

Л 84
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛУКЬЯШКО Александр Константинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ
СЕМЕННОЙ КУКУРУЗЫ
В КАМЕРНЫХ СУШИЛКАХ
С ЦЕЛЬЮ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ**

Специальность № 05.18.03 — «Хранение зерна
(элеваторно-складское хозяйство) и других
сельскохозяйственных продуктов»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОДЕССА — 1974

Автореферат
Л84

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛУКЬЯШКО Александр Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ
СЕМЕННОЙ КУКУРУЗЫ
В КАМЕРНЫХ СУШИЛКАХ
С ЦЕЛЬЮ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Специальность № 05.18.03 — «Хранение зерна
(элеваторно-складское хозяйство) и других
сельскохозяйственных продуктов»

Переучет 1984

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

с/8012346

Одесский технологический
институт пищевой промышленности
имени М. В. Ломоносова
БИБЛИОТЕКА

ОНАХТ 02.07.12
Исследование процесса

ОДЕССА — 1974



Работа выполнена в Кабардино-Балкарском республиканском управлении хлебопродуктов и в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент **Н. В. Остапчук**

кандидат технических наук, доцент **В. А. Яковенко**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Г. А. Егоров**

кандидат технических наук **Г. С. Зелинский**

Ведущее предприятие—Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная опытная станция.

Автореферат разослан «*14*» *августа* 1974 года.

Защита диссертации состоится «*20*» *сентября* 1974 года.

на заседании Ученого совета технологических факультетов Одесского технологического института пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах) просим направлять по адресу: 270039, г. Одесса, 39, ул. Свердлова, 112, ОТИПП им. М. В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь совета кандидат технических наук **Л. А. Запорожец.**

Кукуруза — одна из основных и перспективных технических и кормовых культур, обладающих ценными питательными свойствами и высокой урожайностью. Она широко используется в нашей стране для приготовления различных национальных блюд, а также занимает важнейшее место в кормовом балансе страны для нужд животноводства и является важной страховой культурой. Июльский (1970 г.) Пленум ЦК КПСС отметил, что для удовлетворения растущих потребностей государства в зерне кукурузы необходимо довести ее среднегодовое производство до 20 млн. тонн.

Наряду с посевами кукурузы в районах с благоприятными климатическими условиями для возделывания ее на зерно значительные площади посевов кукуруза занимает в районах, где ее высевают только для получения зеленой массы. В связи с этим заготовка высококачественных семян кукурузы играет важнейшую роль как в производстве продовольственного зерна, так и в создании прочной кормовой базы в стране.

Для получения высококачественных семян кукурузы после уборки должна быть обеспечена просушка их в потоке при сдаче ее государству.

Вместе с тем дефицит сушильной мощности для сушки семенной кукурузы в целом по стране составляет более 33% к имеющейся на плановый объем заготовок урожая 1974 года. Наряду со строительством новых зерносушилок важнейшим путем наращивания сушильных мощностей для сушки семенной кукурузы является повышение эффективности использования существующих камерных сушилок на основе интенсификации процессов сушки, совершенствования конструкций сушилок и системы управления. Настоящая работа направлена на повышение эффективности использования существующих камерных сушилок, совершенствование их конструкций и систем управления.

Интенсификация процесса сушки в камерных кукурузных сушилках возможна за счет увеличения температуры сушильного агента, увеличения скорости фильтрации агента сушки, использования сушильного агента с повышенным потенциалом сушки. В связи с этим основной целью нашего исследования является изучение возможности интенсификации процесса сушки семенной кукурузы в камерных сушилках путем повышения температуры сушильного агента при более благоприятных условиях подачи его в сушильные камеры и при условии обеспечения точной работы камерных сушилок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

1. Определить допустимые условия повышения температуры сушильного агента.

2. Изучить сравнительную эффективность параллельного и последовательного подключения камер сушилки при повышенных температурах сушильного агента.

3. Исследовать кинетику процесса сушки при режимах с повышенной температурой и меньшим временем реверсирования сушильного агента при параллельном и последовательном подключении камер.

4. Определить режимы сушки семенной кукурузы, интенсифицирующие процесс сушки в камерных сушилках при условии сохранения и улучшения качества семян.

5. Определить изменения биохимических свойств семян кукурузы в процессе сушки, а также проверить в полевых условиях энергию прорастания, всхожесть и урожайность кукурузы, полученных от семян, высушенных при рекомендованных более интенсивных режимах.

6. Разработать принципиальную схему реконструкции существующих камерных сушилок с целью реализации параметров процесса сушки, обеспечивающих повышение производительности и поточную ритмичную работу сушилок, а также возможность автоматизации некоторых функций управления.

7. Разработать конструкцию усовершенствованной камерной сушилки, внедрить ее в производство и на основе опыта ее эксплуатации выдать рекомендации для проектирования типовой камерной сушилки с более совершенной системой управления.

Научная новизна работы состоит в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности применения более высоких температур сушильного агента и повышении производительности камерных сушилок для сушки семенной кукурузы в початках; в исследовании кинетики процесса сушки семенной кукурузы в початках при повышении температуры сушильного агента и сокращении времени его реверсирования; в разработке принципа совершенствования существующих технологических процессов сушки семенной кукурузы на основе рекомендуемых режимов сушки, совершенствования конструкции сушилок и их систем управления.

Практическая ценность работы заключается в разработке режимов, интенсифицирующих процесс сушки семенной кукурузы в действующих камерных сушилках без их реконструкции, повышающих производительность сушилок на 35—38%; в разработке принципиальной схемы реконструкции действующих камерных сушилок, позволяющих применить температуру сушильного агента 55°C с одновременной механизацией и автоматизацией процесса сушки; в разработке и внедрении в производство усовершенствованной камерной сушилки с повышенной производительностью на 50—55%, сниженными удельными капиталъ-

ными затратами на тонну сушильной мощности на 30—32%, увеличенным тепловым коэффициентом полезного действия до 39—42%, позволяющей механизировать и автоматизировать процесс сушки.

На основании проведенных исследований с участием автора разработаны:

1. «Сушилка для кукурузы в початках» (имеется положительное решение на изобретение).

2. «Способ сушки семенной кукурузы в початках» (имеется положительное решение на изобретение).

3. «Экспериментальная лабораторная установка для сушки зерновых культур» (имеется положительное решение на изобретение).

4. «Способ термообработки сыпучих материалов» (имеется авторское свидетельство на изобретение).

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и предложений, условных обозначений, списка использованной литературы и приложений, изложенных на 172 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Методы и режимы сушки семенной кукурузы и теоретические предпосылки исследования

В настоящее время существуют три основных метода сушки семенной кукурузы: сушка в початках в камерных сушилках, сушка в зерне в шахтных зерносушилках, комбинированная сушка (предварительная подсушка ее в початках до влажности 22—24% с последующей досушкой в зерне после обмолота початков). Наибольшее применение получил метод сушки семенной кукурузы в початках в камерных сушилках.

Тепловую сушку зерна следует рассматривать не только как средство для понижения его влажности, но и как важнейший фактор улучшения его качества. Такие изменения свойств зерна, как изменение энергии прорастания и всхожести, находятся в определенной зависимости от степени денатурации белков зародыша и эндосперма. Степень денатурации белков при сушке определяется в основном температурой нагрева зерна, его влажностью и временем действия температуры.

Интенсификация влагопереноса внутри зерна может быть достигнута увеличением коэффициента диффузии влаги. Г. А. Егоров считает, что повышение температуры нагрева зерна вызывает изменения физико-химических свойств веществ зерна и находящейся в нем воды. В частности, уменьшается энергия связи, вода становится более подвижной, что приводит к повышению скорости ее переноса (возрастает коэффициент диффузии).

