

Автор ер.
с 46

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

Одесский технологический институт пищевой промышленности
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

СТАНКЕВИЧ Георгий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПРОДОВОЛЬСТВЕННО-
КОРМОВОЙ КУКУРУЗЫ В ШАХТНЫХ 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

Переучет 19 87

Одесса - 1980

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Н.В. ОСТАПЧУК

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент В.А. ЯКОВЕНКО

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,

Б.И. ЛЕОНЧИК;

технических наук,

. Ю.В. ЕСАКОВ

комбинат хлебопродуктов.

1980 г. в 10 час. на

68.35.02 при Одесском тех-

ности имени М.В. Ломоносова

библиотеке института.

1980 г.

И.К. Чайка

ОНАХТ 12.06.12
Исследование процесс



v013501

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одной из главных народнохозяйственных задач, поставленных XXV съездом КПСС и пленумами ЦК КПСС, является значительное увеличение производства сельскохозяйственной продукции. В 1981-1985 гг. среднегодовой валовой сбор зерна намечено довести до 238-243 миллионов тонн, а к 1990 году - до одной тонны на человека в среднем по стране.

Среди зерновых культур кукуруза занимает третье место в мире и ей отводится важная роль в обеспечении животноводства кормами, и в производстве пищевых продуктов. В последние годы, вследствие возросшей технической оснащенности сельского хозяйства, возрастают темпы уборки кукурузы, что влечет за собой продажу ее государству в более короткие сроки и приводит к увеличению доли заготавливаемой кукурузы с влажностью 30-35% и более. Такая кукуруза является нестойкой при хранении и должна пройти послеуборочную обработку, обеспечивающую ее сохранность.

Послеуборочная обработка кукурузы включает тепловую сушку, от своевременности и качества которой зависит стойкость и сохранность просушенного зерна. В системе заготовок практически вся кукуруза для продовольственно-кормовых целей сушится на шахтных зерносушилках, составляющих около 70% сушильной мощности. Обработка, в том числе и сушка кукурузы с высокой влажностью, недостаточно обоснованы, производительность оборудования на ней значительно ниже паспортной. Поэтому на хлебоприемных предприятиях, как правило, скапливается на открытых площадках значительное количество кукурузы, что приводит к повышенным потерям и снижению ее качества.

Кукуруза, как объект сушки, имеет свои особенности - высокая влажность зерна (обычно свыше 30%), сравнительно малая его удельная поверхность (примерно в 2 раза меньше зерна пшеницы), наличие плотной оболочки, затрудняющей процесс испарения влаги, и пр.

Одесский технологический институт пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова

v013501

Автор v 013501
С76 СТАНКЕВИЧ Г.Н.
Иссл. проц. сушки зер.
1980 5/9
В.06.13 Бешевская

12

В то же время интенсивность тепловлагообмена между зерном и агентом сушки зависит от размеров и формы зерна, а также от строения и химического состава зерна. Поэтому зерно кукурузы имеет более низкую способность к влагоотдаче по сравнению с зерном колосовых культур. Это обуславливает снижение интенсивности сушки зерна кукурузы и производительности шахтных зерносушилок. Например, по данным Бийской и Кустанайской МИС производительность сушилок ДСП-32-от при сушке кукурузы составляет в среднем 21-24 вместо 32 пл.т/час.

При экономически выгодных режимах сушки колосовых культур сьем влаги в шахтных зерносушилках за один пропуск составляет по паспортным данным 6%. Из-за высокой начальной влажности кукуруза может быть доведена до кондиционной влажности при 3-4 кратном пропуске через сушилку. При такой организации процесса требуются дополнительные емкости либо площадки для размещения накапливаемого зерна кукурузы, дополнительная работа транспортных механизмов и пр. Рециркуляционные зерносушилки, позволяющие сушить зерно в потоке независимо от начальной влажности, вследствие травмируемости зерна кукурузы пока не нашли широкого применения при сушке зерна кукурузы и находятся в стадии производственной проверки и освоения.

