

# ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДОСУШКИ ЗЕРНА НА СКЛАДЕ

**ЗАГОРУЙКО Михаил Геннадьевич**, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
**ПАВЛОВ Сергей Анатольевич**, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

*В статье рассматривается способ двухстадийной сушки, включающий высоко- и низкотемпературную сушку, широко используемый в США, Франции, Италии, особенно для зерна кукурузы. При этом зона охлаждения в высокотемпературных сушилках переводится в сушильную, а охлаждение осуществляется в специальных охладителях: в бункерах активного вентилирования, площадках или на складах. Для повышения эффективности этого способа выполнен расчет подачи нагретого зерна, количества мобильных вентиляторов и экспериментально определены длительность охлаждения и влагосъем.*

**Введение.** Расчет подачи зерна основан на составлении материальных балансов при формировании насыпи и длительностей отлежки и охлаждения зерна. Основные предпосылки для расчета – первоначально досушивают первую партию, затем вторую и так далее, при этом в цикле три операции – формирование слоя, отлежка и охлаждение, по завершении цикла перемещают мобильные вентиляторы. При охлаждении зерна, нагреветого до 52 °C в течение 60 ч наружным воздухом, исследована кинетика досушки и влагосъем [9].

Подача зерна на склад зависит от вместимости воздухораспределительной системы вентиляторов и суммы длительностей формирования или отлежки и охлаждении насыпи.

Насыпь зерна в поперечном сечении имеет переменную форму, первую партию располагают на воздухораспределительной системе одного вентилятора, вторую и следующие на двух и более [8].

Количество мобильных вентиляторов определяется шириной вентилируемой насыпи, количеством воздухораспределительных каналов и расстоянием между ними.

При экспериментальной проверке подтверждены расчетные параметры процесса при поточной работе сушилки: подача зерна на склад составила 12–13 т/ч, а при работе двух вентиляторов достигнут влагосъем ~ 2%.

Одним из направлений снижения топливно-энергетических ресурсов и увеличения пропускной способности сушилок является использование двухстадийного способа сушки.

Способ двухстадийной сушки, включающий в себя высоко- и низкотемпературную сушку, широко используется в США, Франции, Италии особенно для зерна кукурузы [1-3]. При этом зона охлаждения в высокотемпературных сушилках переводится в сушильную, а охлаждение осуществляется в специальных охладителях: в бункерах активного вентилирования, площадках или на складах.

По мере охлаждения зерна на складе происходит перемещение вентиляторов для охлаждения новых партий горячего зерна.

При этом случае осуществляется непрерывный процесс двухстадийной сушки. Влажность зерна на выходе из сушилки достигает 15...16 %, его температура 50...60 °C, продолжительность отлежки до 12 ч. После отлежки осуществляется медленное охлаждение наружным воздухом при удельной подаче  $q = 40...70 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{ч}$  с подсушиванием до влажности 13...14 %. Производительность сушилки при этом возрастает на 20 %, экономится до 25 % топлива и 30 % электроэнергии, снижается трещиноватость и количество битых зерен [5].

Цель исследования – расчет подачи нагретого зерна, минимального количества мобильных венти-

ляторов, экспериментальное определение длительности охлаждения и влагосъем.

**Методика исследований.** Расчет подачи зерна основан на составлении материальных, формирования насыпи и длительностей отлежки и охлаждения тепло-влажностных балансов при вентилировании нагретого зерна в насыпи при заполнении склада.

Основные предпосылки для расчета:

первоначально формируют, отлеживают и досушивают первую партию зерна с заданной высотой;

этая партия зерна должна иметь минимальный объем для сокращения времени пребывания в нагретом состоянии;

затем формируют, отлеживают и охлаждают вторую и последующие партии зерна;

длительность отлежки принимается согласно [5];

длительность охлаждения рассчитывается по заданному заранее влагосъему (при нагреве зерна до 50°C –  $\Delta W = 1,7...2,1 \text{ %}$ ) и уточняется при эксперименте;

по мере охлаждения зерна перемещаются вентиляторы.

В общем случае насыпь первой партии зерна, размещенная на воздухораспределительной системе и примыкающая к торцевой стенке склада в поперечном сечении, имеет прямоугольную и треугольную форму частей (рис. 1) [4, 6].

Последующие партии зерна имеют форму ромба и размещаются уже на воздухораспределительных системах двух или нескольких вентиляторов (рис. 2).