Резервом для дальнейшей интенсификации процесса сушки семенной кукурузы в початках в камерных сушилках является разработка таких режимов, при которых температура зерна поддерживалась бы на максимально близком значении от предельно допустимых температур нагрева семян кукурузы в течение всего периода процесса сушки при обеспечении ритмичной работы сушилки. Такие условия могут быть выполнены при повышении температуры сушильного агента, но с одновременным сокращением времени односторонней продувки слоя насыпного початков в камере. Теоретическими предпосылками исследований интенсификации процесса сушки в камерных сушилках является теория внутреннего и внешнего тепла и массообмена при сушке зерна, созданная и развитая А. В. Лыковым, А. С. Гинзбургом, Г. А. Егоровым, В. И. Жидко и др.

Процессы переноса, сопровождающие сушку, принято подразделять на внешний тепло- и влагообмен и внутренний тепло- и массоперенос. Параметры сушильного агента и режим сушки влияют на процесс внутреннего тепло- и массопереноса, а физико-химические явления и фазовые превращения в зерне оказывают влияние на состояние пограничного слоя, то есть на внешний тепло- и влагообмен.

Скорость испарения воды со свободной поверхности зависит от потенциала сушки E , равного:

$$E = t^c - t_a^m,$$

где t^c — температура сухого термометра, °C;

t_a^m — адиабатная температура мокрого термометра, °C, определяемая по показаниям психрометра с учетом поправки, зависящей от скорости воздуха.

Потенциал сушки выражает совместное влияние температуры и влажности воздуха на процесс сушки, характеризует его сушильную способность.

По формуле Г. К. Филоненко и др. скорость испарения воды со свободной поверхности прямо пропорциональна потенциалу сушки и выражается уравнением:

$$\frac{W}{\tau F} = \frac{\alpha}{r} (t^c - t_a^m) = \frac{a}{C_{вл \cdot в}} \cdot \frac{d_n - d}{1000},$$

где W — количество испарившейся воды,

τ — время испарения,

F — площадь поверхности испарения,

α — коэффициент теплообмена,

d — влагосодержание воздуха,

d_n — влагосодержание насыщенного водяного пара.

Из уравнения видно, что с увеличением температуры сушильного агента и уменьшением его влагосодержания интен-

фицируется процесс сушки. Повышение потенциала сушки в камерных сушилках можно достигнуть применением параллельной схемы подключения камер, так как при этом уменьшается влагосодержание сушильного агента в процессе сушки.

Перенос массы в процессах внешнего влагообмена выражается уравнением:

$$q_m = \beta (P_m - P_{cp}),$$

где q_m — удельный поток массы,

β — коэффициент внешнего влагообмена,

P_m — парциальное давление пара на поверхности материала,

P_{cp} — парциальное давление пара окружающей среды.

Согласно приведенному уравнению движущей силой переноса является разность парциальных давлений, а массообменные свойства взаимодействующих сред характеризуются коэффициентом внешнего влагообмена.

Парциальное давление пара в зерне определяется его температурой и влажностью. Влажность зерна является заданным параметром, и интенсивность внешнего влагообмена в процессе сушки может быть достигнута путем увеличения его температуры.

Суммарный поток влаги внутри тела в процессе его сушки по А. В. Лыкову определяется следующим уравнением:

$$q_m = -a_m \cdot \rho (\Delta U + \delta \Delta \Theta),$$

где a_m — коэффициент диффузии влаги,

ρ — плотность материала,

δ — термоградиентный коэффициент,

ΔU — градиент влажности зерна,

$\Delta \Theta$ — градиент температуры.

Особенности процесса переноса тепла определяются удельной теплоемкостью C , коэффициентом теплопроводности λ , коэффициентом температуропроводности a , коэффициентом теплообмена α . Теплофизические свойства зерна кукурузы исследованы Г. А. Егоровым и В. Т. Любушкиным, на основании которых авторы утверждают, что теплофизические свойства зерна кукурузы практически не зависят от его биологических и сортовых особенностей.

Полученные ими зависимости указывают на линейное изменение теплофизических коэффициентов для зерна кукурузы в зависимости от влажности в пределах 10—30% на абсолютно сухую массу, причем удельная теплоемкость и теплопроводность с увеличением влажности увеличивается, а температуропроводность уменьшается.

Основной кинетической характеристикой высушиваемого зерна является коэффициент диффузии влаги a_m , характеризующий влагоинерционные свойства и оказывающий наибольшее влияние на интенсивность внутреннего влагопереноса и скорость сушки.

В исследованиях А. С. Гинзбурга, В. П. Дубровского, Е. Д. Казакова, Г. А. Егорова и др. установлено, что коэффициент диффузии возрастает с увеличением температуры зерна. Эта зависимость выражается формулой:

$$a_m = a_{m0} \left(\frac{T}{293} \right)^n,$$

где a_{m0} — коэффициент диффузии влаги при $T = 293^\circ\text{K}$,

n — показатель степени, изменяющийся в зависимости от влажности зерна от 8 до 18.

По данным Г. А. Егорова, величина коэффициента диффузии влаги для белой зубовидной кукурузы и мягкой пшеницы одинакова.

Таким образом, внешний тепло- и влагообмен и внутренний тепло- и массообмен, которые суммарно характеризуют процесс сушки, интенсифицируются с увеличением температуры нагрева зерна.

Количественные характеристики более интенсивных режимов сушки можно получить аналитически и экспериментально. При аналитическом определении режимов необходимо знать теплофизические и массообменные характеристики: коэффициенты теплообмена и массообмена, теплоемкости и теплопроводности зерна и сушильного агента, коэффициенты диффузии тепла и влаги во всем диапазоне изменения влагосодержания и температуры зерна и сушильного агента, а также скорости его движения. Не все эти величины известны, а их определение представляет трудности и требует постановки трудоемких исследований и достаточно точных измерений. Для аналитического определения температуры нагрева зерна в процессе сушки по формуле В. И. Жидко, составленной на основании уравнения теплового баланса, предложенного А. С. Гинзбургом и В. А. Резчиковым, также необходимо знать скорость сушки, теплоемкость зерна и сушильного агента, расход сушильного агента в каждый данный момент. Таким образом, аналитические методы определения режимов сушки требуют экспериментального определения некоторых постоянных величин, входящих в известные аналитические зависимости. В связи с практическими трудностями определения этих величин, изменяющихся в больших диапазонах влажности семян кукурузы, убранных в различных фазах спелости, мы ограничились экспериментальными методами установления возможности интенсификации процесса сушки семенной кукурузы в камерных сушилках.

Обзор теоретических основ сушки кукурузы в початках позволяет заключить, что существующие методы и режимы не обеспечивают теоретически возможного повышения производительности камерных сушилок. Интенсификация процесса сушки в камерных сушилках может быть осуществлена путем повышения температуры сушильного агента с условием нагрева зерна в пределах принятых допустимых температур для семян кукурузы, за счет сокращения времени односторонней продувки початков, применения сушильного агента с повышенным потенциалом сушки, путем параллельного подключения камер. Процесс сушки можно также интенсифицировать улучшением системы управления процессом сушки, механизацией и автоматизацией некоторых управляющих воздействий.

Методика исследования и экспериментальная установка

Методика проведения экспериментов разработана в соответствии с поставленными задачами исследования. В качестве исследуемого материала применяли семенную кукурузу в початках гибридной популяции Краснодарская 1/49 II репродукции с естественной влажностью зерна от 28 до 34%.