Следовательно, интенсификация процесса сушки зерна кукурузы с целью увеличения производительности сушилок, обеспечения поточности сушки независимо от исходной влажности зерна и сохранения при этом качества зерна является актуальной.

В работах А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, В.В. Красникова, В.П. Жидко, В.А. Резчикова и др. установлено, что интенсивность обезвоживания материалов с коллоидной капиллярно-пористой структурой лимитируется внутренней влажностью, которая зависит от температуры материала. От температуры зерна зависит также парциальное давление насыщенного пара над его поверхностью, опреде-

ляющее интенсивность внешнего влагообмена. Поэтому важным фактором, позволяющим интенсифицировать процесс сушки, является применение предварительного подогрева зерна.

В ОТИП им. М.В. Ломоносова Алейниковым В.И. была разработана технология сушки зерна различных культур в шахтных сушилках с предварительным конвективным подогревом и каскадный теплообменник для его нагрева и подсушивания в движущемся разрыхленном слое, а для достижения неограниченного снижения влажности зерна в дальнейшем был предложен комбинированный способ сушки - с предварительным подогревом и рециркуляцией в разрыхленном слое каскадного подогревателя. Новая технология сушки и оборудование прошли длительную производственную проверку и государственные испытания на зерне колосовых культур и подсолнечника. При этом было установлено увеличение производительности сушилок, снижение удельных энергозатрат, улучшение качества материала после сушки.

Однако для зерна кукурузы продовольственно-кормового назначения не обоснованы оптимальные условия ведения процесса, отсутствуют также данные о влиянии предварительного подогрева и рециркуляции на интенсивность сушки и качественные показатели зерна.

При комбинированном способе сушки созданы благоприятные условия для снижения количества травмированных зерен кукурузы. По имеющимся данным (Г.И. Креймерман, С.Д. Птицын, М.Г. Голиж и др.) при влажности кукурузы 23-25% его механические повреждения минимальны. Поэтому осуществление рециркуляции при влажности зерна 22-26%, что возможно при комбинированном способе, является предпосылкой поточной сушки кукурузы независимо от исходной влажности при минимальном травмировании зерна.

Цель работы. Целью настоящей работы является интенсификация процесса сушки зерна кукурузы продовольственно-кормового назначения в шахтных зерносушилках путем применения комбинированного

метода (предварительного подогрева и рециркуляции), обеспечения поточности сушки при сохранении качества зерна и разработка рекомендаций для промышленного использования результатов работы.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- установить кинетические закономерности сушки зерна кукурузы при комбинированном методе - с предварительным подогревом и рециркуляцией;
- определить технологические режимы сушки зерна кукурузы, обеспечивающие минимальный расход тепла, повышение производительности сушилок и позволяющие вести поточную сушку при сохранении качества зерна;
- провести производственную проверку рекомендуемых способа и режимов сушки и определить технико-экономические показатели зерносушилок при сушке зерна кукурузы;
- разработать рекомендации по применению оптимальных режимов сушки продовольственно-кормовой кукурузы в шахтных сушилках, переведенных на комбинированный способ сушки.

Научная новизна работы состоит:

- в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности интенсификации процесса сушки зерна кукурузы путем применения предварительного подогрева и рециркуляции зерна;
- в установлении количественных кинетических закономерностей процесса сушки продовольственно-кормовой кукурузы в условиях комбинированных методов сушки;
- в разработке алгоритма оптимизации процесса сушки по энергозатратам, основанного на экспериментально полученных кинетических закономерностях;
- в определении режимов сушки зерна кукурузы, обеспечивающих минимальный расход тепла при сохранении качества зерна кукурузы и увеличение производительности шахтных сушилок.