Составим материальные балансы формирования насыпи зерна на складе, и на их основе определим подачу

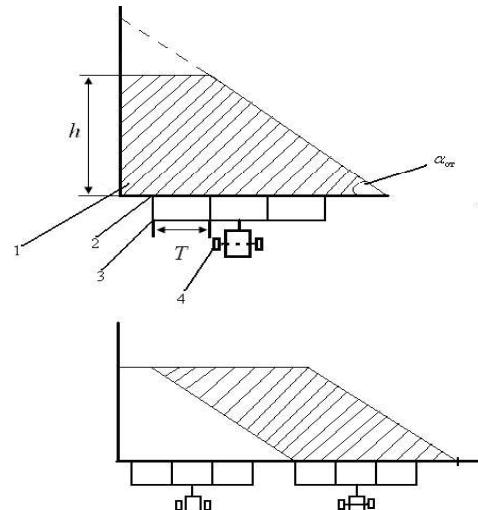


Рис. 1. Схема вентилирования первой партии зерна, размещенной на воздухораспределительной системе  $h$  – высота насыпи, м;  $T$  – расстояние между каналами, м;  $\alpha_{\text{ом}}$  – угол откоса, град.; 1 – насыпь; 2 – воздушные каналы; 3 – воздуховод; 4 – вентилятор



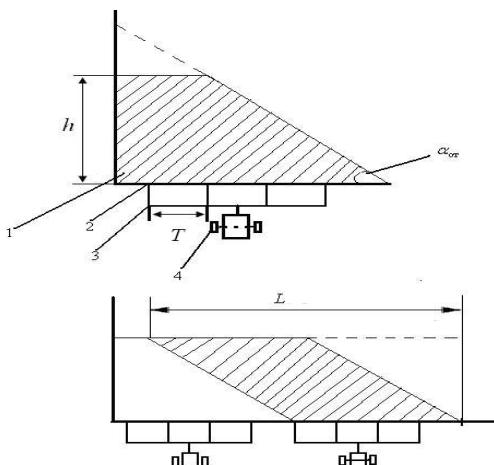


Рис. 2. Схема вентилирования второй и последующих партий зерна

зерна в зависимости от габаритных размеров склада, воздухораспределительной системы, физико-механических свойств зерна и длительности отлежки и охлаждения [7].

Рассматривая схему на рис. 1, можно записать массу зерна в части насыпи с постоянным поперечным сечением для первой партии:

$$G_1 = (n \cdot T - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{от}}) h B \gamma, \text{ т;} \quad (1)$$

и в части насыпи с переменным сечением:

$$G_2 = h \operatorname{ctg} \alpha_{\text{от}} \frac{h}{2} B \gamma, \text{ т;} \quad (2)$$

где  $n$  – количество подключенных воздухораспределительных каналов;  $T$  – расстояние между каналами, м;  $\alpha_{\text{от}}$  – угол откоса насыпи, град;  $h$  – высота насыпи, м;  $B$  – ширина склада, м;  $\gamma$  – объемная масса зерна, т/м<sup>3</sup>.

Суммарная масса зерна может быть записана следующим образом:

$$G_3 = (n \cdot T - 0,5 h \operatorname{ctg} \alpha_{\text{от}}) h B \gamma, \text{ т.} \quad (3)$$

Подачу зерна для формирования первой партии вычислим из выражений (1), (2) и (3):

$$\Pi_1 = \frac{G_3}{\tau_{\phi} + \tau_{\text{от}} + \tau_{\text{ок}}}, \text{ т/ч,} \quad (4)$$

где  $\tau_{\phi}$ ,  $\tau_{\text{от}}$ ,  $\tau_{\text{ок}}$  – время формирования, отлежки и охлаждения, ч.

Из схемы на рис. 2 можно рассчитать массу зерна второй партии, которая не меняется при наращивании насыпи по длине склада:

$$G_4 = k^2 T B \gamma, \text{ т.} \quad (5)$$

Подачу зерна при формировании второй и последующих партий запишем:

$$G_2 = h \operatorname{ctg} \alpha_{\text{от}} \frac{h}{2} B \gamma, \text{ т/ч,} \quad (6)$$

где  $k$  – количество вентиляторов.

Если суммарное время формирования и отлежки зерна во второй партии превышает время охлаждения, то эту партию охладить другим вентилятором не задерживая формирования следующей, что повысит подачу зерна в склад [8].

Минимальное количество вентиляторов может быть определено из ширины вентилируемой насыпи  $L$ , которую в свою очередь можно рассчитать, зная высоту насыпи  $h$  и угол ее откоса  $\alpha_{\text{от}}$ . Величину  $L$  запишем в виде:

$$L = 2 \operatorname{ctg} \alpha_{\text{от}}$$

Количество вентиляторов составит:

$$k = \frac{2 \operatorname{ctg} \alpha_{\text{от}}}{T n}, \quad (7)$$

где  $n$  – число воздухораспределительных каналов.

Производственные исследования кинетики охлаждения проведены в ООО «Рейнланд» (с. Яковка, Колпнянского района, Орловской обл.) при двухстадийной сушке с подсушкой в зерносушилке С-40 и с охлаждением на складе, оснащенным напольной воздухораспределительной системой.