Чтобы результаты выполненной намеченной программы исследования на лабораторной установке реально отображали действительные процессы в производственных камерных сушилках, выбираем параметры сушки равными по значениям, применяемым в производстве и рекомендуемым как оптимальные большинством исследователей: толщина слоя початков $h = 3,0$ м, скорость фильтрации сушильного агента $v = 0,4$ м/с, удельная подача сушильного агента $g = 600$ м³/т. час, температура сушильного агента $t_{ca} = 45-50-55^\circ\text{C}$.

В опытах непосредственно измеряли: температуру зерна и стержня в початках в различных сечениях толщины слоя; температуру сушильного агента в этих же сечениях; изменение массы кукурузы в початках в кассете в процессе сушки; продолжительность односторонней продувки слоя сушильным агентом (частоту реверсирования); количество сушильного агента, подаваемого в кассету; показания сухого и мокрого термометров наружного атмосферного воздуха и отработавшего сушильного агента; расход электроэнергии в электрокалорифере на нагрев воздуха для определения удельного расхода топлива; температуру сушильного агента, зерна и стержней початков измеряли при помощи малоинерционных хромелькопелевых термопар, ЭДС которых записывали двенадцатиточечным потенциометром ЭПП-09М, а температуру сухого и мокрого термометров отработавшего сушильного агента — при помощи психрометра Августа с поправкой на скорость воздуха, а также деформационного гигрометра.

Продолжительность односторонней продувки слоя початков

определялась предельно допустимой температурой нагрева зерна семян кукурузы для данной влажности в крайних початках со стороны подвода сушильного агента. Средневзвешенную влажность зерна рассчитывали по убыли массы.

Последовательную схему подключения камер имитировали подачей в течение первой половины периода сушки сушильного агента пониженной влагоемкости, реальной для производственных условий. При этом необходимую пониженную температуру регулировали и поддерживали термостатирующим шкафом, а относительную влажность сушильного агента повышали вводом в поток воздуха капельницей необходимого расчетного количества воды.

Экспериментальные данные по кинетике сушки представлены таблицами и графиками кривых сушки, скоростей сушки и температур нагрева зерна и стержня. Образцы семян кукурузы, высушенных при различных режимах, анализировали по следующим показателям качества: энергия прорастания и всхожесть в лабораторных условиях до хранения и после 3-х месяцев хранения; содержание общего азота в зародыше, в том числе солерастворимой фракции, белкового и небелкового азота в процентах; энергия прорастания и всхожесть в полевых условиях; урожайность на зерно в полевых условиях.

Энергию прорастания и всхожесть определяли в лабораториях контрольно-семенных инспекций Кабардино-Балкарской АССР. На кафедре технологии хранения пищевых продуктов и зерноведения ОТИПП им. М. В. Ломоносова проверяли энергию прорастания и всхожесть после сушки семян до хранения и после 3-х месяцев хранения их, а также содержание общего азота. Общий азот определяли по Кьельдалю (ГОСТ 10846-64), а выделение солерастворимой фракции с последующим разделением на белковый и небелковый азот проводили по методике В. Г. Клименко.

Энергия прорастания, всхожесть и урожайность в полевых условиях определялись на Кабардино-Балкарской государственной сельскохозяйственной опытной станции по стандартным методикам, и также по урожайности в производственных условиях в колхозах Кабардино-Балкарской АССР, расположенных в зонах с разными климатическими условиями (степной, предгорной и горной). Посевы кукурузы в колхозах проводили семенами, полученными после сушки, на рекомендованных нами режимах в производственных условиях. Исследования проведены на экспериментальной установке (см. рис. 1), созданной в ОТИПП им. М. В. Ломоносова с участием автора настоящей работы и смонтированной на Нальчикской реализационной базе Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов.

Особенность лабораторной установки заключается в следующем: кассета закрепляется на оси и путем поворота ее вокруг этой оси на 180° можно изменять направление подачи сушиль-

ного агента; просушиваемый материал может взвешиваться для определения количества испаренной влаги без разгрузки кассеты в любое заданное время в процессе сушки; толщину слоя початков в кассете можно изменять от любого минимального до максимально возможного, равного толщине слоя в камерных сушилах; в установке возможно чередование подачи сушильного агента и атмосферного воздуха в любых заданных интервалах времени с условием автоматизации по заданной программе. Масса початков в кассете при толщине слоя 3 м составляет 277—285 кг, масса тары — 48 кг.

В соответствии с намеченной программой исследования опыты были проведены в 3 этапа. На первом этапе были прове-

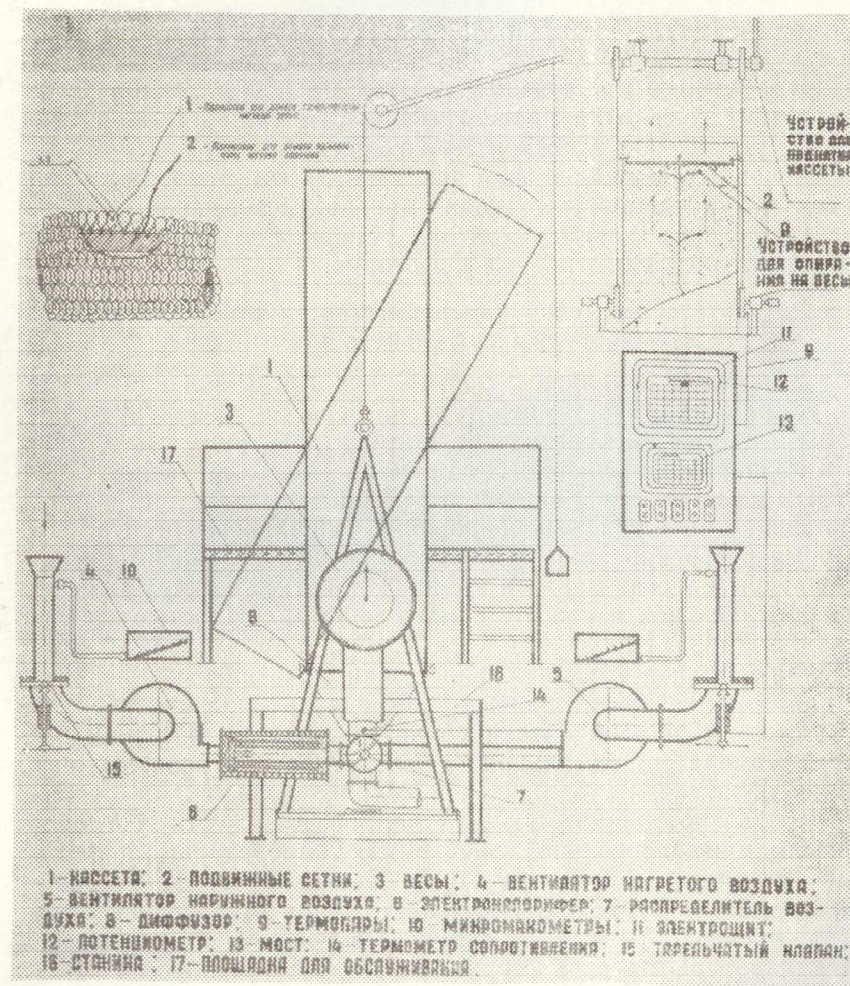


Рис. 1. Экспериментальная лабораторная установка для исследования процесса сушки кукурузы в початках.

дены серии опытов по определению возможности повышения температуры сушильного агента и наиболее целесообразное время реверсирования его при условии сохранения качества семян кукурузы.