Практическая значимость работы заключается в разработке и практической реализации:

- оптимальных режимов сушки продовольственно-кормового зерна кукурузы в одинарных шахтных зерносушилках, повышающих их производительность, обеспечивающих снижение энергозатрат и поточную сушку независимо от влажности зерна кукурузы при сохранении его качества;
- рекомендаций по применению разработанных оптимальных режимов сушки кукурузы в переведенных на комбинированный способ одинарных шахтных сушилках.

Апробация работы. Результаты исследований внедрены в производство путем реконструкции шахтных зерносушилок ДСП-32-от на Помошнянской реалбазе хлебопродуктов и Пантаевском хлебоприемном предприятии Кировоградской области, а также на Любашевском элеваторе Одесской области, опубликованы в 6 статьях и доложены на всесоюзных, республиканских, городских и институтских научных конференциях и совещаниях. Результаты работы вошли в "Руководство по переводу зерносушилок ДСП-32-от на комбинированный способ сушки", согласованное с Минзагом УССР 4.03.1976 г., а также демонстрировались на ВДНХ СССР в 1979 году и отмечены бронзовой медалью (удостоверение № 47247). Экономическая эффективность от внедрения на одну зерносушилку составляет 5191 рублей в год.

Структура работы и содержание. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 195 наименований, в том числе 25 на иностранном языке, и приложений, и изложена на 192 страницах машинописного текста, включая 22 рисунка и 27 таблиц.

В первой главе приведены основные свойства, методы и режимы сушки зерна кукурузы для продовольственно-кормовых целей, изложены цель и задачи исследований.

Во второй главе дано описание экспериментальной установки, программы, методики исследований и обработки опытных данных.

В третьей и четвертой главах изложены результаты исследования кинетических закономерностей, выбор и оптимизация режимов сушки зерна кукурузы.

В пятой главе приведены рекомендации по переводу зерносушилок на комбинированный способ сушки, изложены результаты производственной проверки рекомендованных режимов сушки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Для разработки комбинированных режимов сушки зерна продовольственно-кормовой кукурузы в соответствии с основной целью и конкретными задачами исследования намечена программа исследования и создана экспериментальная установка. В качестве объекта исследования выбраны наиболее распространенные и районированные сорта Одесская 10 и Воронежская 80 и гибриды ВР-25Т и Буковинская 3 (первое поколение), нашедшие наибольшее применение для продовольственно-кормовых целей. Программой исследования были намечены серии опытов, в диапазоне изменения начальной влажности зерна от 19,5 до 57,2% (по отношению к абсолютно сухому веществу). Толщина слоя зерна в опытах была принята равной 200 мм, что соответствует рядовому расположению коробов в шахтных зерносушилках. Скорость сушильного агента была выбрана равной 0,4 м/с, как наиболее близкая к производственным условиям сушки зерна кукурузы. Для имитации работы выпускного устройства периодического действия в опытах чередовали (через 2 минуты) направление продувки исследуемого слоя и перемешивали зерно. Диапазон изменения температуры на стадии подогрева был равен 158-242°C, а при сушке в плотном слое - 80-200°C. Во всех опытах конечная влажность принята равной 16,0%.

В соответствии с намеченной программой была создана экспери-

ментальная установка, моделирующая условия работы шахтных зерносушилок. Экспериментальная установка состоит из двух сушильных камер для обработки зерна в кипящем и плотном слоях, двух электрокалориферов с вентиляторами и регулируемыи заслонками, смесительным кубом для замачивания зерна и щита с пуско-регулирующей аппаратурой. Расход и скорость сушильного агента (воздуха) измеряли при помощи оттарированных сопел и микроманометра ММН-200. Температуру воздуха и зерна замеряли хромель-копелевыми термомпарами в комплекте с электронным потенциометром ЭПП-0ЭМЗ. Температуру агента сушки поддерживали при помощи электронного регулирующего моста МСР. Кассету с зерном взвешивали на циферблатных весах ВЦ-200.