При проведении испытаний замеряли следующие параметры: температуру, влажность и массу зерна, поступающего на склад, температуру и относительную влажность наружного и отработавшего воздуха из насыпи. Высота насыпи составила 4 м. Зерно сушили до ~ 15,5 % в высокотемпературной сушилке и отправляли на склад, где формировали насыпь на воздухораспределительной системе склада с  $T = 2,7$  м. Затем отлеживали 10 ч и охлаждали в течение ~ 30 ч. После охлаждения вновь формировали насыпь и т.д. Длительность формирования насыпи составляла 2–3 ч. После завершения охлаждения перемещали вентилятор. С интервалом в 3 ч отбирали пробы со свободной поверхности насыпи. По охлаждению зерна проведены два опыта. Основные показатели приведены в таблице.

#### Основные показатели досушки зерна

Показатели	Величина	
	первая партия	вторая партия
Влажность зерна, %:		
исходная	15,5	15,6
после досушки и охлаждения	13,5	13,6
Влагосъем, %	2	2
Температура зерна, °С:		
исходного	52	52
после охлаждения	15	15
Масса зерна, т:	450	650
Подача зерна на склад, т/ч	12	15
Продолжительность отлежки, ч	10	10
Производительность вентилятора, м <sup>3</sup> /т	1200	1200
Продолжительность охлаждения, ч	29	30
Удельная подача воздуха, м <sup>3</sup> /т·ч	26,6	37
Средняя температура наружного воздуха, °С	13	13
Средняя относительная влажность наружного воздуха, %	60	60
Средняя температура отработавшего воздуха, °С	31	32

**Результаты исследований.** Зная характеристики воздухораспределительной системы склада  $n$ ,  $T$ ,  $B$ , параметры насыпи  $h$ ,  $\alpha_{\text{от}}$  и объемную массу зерна  $\gamma$ , можно определить массу первой и второй партий зерна и скорость его подачи на склад.

Динамика изменения влажности  $W$  и температуры  $\theta$  зерна второй партии приведена на рис. 3, 4.

Влажность и температуру замеряли на свободной поверхности насыпи (см. рис. 2). Относительную влажность  $\phi$  и температуру  $t_{\text{от}}$  отходящего воздуха замерили на выходе осевого вентилятора, расположенного на торцевой стенке склада [5].

Установлено, что влажность зерна  $W$  синхронно изменяется с его температурой  $\theta$ , причем в последней трети длительности охлаждения изменения температуры и влажности незначительны.



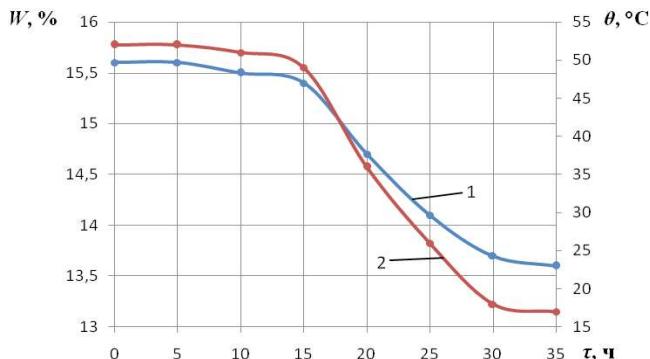


Рис. 3. Зависимости влажности  $W$  (1) и температуры зерна  $\theta$  (2) от времени  $t$ ,  $q = 26 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{ч}$

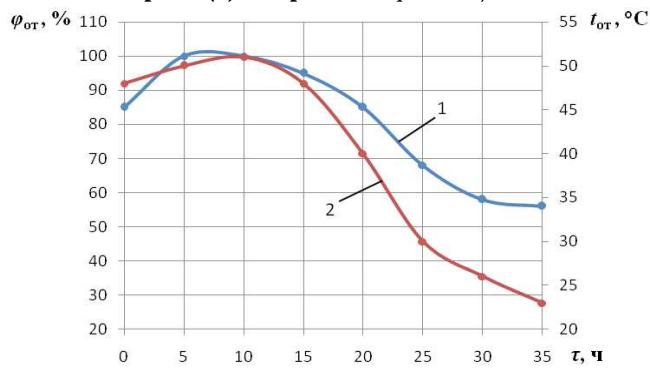


Рис. 4. Зависимости относительной влажности  $\varphi$  (1) и температуры  $t_{\text{от}}$  (2) отходящего воздуха от времени  $t$ ,  $q = 26 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{ч}$ ;  $\varphi_0 = 55 \%$

Первую половину охлаждения относительная влажность и температура отходящего воздуха практически не меняются, затем быстро снижаются, а в последней трети процесса изменения  $\varphi$  и  $t_{\text{от}}$  незначительны.