На втором этапе проведены серии опытов по определению скорости сушки и производительности камерных сушилок, т. е. определяли эффективность повышения температуры агента сушки. На третьем этапе проведены серии опытов с целью оценки сравнительной эффективности последовательной и параллельной схем подключения камер в кукурузных сушилках. Результаты серий опытов всех 3-х этапов обрабатывали в виде графических зависимостей:

$$W^c = f(\tau); \frac{dW^c}{d\tau} = f(W^c); \Theta_3 = f(\tau); \Theta_{ст} = f(\tau).$$

Параллельно с проведением опытов на лабораторной установке в 1971 году были проведены опытные сушки в производственных условиях, а в 1972 и 1973 годах разработанные интенсифицирующие режимы сушки были внедрены в производство на всех кукурузообрабатывающих заводах Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов, в период работы которых проводились производственные испытания.

Результаты исследования возможности повышения температуры сушильного агента

На основании анализа теоретических представлений ранее было установлено, что температура нагрева семян кукурузы находится в прямой зависимости от температуры сушильного агента и в обратной зависимости от времени контакта зерна с сушильным агентом. Сокращение времени контакта достигается сокращением времени реверсирования сушильного агента.

Время реверсирования сушильного агента в зависимости от температуры нагрева зерна в крайних початках кукурузы верхней и нижней зон в кассете с начальной влажностью зерна $W^c = 52\%$ ($W^0 = 34,2\%$) при $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$ и параллельном подключении камер, а также кривая сушки показаны на рис. 2.

Анализ приведенных кривых температур нагрева зерна в соответствии с кривой сушки свидетельствует, что в каждый данный момент максимальная температура нагрева зерна в крайних початках, находящихся в худших условиях, не превышала предельно допустимую для данной влажности согласно принятым нами предельно допустимым температурам по рекомендациям Ф. Д. Братерского, В. А. Яковенко, Л. П. Торжинской. Время реверсирования для достижения этих условий составило в среднем 1 час 45 минут. Из графика видно также, что температура нагрева стержней этих же крайних початков на 3—5°С ниже температуры нагрева зерна, что подтверждает данные исследований В. А. Яковенко, Г. С. Зелинского,

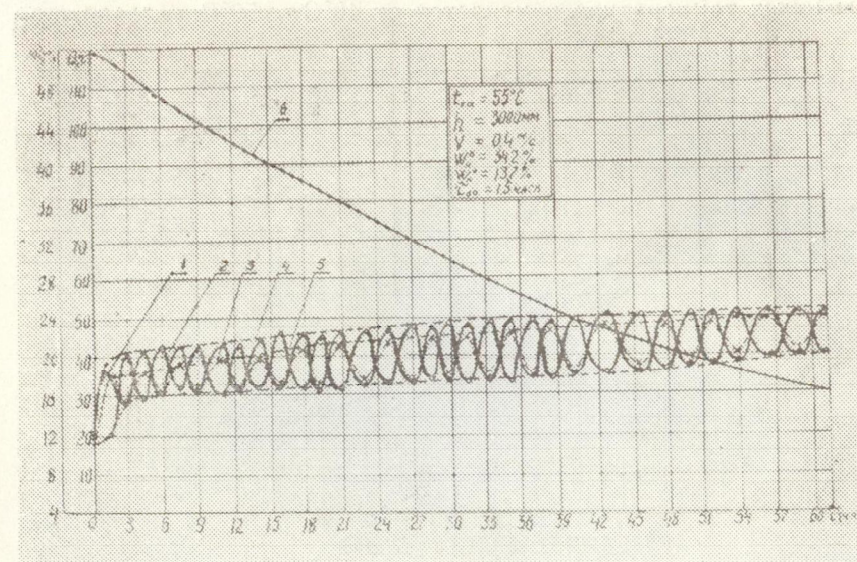


Рис. 2. Температура нагрева зерна и стержня, время реверсирования сушильного агента и кривая сушки при $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$ и параллельном подключении камер.

В. Г. Лебединского. Учитывая это обстоятельство, а также запас по температуре нагрева зерна в наших опытах, в сравнении с предельно допустимыми, принимаем необходимое время реверсирования 2 часа. Необходимое время реверсирования при режимах сушки с температурой сушильного агента 50°C составляет 3 часа.

Опыты, проведенные с применением более высокой температуры сушильного агента с условием поддержания максимально допустимых температур нагрева зерна в крайних початках, показали, что время реверсирования сушильного агента резко сокращается. В связи с нереальностью применения таких режимов сушки при существующих конструкциях камерных сушилок в дальнейшем от применения температуры сушильного агента более 55°C мы отказались.

Результаты исследования влияния температуры сушильного агента и времени его реверсирования на кинетику сушки

На рис. 3 представлены кривые сушки зерна семенной кукурузы, полученные при $h = 3,0 \text{ м}$, $v = 0,4 \text{ м/с}$, $W^c = 41,4\%$, параллельном подключении камер при следующих режимах: $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$, $\tau_{оп} = 2$ часа; $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$ и $\tau_{оп} = 3$ часа, и $t_{ca} = 45^\circ\text{C}$ и $\tau_{оп} = 1/2$ периода сушки. Ступенчатые режимы сушки согласно инструкции,

в которых температура изменяется от 40°C до 50°C, условно принимаем $t_{ca} = 45^\circ\text{C}$.

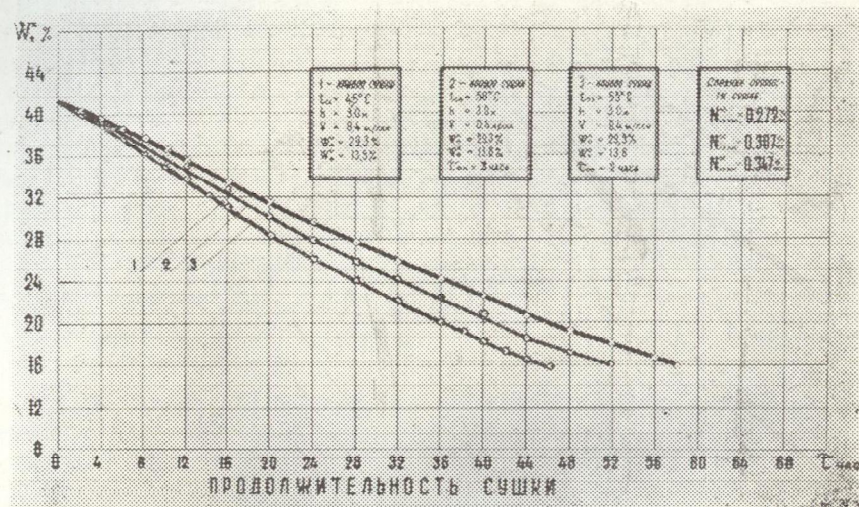


Рис. 3. Кривые сушки семенной кукурузы в початках при параллельном подключении камер ($t_{ca} = 55^\circ\text{C}$; 50°C ; 45°C).

Из анализа кривых сушки видно, что при прочих равных условиях средняя скорость сушки возрастает с увеличением температуры сушильного агента. Так, при $t_{ca} = 45^\circ\text{C}$ она равна $N_{cp}^{45} = 0,272\%$ /час; при $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$ $N_{cp}^{50} = 0,307\%$ /час; при $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$ — $N_{cp}^{55} = 0,347\%$ /час. Увеличение средней скорости сушки составило: при повышении температуры сушильного агента с 45 до 50°C —13,0%, при повышении с 50°C до 55°C —12,9%. В общем, при повышении температуры сушильного агента до 55°C и параллельном подключении камер средняя скорость сушки возрастает на 27,5% по сравнению с режимами, рекомендуемыми инструкцией по обработке гибридных и сортовых семян кукурузы на заводах, т. е. на 2,7% — 2,8% на каждый градус повышения температуры сушильного агента выше 45°C . Полученные нами результаты подтверждают данные исследований В. С. Уколова.