Методикой исследования были предусмотрены серии опытов по изучению кинетических зависимостей процесса сушки зерна кукурузы при сушке с предварительным подогревом и рециркуляцией, по установлению количественной оценки кинетических закономерностей процесса сушки и уточнению предельно-допустимого нагрева в условиях комбинированных методов.

Основные результаты исследования изложены в третьей и четвертой главах. Для установления кинетических закономерностей при сушке зерна после предварительного подогрева и выявления при этом характерных особенностей была проведена сравнительная серия опытов.

В соответствии с методикой проводили сушку кондуктивно подогретого до различных начальных температур θ_n зерна кукурузы при одинаковых для всех опытов режимных параметров. При таком подогреве (без испарения влаги) в сравниваемых опытах зерно имело одинаковую начальную влажность. Результаты опытов обработаны и представлены в виде графиков. На рис. I приведены кривые сушки (2-4) зерна кукурузы с начальной влажностью $W_n^c = 24,5\%$, предварительно подогретого соответственно до 38, 51 и 61°C (кривые 2, 3 и 4) и не подогретого (кривая 1), а на рис. 2 - кривые скорости сушки.

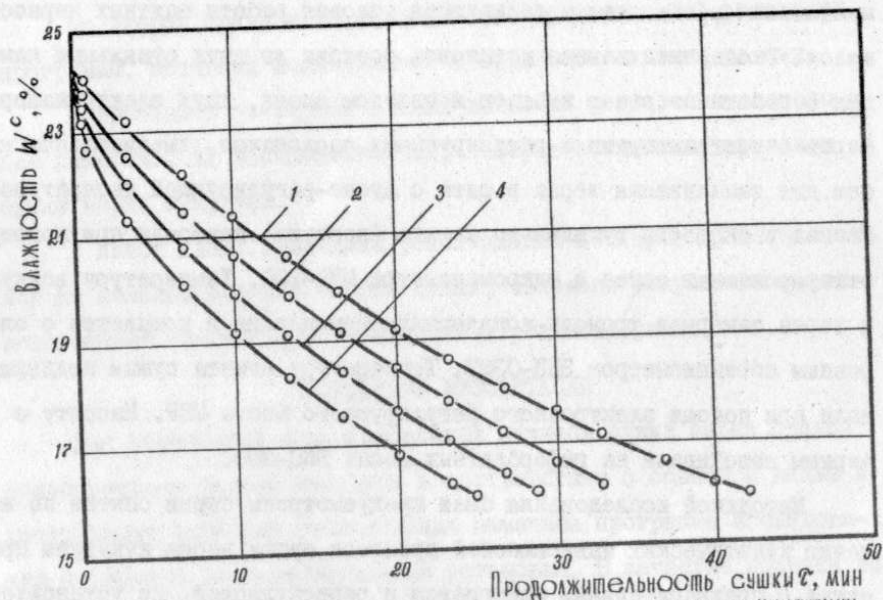


Рис. 1. Влияние предварительного нагрева зерна на кинетику сушки.
 1 - $\theta_H = 20^\circ\text{C}$; 2 - $\theta_H = 38^\circ\text{C}$; 3 - $\theta_H = 51^\circ\text{C}$; 4 - $\theta_H = 61^\circ\text{C}$