Установлено, что изменение влагосъема прямо пропорционально снижению температуры, а закономерности изменения температуры и влажности охлаждаемого слоя хорошо согласуются с изменением относительной влажности и температуры отходящего воздуха.

С позиций тепломассопереноса характерное изменение  $\varphi$  и  $t_{\text{от}}$  может быть объяснено следующим образом.

Сначала из насыпи выходит сравнительно малонасыщенный влагой поток воздуха, так как происходит его прогрев и повышение влагопоглощающей способности, в дальнейшем происходит нагрев и повышение до 100%. Над слоем возможна конденсация водяных паров, а на поверхности появление капельножидкой влаги. Для предотвращения конденсации следует правильно выбрать удельную подачу  $q$ . Установлено, что при  $q = 37 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{ч}$  конденсация паров отсутствует.

Оптимальный режим досушки зерна кукурузы на складе:

нагрев до  $50\ldots55^\circ\text{C}$  при влажности  $\sim 15,5\%$ ;

формирование насыпи до 3 ч;

отлежка  $\sim 10$  ч;

охлаждение при удельной подаче наружного воздуха  $q = 37 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{ч}$   $\sim 30$  ч;

высота насыпи  $\sim 4$  м;

количество мобильных вентиляторов – 2.

При этих условиях будет достигнута подача на склад  $12\ldots13 \text{ т}/\text{ч}$ ; влагосъем  $\sim 2\%$  при охлаждении зерна до температуры на  $2,0\ldots2,5^\circ\text{C}$  выше наружного воздуха.

**Заключение.** Подача зерна на склад зависит от вместимости воздухораспределительной системы вентиляторов и суммы длительностей формирования или отлежки и охлаждения насыпи.

Насыпь зерна в поперечном сечении имеет переменную форму, первую партию располагают на воздухораспределительной системе одного вентилятора, вторую и следующие на двух и более.

Количество мобильных вентиляторов определяется шириной вентилируемой насыпи, количеством воздухораспределительных каналов и расстоянием между ними.

При экспериментальной проверке подтверждены расчетные параметры процесса при поточной работе сушилки: подача зерна на склад составила  $12\ldots13 \text{ т}/\text{ч}$ , а при работе двух вентиляторов достигнут влагосъем  $\sim 2\%$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анискин В.И. Технологические и технические решения проблемы сохранности зерна в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1985. – 43 с.
2. Баум А.Е. Дащевский В.И. Оборудование по обработке зерна во Франции // Экспресс-информация. Сер. Элеваторная промышленность. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1983. – № 17. – 39 с.
3. Есаков В.Т. Двухстадийная энергосберегающая сушка зерна на предприятиях АПК: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986. – 24 с.
4. Загоруйко М.Г., Павлов С.А. Вентилирование насыпи нагретого зерна кукурузы // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 9. – С. 74–77.
5. Окунь Г.С., Чижиков А.Г. Тенденции развития технологий и технических средств сушки зерна. М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – С. 41–44.
6. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
7. Сорочинский В.Ф. Эффективный способ двухстадийной сушки зерна // Комбикормовая промышленность. – 1996. – № 4. – С. 17–18.
8. Сорочинский В.Ф. Сравнительная оценка технологий конвективной сушки зерна // Комбикорма, 1999. – № 4. – С. 18–20.
9. Теленгатор М.А., Уколов В.С., Цециновский В.М. Обработка семян зерновых культур. – М.: Колос, 1972. – С. 48–52.

**Загоруйко Михаил Геннадьевич**, канд. техн. наук, главный научный сотрудник, Федеральный научный агронженерный центр ВИМ. Россия.

**Павлов Сергей Анатольевич**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Россия.

109428, г. Москва, 1-й институтский пр-д, 5.

Тел.: (499) 171-43-49, e-mail: sapavlov777@mail.ru.

**Ключевые слова:** склад; сушика; зерно кукурузы; параметры; досушка; расчет.

#### STUDY OF KINETICS OF GRAIN DRYING IN A WAREHOUSE

**Zagoruyko Mikhail Gennadievich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia.

**Pavlov Sergey Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia.

**Keywords:** warehouse; drying; corn grain; parameters; additional drying; calculation.

The article discusses a two-stage drying method, including high-temperature and low-temperature drying, is widely used in the USA, France, Italy, especially for corn grain. In this case, the cooling zone in high-temperature dryers is transferred to a drying room, and cooling is carried out in special coolers: in active ventilation bins, platforms or in warehouses. To increase the efficiency of this method, the calculation of the supply of heated grain, the number of mobile fans was performed, and the duration of cooling and moisture removal were experimentally determined.