Из анализа графиков скоростей сушки семян кукурузы при различных режимах, представленных на рисунке 4, видно, что независимо от температуры сушильного агента и схемы подключения камер при частом реверсировании сушильного агента наблюдается определенный период, в течение которого процесс сушки протекает при постоянной усредненной скорости.

Продолжительность периода с постоянной скоростью составляет 35—55% к общему времени сушки. Причем при парал-

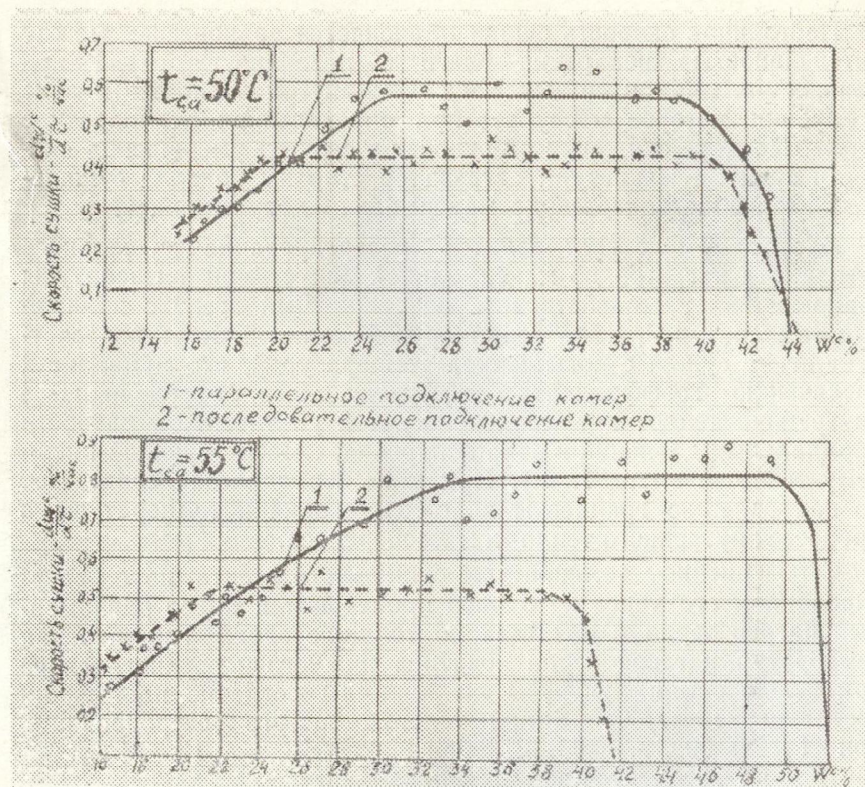


Рис. 4. Кривые скоростей сушки при параллельном и последовательном подключении камер ($h = 3,0$ м; $v = 0,4$ м/с).

лельном подключении камер прогрев всей массы початков при толщине слоя 3,0 метра и скорости фильтрации сушильного агента 0,4 м/с составляет 3—4 часа, в течение которого скорость сушки достигает максимального значения, равного 0,47—0,51%/час, и период постоянной скорости составляет 38—40% от всего времени сушки. При последовательном же подключении камер время прогрева увеличивается в два раза и составляет 7—8 часов, скорость сушки при этом достигает 0,37—0,40%/час и период постоянной скорости составляет 50—54% от всей продолжительности сушки. Таким образом, при параллельном подключении камер процесс с начала сушки протекает при постоянной скорости более интенсивно, продолжительность всего периода сокращается на 18—23% и обеспечиваются лучшие условия для сохранения и улучшения качества семян кукурузы после сушки по сравнению с последовательным подключением.

Постоянная скорость сушки объясняется равновесием между интенсивностью испарения влаги с поверхности зерна при данных режимах и ее перемещением внутри зерновки к зоне испарения, которое наступает при определенной температуре зерна. По мере снижения влажности в зерне и уменьшения скорости сушки температура нагрева со стороны подвода сушильного агента повышается до максимально допустимой.

В этот момент производится реверсирование сушильного агента. На нагретое до максимальной допустимой температуры зерно начинает воздействовать на сушильный агент с пониженной температурой, а на зерно другой крайней зоны воздействует агент сушки с повышенной температурой, что приводит к увеличению коэффициента диффузии влаги, определяющего внутренний тепло- и массоперенос, и к увеличению разности парциальных давлений в зоне испарения, способствующей внешнему тепло- и влагообмену. При этом периодически совпадают по направлению градиенты влагосодержания и температуры в процессе внутреннего тепло- и массопереноса.

С повышением температуры сушильного агента, но с реверсированием его через 2—3 часа происходит и более равномерный нагрев зерна в початках по толщине слоя. Так, перепад температур нагрева зерна початков нижнего и верхнего слоев при сушке семян кукурузы по режимам согласно инструкции составляет 16—18°C, а при условии частого реверсирования при $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$ — 10—12°, при $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$ — 13—14°C и на расстоянии 75 см от крайних слоев—соответственно—6—7°C и 8—10°C. Таким образом, процесс сушки семенной кукурузы при повышенных температурах сушильного агента до 55°C, но с реверсированием его через 2—3 часа протекает при более равномерном прогреве слоя початков по высоте насыпи, чем при режимах сушки согласно инструкции.

Исследование влияния последовательного и параллельного подключения камер на кинетику процесса сушки

На рис. 5 приведены кривые сушки зерна семян кукурузы для $t_{ca} = 45$ и 55°C при равных условиях по толщине слоя початков, скорости фильтрации сушильного агента и начальной влажности зерна, но при разных схемах подключения камер: параллельной и последовательной.

Из анализа результатов исследований для $t_{ca} = 45-50-55^\circ\text{C}$ находим, что для $t_{ca} = 45^\circ\text{C}$ (согласно инструкции) средняя скорость сушки составила: при последовательном подключении—0,22%/час, а при параллельном — 0,27%/час; для $t_{ca} = 50^\circ\text{C}$ — соответственно — 0,25%/час и 0,30%/час; а при $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$ — 0,29%/час и 0,34%/час;

