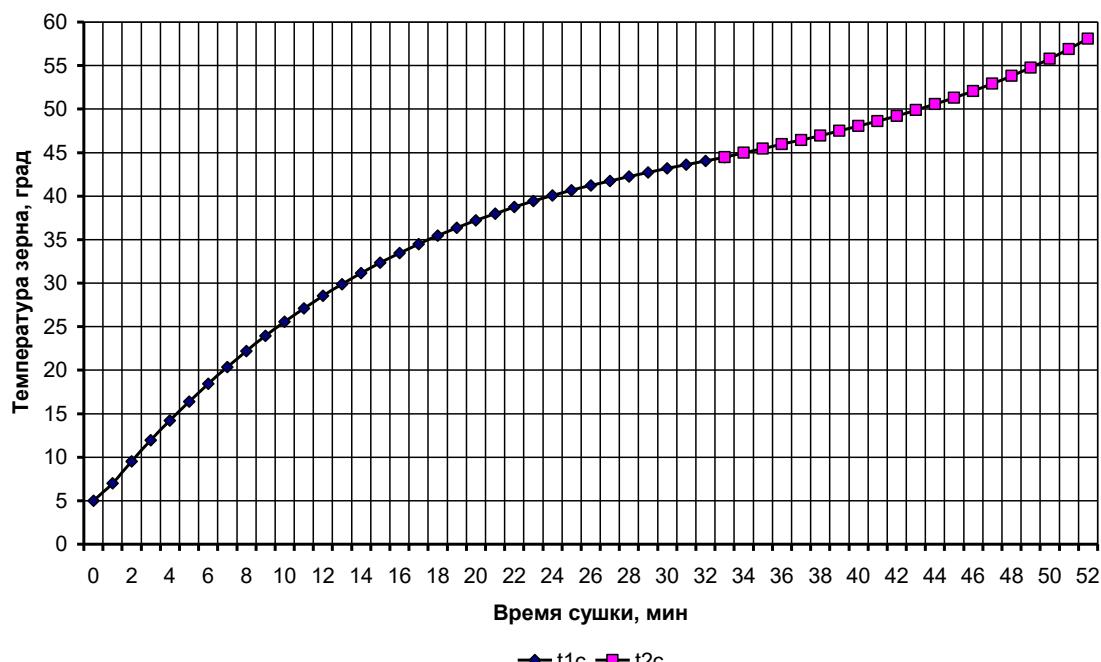


Рисунок 4. Термограммы зерна пшеницы в 1с и 2с зонах сушки шахтной прямоточной зерносушилки в условиях использования двухступенчатого режима

предложенный алгоритм описания кинетики двухступенчатой сушки можно использовать для построения оптимальных (в том числе не только по предельной температуре нагрева зерна, но и энергосберегающих) режимов сушки влажных материалов в условиях меняющихся позонных значений не только температуры и скорости (как вариант, массового расхода), но также и других параметров (например, влагосодержания) агента сушки.

Список литературы

1. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, маслосемян и эксплуатации зерносушилок № 9-3-82. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1982. – 61 с.
2. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна / Н.И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.
3. Малин, Н.И. Моделирование кинетики двухступенчатой рециркуляционной сушки зерна / Н.И. Малин // Международный технико-экономический журнал. – Москва, 2019. № 4. – С. 7-14.
4. Малин, Н.И. Энергосбережение в теплотехнологиях АПК: учеб.-метод. пособие / Н.И. Малин. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. – 124 с.
5. Малин, Н.И. Шахтная зерносушилка с одним и двумя контурами рециркуляции, как объект управления процессом сушки / Н.И. Малин // Сборник: Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы VII международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Трушкина В.А. – Саратов: 2016. – С. 124-130.
6. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна: учеб. пособие / Н.И. Малин. – М.: КолосС, 2004. – 240 с.