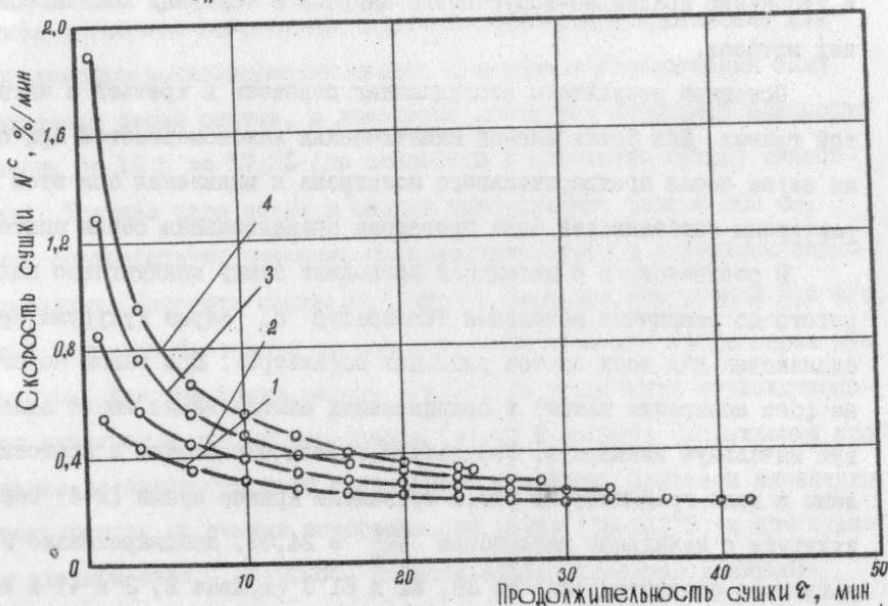


Рис. 2. Зависимость скорости сушки зерна кукурузы от начальной температуры зерна.
 1 - $\theta_H = 20^\circ\text{C}$; 2 - $\theta_H = 38^\circ\text{C}$; 3 - $\theta_H = 51^\circ\text{C}$; 4 - $\theta_H = 61^\circ\text{C}$

Анализ кривых свидетельствует о существенном различии интенсивности влагосъема при сушке зерна с различной начальной температурой. Для предварительно нагретого зерна характерно интенсивное снижение его влажности в начале процесса, особенно в первые минуты продувки слоя. Так, скорость сушки за первую минуту продувки составила для подогретого до 61°C зерна $1,9\%/мин$, а для неподогретого - $0,5\%/мин$, т.е. скорость обезвоживания с применением подогрева увеличилась в 3,8 раза. За 2 минуты процесса это увеличение составило уже 2,6 раза; а за 5 мин - 2,1 раза. Таким образом, интенсивность влагоотдачи по мере высушивания зерна снижается и в конце процесса сушки, по достижению зерном влажности $16,0\%$, скорость сушки подогретого зерна практически не отличается от скорости сушки неподогретого зерна.

Это можно объяснить тем, что с увеличением температуры нагрева зерна, по-видимому, расширяются микropоры и капилляры, снижается вязкость перемещаемой жидкости. Вследствие возрастания влагопроницаемости зерновки и особенно ее плотной оболочки, улучшаются условия переноса влаги от внутренних слоев к поверхности и испарение ее в межзерновое пространство. При продувке предварительно нагретого зерна агентом сушки водяной пар из межзернового пространства, а также поверхностная влага, вследствие отсутствия прочных связей с материалом, интенсивно удаляется, что и приводит к возрастанию скорости сушки в начальный период. После испарения поверхностной влаги интенсивность влагоотдачи лимитируется сопротивлением внутреннему влагопереносу, зависящему от свойств материала, что приводит к снижению скорости сушки.

На рис.3 показаны экспериментально полученные изменения температуры зерна в процессе сушки с предварительным подогревом в зависимости от начальной влажности зерна. В первый период интенсивной влагоотдачи наблюдается некоторое снижение температуры зер-

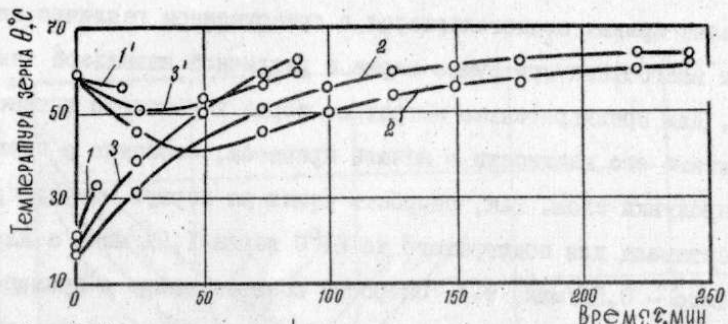


Рис.3. Влияние начальной температуры на кинетику нагрева зерна
1 - $W_n^c = 25,0\%$; 2 - $W_n^c = 37,9\%$; 3 - $W_n^c = 57,2\%$.