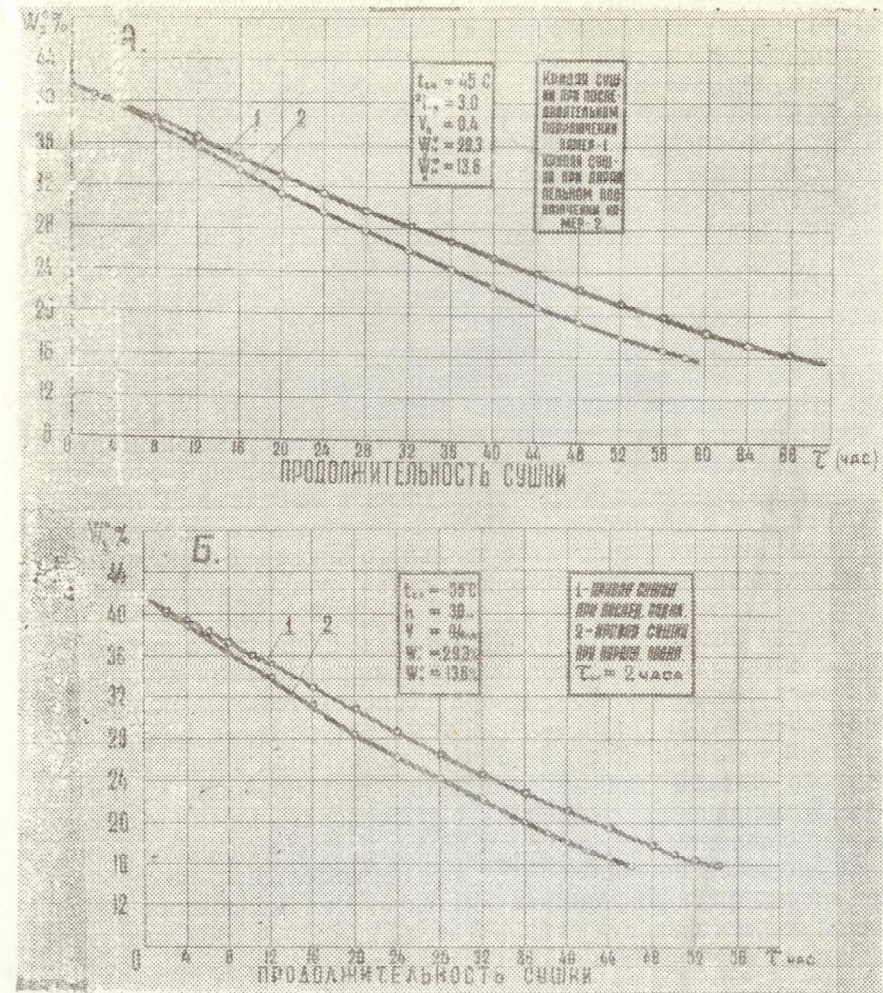


Рис. 5. Кривые сушки семенной кукурузы в початках при последовательном и параллельном подключении камер (А—при $t_{ca} = 45^\circ\text{C}$; Б — при $t_{ca} = 55^\circ\text{C}$).

Из опытов следует, что при прочих равных условиях средняя скорость сушки при параллельном подключении камер на 18—23% выше, чем при последовательном. Причем с увеличением температуры сушильного агента увеличение скорости сушки замедляется, т. е. параллельный способ подключения камер оказывает меньшее влияние на увеличение скорости сушки.

Изменение кинетики процесса сушки при указанных схемах подключения объясняется следующим. На основании исследований при сушке початков на лабораторной установке, а так-

же в производственных условиях установлено, что средний потенциал сушки частично отработавшего сушильного агента, поступающего во вторую половину камер при последовательном подключении, значительно снижен и составляет соответственно: при $t_{ca} = 50^{\circ}\text{C}$ — $5-6^{\circ}\text{C}$, при $t_{ca} = 55^{\circ}\text{C}$ — $6-7^{\circ}\text{C}$.

При параллельной схеме подключения камер средний потенциал сушки в течение всего периода в 2,5—2,8 раза выше и соответственно равен $E^{50} = 14-16^{\circ}\text{C}$ и $E^{55} = 17-19^{\circ}\text{C}$.

При последовательном подключении камер в течение половины периода сушки на початки кукурузы воздействует сушильный агент с пониженной влагоемкостью, что увеличивает общую продолжительность периода сушки на 18—23%. Некоторое уменьшение скорости фильтрации и соответственно уменьшение удельной подачи сушильного агента при параллельном подключении камер оказывает меньшее влияние на среднюю скорость сушки по сравнению с воздействием сушильным агентом с увеличенным потенциалом сушки на повышение скорости.

Приведенные результаты согласуются с выводами Л. А. Мхитарьянца, И. Г. Коротева, В. М. Копейковского, полученные при исследовании влияния сушильного агента с пониженным влагосодержанием на интенсивность сушки подсолнечных семян.

Средние температуры отработавшего сушильного агента, с начальной его температурой 50°C при параллельном подключении камер равны $33-35^{\circ}\text{C}$ и при последовательном подключении — $29-31^{\circ}\text{C}$, а при начальной температуре $t_{ca} = 55^{\circ}\text{C}$ — соответственно — $37-38^{\circ}\text{C}$ и $33-34^{\circ}\text{C}$, т. е. перепад температур сушильного агента при параллельном подключении камер на 15—17% меньше по сравнению с последовательным. Однако при параллельном подключении камер расход условного топлива сокращается по сравнению с последовательным, но процент уменьшения расхода топлива меньше, чем процент сокращения продолжительности сушки. Так, при $t_{ca} = 45^{\circ}\text{C}$ и параллельном подключении камер продолжительность сушки сократилась на 22%, а удельный расход топлива — на 10%; при $t_{ca} = 50^{\circ}\text{C}$ — соответственно — на 20% и 8% и при $t_{ca} = 55^{\circ}\text{C}$ — на 19% и 5%. Удельный расход электроэнергии также снизился на 13—15%.

Качество семян кукурузы при интенсифицированном процессе сушки

По данным результатов анализов семян кукурузы после сушки на лабораторной установке, взятых из образцов крайних початков верхней и нижней зон кассеты, просушенных при температуре сушильного агента 55°C и времени реверсирования 2 часа с параллельным подключением камер во всех сериях опытов, были получены заключения Нальчикской государствен-

ной семенной инспекции о том, что качество семян по всхожести соответствует требованиям стандарта, предъявляемым к семенам 1 класса. Энергия прорастания находилась в пределах 94—96%, а всхожесть — 96—98%. Энергия прорастания и всхожесть семян, определенных непосредственно после сушки и после 3-х месяцев хранения, а также содержание общего азота и его солерастворимой фракции, взятых из семян кукурузы, просушенных при указанных режимах сушки на лабораторной установке, приведены в таблице № 1.

Из таблицы видно, что образцы семян кукурузы с температурой нагрева зерна до 59°C теряют семенные свойства. Все зерно непосредственно после сушки с температурой нагрева зерна в пределах допустимых имеет несколько пониженную энергию прорастания. Снижение энергии прорастания В. А. Яковенко объясняет подавленным состоянием семян после сушки, которая восстанавливается по истечении 3-х месяцев хранения.

После сушки в зерне кукурузы по сравнению с исходным образом наблюдается также тенденция повышения количества общего азота. Это можно объяснить миграцией азотистых веществ из стержня в зерно во время сушки. Снижение количества солерастворимой фракции при повышении температуры нагрева семян можно объяснить частичной денатурацией белка. Этим же объясняется уменьшение белкового азота и увеличение небелкового.

Всхожесть семян и урожайность в полевых условиях проверяли в 1972 и 1973 годах на Кабардино-Балкарской государственной сельскохозяйственной опытной станции согласно существующей методике. По результатам проверки полевая всхожесть составила 86,4—89,0%, а урожайность — 68,4—72 центнера с гектара по опытным образцам и — соответственно — 87,2—88,5% и 70,1—72 центнера с гектара по контрольным образцам.

Урожайность кукурузы на зерно в колхозах Кабардино-Балкарской АССР в 1973 году, посеянной семенами, полученными с хлебоприемных предприятий Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов, которые сушили при рекомендованных режимах сушки, составила в целом 50—53 центнера с гектара, а во многих колхозах — 60—77 ц/га (см. таблицу № 2).

Внедрение результатов исследований в производство и их экономическая эффективность

В 1972 и 1973 годах были внедрены в производство режимы сушки семенной кукурузы в камерных сушилках с температурой сушильного агента 50°C с последовательным и параллельным подключением камер на всех кукурузообрабатывающих заводах Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов.