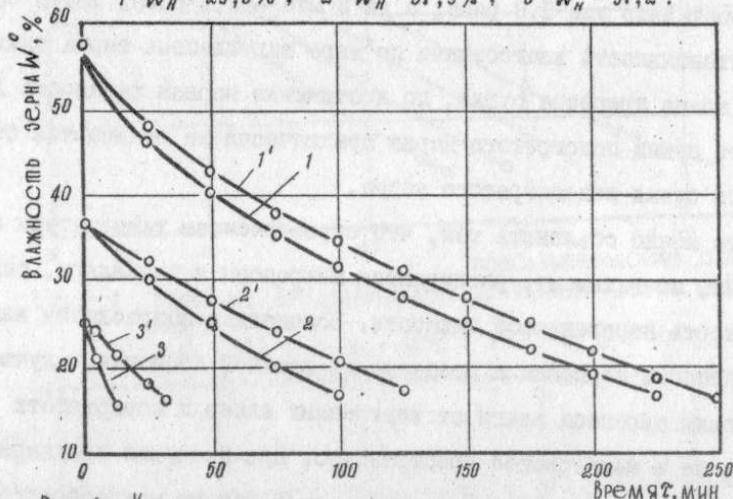


Рис.4. Кривые сушки зерна кукурузы подогретого (1, 2 и 3) и не подогретого зерна (1', 2' и 3')

1, 2, 3 - $\theta_n = 60^\circ\text{C}$; 1', 2', 3' - 20°C .

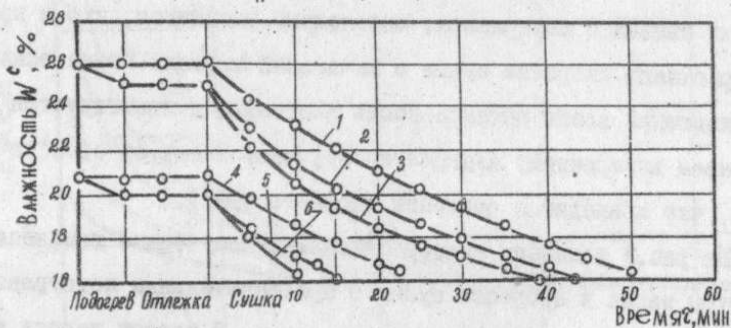


Рис.5. Кривые сушки кондуктивно и конвективно нагретого зерна кукурузы.

1, 4 - $\theta_n = 20^\circ\text{C}$; 2, 5 - $\theta_n = 60^\circ\text{C}$ (конд. подогрев); 3, 6 - $\theta_n = 60^\circ\text{C}$ (конв. подогрев).

а. Причем большим значениям начальной влажности зерна соответствует и большее снижение температуры. Так, при $W_n^c = 25\%$ (кривая 1) температура зерна снижается на 8°C , а при $W_n^c = 57,2\%$ (кривая 2) - на 17°C . Это можно объяснить интенсивным испарением поверхностной влаги в начальный момент сушки и расходом на эти цели аккумулированного зерном тепла. При углублении зоны испарения температура зерна постепенно повышается (кривая 3). При сушке неподогретого зерна снижение его влажности сопровождается постоянным возрастанием температуры.