При этом средняя скорость сушки и соответственно производительности сушилок в целом по управлению возросла на

Качество семян кукурузы после сушки и после 3-х месяцев хранения

Начальная влажность зерна, %	Схема подкю-чения камер	Температура су-пильного аген-та, °С	Температура на-грева зерна, °С	Продолжитель-ность сушки, час	Непосредственно после сушки		После сушки 3-х месяцев хранения		Азот зародыша				
					энергия прораст., %	всхо-жесть, %	энергия прораст., %	всхо-жесть, %	Общий, % СВ	Соле-раст-воримый	в том числе		
											небел-ковый	белко-вый	в % от общего азота
Конт-роль	---	---	---	---	---	96	100	98	99	3,43	90,96	33,65	66,35
28,3	последов.	45	39	67	67	93	98	93	98	3,32	84,04	33,33	66,67
28,3	параллельн.	45	41	62	62	95	99	95	99	3,53	89,04	35,84	64,16
28,1	последов.	50	47	60	60	88	100	94	99	3,37	85,49	37,00	63,00
30,6	параллельн.	50	48	57	57	76	100	98	99	3,61	85,04	34,53	65,47
28,7	последов.	55	49	49	49	71	99	93	99	3,48	83,91	38,36	61,64
29,8	параллельн.	55	52	46	46	76	100	95	100	3,46	83,12	34,96	65,04
28,3	параллельн.	60	59	16,5	16,5	0	29	5	29	3,38	73,37	39,52	60,48

Таблица 2
Влияние рекомендованных режимов сушки на семенные свойства и урожайность кукурузы, высеянной в колхозах КБАССР в 1972—1973 гг.

Наименование предприятия поставщика семян	Влажность зерна, %		Темпера-тура су-пильного агента, °С	Схема под-ключения камер су-шилки	Экспозиция сушки, час	Всхожесть семян %		Место посе-вов (колхозы)	Урожай-ность, ц/га	
	до сушки	после сушки				до сушки	после сушки		1972 г.	1973 г.
Баксанский	34,8 ± 35,6	12,8 ± 13,3	50	последов.	78 ÷ 82	92 ÷ 94	97 ÷ 98	«Красный Кавказ» им. Шогендукова	74,8 77,5	73,3 75,9
Майский	34,1 ± 30,3	12,8 ± 13,0	50	параллельн.	70 ÷ 73	91 ÷ 95	97 ÷ 97	«Красная нива» «Ленинцы»	62,4 50,8	71,2 55,8
Аргуданский	33,8 ± 29,8	12,9 ± 12,4	50	последов.	77 ÷ 81	93 ÷ 94	96 ÷ 97	им. Ленина им. Советской Армии	52,1 33,9	70,0 62,0
Солдатский	33,5 ± 31,0	12,7 ± 13,0	50	параллельн.	72 ÷ 75	94 ÷ 95	96 ÷ 98	им. Чапаева	50,2	70,6

29%, удельный расход топлива сократился на 13—16% и удельный расход электроэнергии — на 24—25%.

Общие затраты на сушку снизились на 10—20%.

Экономический эффект в целом по управлению от внедрения в производство рекомендованных режимов сушки только на сезон 1973 года, в течение которого было просушено 157 тыс. тонн семенной кукурузы, составил 453 тыс. рублей.

Внедрение в производство режимов сушки семенной кукурузы в початках с температурой сушильного агента 55°C и реверсированием его через 1,5—2 часа при параллельном подключении камер практически невозможно без надлежащей реконструкции действующих камерных сушилок. Это вызвано большой трудоемкостью и большим количеством ручных операций при изменении направления сушильного агента, а также необходимостью остановки сушилки на 20—40 минут при каждом переключении.

В соответствии с поставленными задачами исследования нами разработана принципиальная схема реконструкции действующих камерных сушилок СКП-6, позволяющая использовать режимы сушки с температурой сушильного агента 55°C, временем его реверсирования через 1,5—2,0 часа и параллельным подключением камер. Схема реконструкции заключается в том, что в верхней и нижней стенках диффузора между топкой и сушилкой вырезаются верхний и нижний люки для вывода отработанного сушильного агента. Люки попеременно перекрываются одним из 2-х клапанов, шарнирно подвешенных в диффузоре к раме со стороны топки. Клапаны соединены между собой двумя тягами с регулировочными гайками, служащими для первоначального регулирования одновременного прилегания клапанов к люкам. Подъем и опускание клапанов осуществляется электротельфером, подвешенном на балке между топкой и сушилкой. Управление приводом автоматизировано. Автоматизация реверсирования через запрограммированное время осуществляется при помощи реле времени и конечных выключателей. Остановка сушилки в период реверсирования сушильного агента не требуется.

На основании данных проведенных исследований разработана усовершенствованная камерная сушилка, построена на Нарткалинском хлебоприемном пункте Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов и испытана Ростовской машиностроительной станцией.

На рис. 6, фиг. 1 показана принципиальная схема сушилки, которая представляет собой кирпичное здание, разделенное 4-ярусным коридором, по обе стороны которого расположено восемь сушильных камер. С торцевой стороны сушилки располагается топка с четырьмя вентиляторами, каждый из которых соединен самостоятельным воздуховодом с сушилкой. Коридоры I и II этажей сушилки разделены по высоте горизонталь-

ной металлической перегородкой на две части каждый. Верхние части служат для подвода, а нижние — для отвода сушильного агента из камер. Проемы верхних фрамуг в камерах и горизонтальных перегородках перекрываются специальными клапанами (см. фиг. 2).

Переключение клапанов механизировано при помощи электромеханического привода с дистанционным управлением, а также может быть автоматизировано в соответствии с заданным режимом сушки. Реверсирование сушильного агента осуществляется без остановки сушилки. Режим сушки семенной

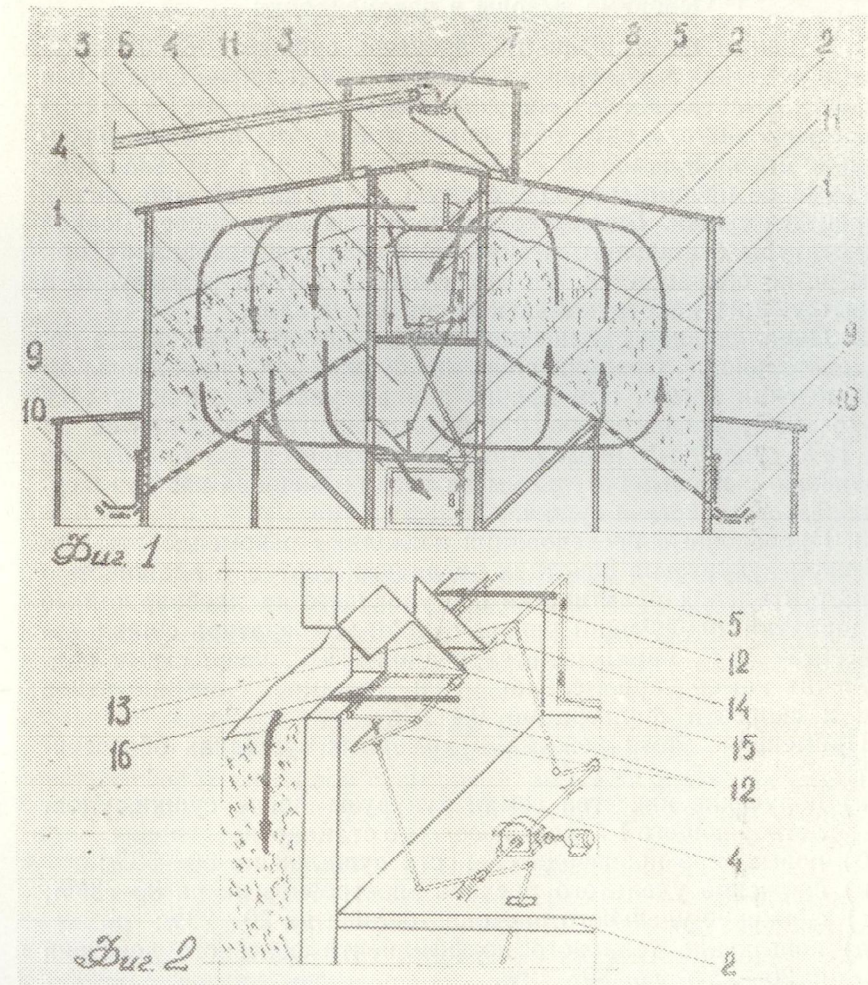


Рис. 6. Схема усовершенствованной камерной сушилки для сушки кукурузы в початках

кукурузы применяется следующий: температура сушильного агента—55°C, время реверсирования—2 часа, подключение камер параллельное.

Сравнительные технико-экономические показатели работы усовершенствованной сушилки и существующих сушилок СКП-6, по данным испытаний Ростовской машиноиспытательной станцией, показали, что производительность усовершенствованной сушилки увеличилась на 55%, удельный расход топлива уменьшился на 18%, стоимость сушки одной плановой тонны снизилась на 31,4%.

Основные выводы и рекомендации

1. С целью интенсификации процесса сушки семенной кукурузы в початках в камерных сушилках при толщине слоя 3 м и скорости фильтрации 0,4 м/с допустимо применение температуры сушильного агента 55°C при условии, что время реверсирования его не превышает 2-х часов. Температура нагрева зерна при этом не превышает допустимую для данной влажности в процессе сушки. Возможно также применение более высокой температуры сушильного агента, но время реверсирования при этом резко сокращается, что практически трудно реализуемо в существующих конструкциях камерных сушилок.

2. Параллельная схема подключения камер эффективнее последовательной. Средняя скорость сушки при параллельном подключении камер, при прочих равных условиях, повышается на 18—23%, удельный расход электроэнергии снижается на 15—16%, удельный расход топлива снижается на 5—10% по сравнению с последовательным за счет повышения коэффициента полезного действия сушки.

3. Проведенные исследования позволяют рекомендовать для семенной кукурузы в початках различных сортов, с влажностью зерна в пределах практически поступающего на хлебоприемные предприятия следующий режим сушки: температура сушильного агента—55°C, время реверсирования 1,5—2 часа, схема подключения камер параллельная, при толщине слоя початков 3 м и скорости фильтрации 0,4 м/с.

Применение этого режима в камерных сушилках обеспечивает:

- а) получение качества семян кукурузы после сушки, удовлетворяющего I классу посевного стандарта;
- б) повышение производительности сушилок на 50—55%;
- в) снижение удельного расхода электроэнергии на 36—39%;
- г) снижение удельного расхода топлива на 20—23%;
- д) повышение теплового коэффициента полезного действия с 20—25% до 39—42%.

4. Характерными особенностями процесса сушки семенной кукурузы в початках при применении рекомендованных режимов являются:

а) более равномерный прогрев и высушивание массы початков по толщине слоя в камере по сравнению с действующими режимами (разность температур нагрева зерна верхнего и нижнего слоев снижается с 16—18°C до 10—13°C);

б) сокращение времени прогрева насыпи початков по толщине слоя с 7—8 часов до 3—4 часов;

в) повышение в два раза скорости сушки за период прогрева (с 0,23—0,25%/час до 0,47—0,51%/час) по сравнению со средней скоростью при действующих режимах;

г) протекание процесса сушки с постоянной скоростью влаготдачи от начальной влажности зерна 32—34% до 22—24% и с падающей скоростью сушки — с 22—24% до 13%.

5. При применении рекомендуемых температурных режимов процесс сушки с постоянной скоростью протекает в начальный период значительно интенсивнее при параллельном подключении камер, чем при последовательном. Это способствует сокращению времени сушки с постоянной скоростью до влажности зерна 22—23%, что обеспечивает лучшие условия для сохранения всхожести семян при тепловой сушке с повышенными температурами сушильного агента.

6. Средняя скорость сушки возрастает на 2,7—2,8%, на каждый градус при повышении температуры сушильного агента — с 45°C до 55°C за счет увеличения теплового коэффициента полезного действия сушилки.

7. Температура нагрева стержня початка кукурузы при применении рекомендуемых режимов сушки на 3—5°C ниже температуры нагрева зерна, что способствует сохранению семенных качеств кукурузы при сушке с повышенными температурами сушильного агента.

8. При сушке с параллельным подключением камер всхожесть и энергия прорастания семян после 3-х месяцев хранения выше по сравнению с последовательным, что можно объяснить более равномерным нагревом и высушиванием семян по толщине слоя в камере при рекомендуемых режимах сушки.

9. На основании проведенных исследований разработана и внедрена в производство промышленная конструкция усовершенствованной камерной сушилки, а также разработана принципиальная схема реконструкции действующих камерных сушилок, позволяющие применить рекомендованные режимы сушки с меньшим временем реверсирования сушильного агента.

При этом производительность камерных сушилок повышается на 50—55% и появляется возможность частично автоматизировать некоторые функции управления процессом сушки.

Экономическая эффективность при внедрении режимов сушки и усовершенствованной зерносушилки определяется снижением стоимости затрат на сушку семенной кукурузы на 30—32%. По Кабардино-Балкарскому управлению хлебопродуктов в 1973 году экономический эффект составил 678 тыс. рублей.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано самостоятельно и в соавторстве в следующих статьях:

1. Опыт сушки семенной кукурузы на хлебоприемных предприятиях Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов. «Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность», № 4, 1972.
2. Состояние и перспективы послеуборочной обработки семенной кукурузы в Кабардино-Балкарской АССР. «Кукуруза», № 8, 1973.
3. Опыт работы с гибридными и сортовыми семенами на хлебоприемных предприятиях Кабардино-Балкарии, ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1973.
4. Интенсификация процесса сушки семенной кукурузы в початках. Сб. «Хранение и переработка зерна», серия «Элеваторная промышленность». М. ЦНИИТЭИ Минзага СССР, № 3, 1973.
5. Способ термообработки сыпучих материалов. Авторское свидетельство на изобретение № 259697 от 3/Х—1969 года.
6. Интенсификация процесса сушки семенной кукурузы в камерных сушилках. Сб. «Хранение и переработка зерна», серия «Элеваторная промышленность». М. ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1974, вып. 2, с.
7. Эффективность повышения температуры сушильного агента при сушке семенной кукурузы в камерных сушилках. ЦНИИТЭИ Минзага СССР, М., апрель 1974 (депонирование статьи).
8. Сравнительная эффективность последовательного и параллельного подключения камер в сушилках СКП-6, «Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность», № 5, 1974.

Результаты исследований доложены:

1. На научных конференциях ОТИИП им. М. В. Ломоносова, 1972—1974 гг.; 2. На Всесоюзном совещании по обработке семян зерновых и масличных культур (ноябрь 1971 г., г. Калуга); 3. На Всероссийском совещании по подготовке материально-технической базы к приему, сушке и обработке зерна (июнь 1971 г., г. Ульяновск); 4. На Всероссийском семинаре по вопросу: «Изучение и внедрение передового опыта приемки, обработки и хранения гибридных и сортовых семян кукурузы в Кабардино-Балкарском управлении хлебопродуктов» (июль 1972 года, г. Нальчик).