Таким образом, теоретически предполагаемая более интенсивная влагоотдача с повышением начальной температуры материала экспериментально подтверждена и при сушке зерна кукурузы. Для оценки эффективности применения подогрева перед сушкой была проведена серия сравнительных опытов при сушке зерна кукурузы неподогретого зерна и подогретого ($\theta_n = 60^\circ\text{C}$) при начальной влажности 25,0; 37,9 и 57,2% (на сухую массу).

Эффективность влияния температуры подогрева оценивали по величине K , показывающей кратность повышения скорости сушки подогретого зерна по сравнению с неподогретым. Результаты опытов с подогревом (кривые 1-3) и без подогрева (кривые 1'-3') представлены в виде графиков на рис.4. Как видно из графиков, с увеличением начальной влажности зерна эффективность применения предварительного подогрева снижается. Это связано с тем, что с увеличением влажности уменьшается коэффициент диффузии влаги, а также с тем, что период интенсивного влагоотсева по сравнению с продолжительностью сушки увеличивается меньше, т.е. уменьшается доля "выигранного" времени по отношению к общей продолжительности сушки.

Таким образом, применение предварительного подогрева зерна кукурузы перед его сушкой позволяет сократить экспозицию сушки

на 7+68% в зависимости от начальной влажности зерна.

В соответствии с методикой исследования была проведена сравнительная оценка кондуктивного и конвективного способов подогрева при сушке зерна кукурузы.

Для определения характера изменения влажности и температуры зерна кукурузы были проведены сравнительные опыты по сушке зерна кондуктивно и конвективно нагретого до одинаковой температуры ($\theta_n = 60^\circ\text{C}$). Результаты опытов для обоих вариантов подогрева при сушке в одинаковых условиях представлены на рис.5. Кривые 2, 5 соответствуют сушке с кондуктивным нагревом, кривые 3, 6 - с конвективным, а кривые, 1, 4 - без подогрева.

Анализ кривых сушки позволяет сделать вывод, что интенсивность влагоотдачи зерна, нагретого без испарения влаги (кондуктивно), несколько выше в начале процесса, чем для зерна, нагретого в кипящем слое (конвективно). Так, скорость сушки зерна с $W_n^c = 26,0\%$ на первой минуте при кондуктивном нагреве составила 2,6%/мин, а при конвективном нагреве - 1,90%/мин. На второй минуте - соответственно эти скорости сушки примерно выравниваются и составляют около 0,40%/мин. В дальнейшем характер изменения влажности при сушке в обоих случаях одинаков.

Характер изменения температуры зерна кукурузы в процессе его сравнительной сушки при рассматриваемых способах предварительного конвективного и кондуктивного нагрева также примерно одинаков.

Таким образом, для промышленного использования при сушке зерна кукурузы комбинированным можно рекомендовать кратковременный конвективный нагрев зерна с последующей его отлежкой в течение 5-10 минут, так как при этом методе достигается высокая скорость сушки и равномерность нагрева и упрощается конструкция нагревательного устройства.

В связи с тем, что на хлебоприемные предприятия поступает кукуру-

за обычно с влажностью 30-40%, а в существующих типах зерносушилок при экономически выгодных режимах влагосъем за один пропуск не превышает 6+8%, поэтому интенсификация и обеспечение поточности процесса сушки с применением только предварительного подогрева невозможна.

Решение этой задачи может быть достигнуто путем применения комбинированных методов сушки, сочетающих в себе преимущества предварительного подогрева и рециркуляционной сушки. Преимущество комбинированных методов состоит в том, что рециркуляция снижает влажность зерна до такой величины (18-23%), при которой существенное влияние оказывает предварительный подогрев. При рециркуляции смесь свежего и частично просушенного зерна многократно проходит циклы подогрев-отлежка. Во время кратковременного подогрева в падающем разрыхленном слое происходит интенсивный съем влаги, а при отлежке - перераспределение тепла между отдельными зерновками и перемещение влаги от их центра к поверхности. После отлежки часть зерна смешивается со свежим и направляется на рециркуляцию, а другая - проходит окончательную досушку в плотном слое сушильной установки.

Интенсивный влагосъем после подогрева и отлежки сопровождается некоторым снижением температуры зерна, что обеспечивает сохранение качества и высокую интенсивность процессов теплообмена при многократном повторении циклов. Интенсификации процесса теплообмена способствует еще термоградиентный перенос при снижении температуры зерна в начальный период сушки.

Комбинированный способ сушки отличается от рециркуляционного отсутствием промежуточного охлаждения зерна, что позволяет вести процесс при максимально возможном значении коэффициента диффузии влаги α_m . Влагосъем за один цикл при этом увеличивается и приводит к уменьшению кратности рециркуляции, что способствует сохранению качества зерна кукурузы, склонному к механическим повреждениям. Раз-

личие состоит еще в том, что рециркуляция осуществляется не при влажности смеси 14,5-16%, как это принято в других способах сушки, а при 18-24%. Это также снижает количество циклов, способствует более равномерному распределению влаги в смеси и сохраняет качество зерна, так как при влажности 18-24% значительно повышаются упруго-эластичные свойства зерна.

Кинетика сушки и нагрева смеси зерна при комбинированном способе зависит от большого количества факторов, степень влияния которых различна. Для установления кинетических закономерностей процесса сушки смеси свежего и рециркулирующего зерна кукурузы была поставлена следующая серия опытов. Из свежего зерна с $W_n^c = 44,6; 32,7$ и $26,4\%$ и рециркулирующего (частично просушенного) зерна с $W_p^c = 19,0\%$ при различном их соотношении составляли смесь с $W_{см}^c = 20,0$ и $24,5\%$, которую после подогрева до 60° и отлежки сушили в плотном слое. Результаты этих опытов показали, что качественные и количественные закономерности сушки смеси свежего и рециркулирующего зерна комбинированным методом примерно соответствуют закономерностям при сушке свежего зерна с предварительным подогревом, что позволяет применить аналогичные режимы сушки для обоих методов.

При выборе режимов сушки зерна необходимо учитывать его целевое назначение. Так кукуруза, используемая в крахмало-паточной промышленности, после сушки должна иметь всхожесть не менее 55%. При сушке такой кукурузы, по данным ряда авторов, нагрев зерна не должен превышать 55°C . Для кукурузы, идущей на переработку либо на кормовые цели, ограничения по всхожести отсутствуют, а температура нагрева зерна при сушке может быть доведена до $60-65^\circ\text{C}$.

В соответствии с методикой исследования нами были проведены две серии опытов по уточнению границ предельно допустимого нагрева зерна кукурузы при сушке с предварительным подогревом и рециркуля-

цией.

Первая серия опытов была проведена при сушке зерна в кипящем слое с чередованием сушки и отлежки (имитация сушки и нагрева в цикле рециркуляции), при начальном влагосодержании зерна 24,4; 37,6 и 57,2%. Скорость агента сушки - 5 м/с, длительность в цикле сушки 15 с, длительность отлежки 5 минут, количество циклов 4, 7 и 10.

Результаты опытов показали, что снижение всхожести зерна практически не зависит от количества циклов, а определяются только влагосодержанием и температурой нагрева зерна. При влагосодержании 24,4; 37,6 и 57,2% температура нагрева зерна, не снижающая всхожесть, равна соответственно 52, 48 и 45°C .

Вторую серию опытов проводили следующим образом. Зерно кукурузы с влажностью 24,4; 37,6 и 57,2% подогревали в кипящем слое до 45, 50, 55 и 60°C и после отлежки 5-10 минут сушили в плотном слое до $W_n^c = 16\%$. Температуру агента сушки подбирали таким образом, чтобы нагрев зерна в конце сушки находился в пределах $50-55^\circ\text{C}$. Результаты опытов сведены в таблицу I.

Полученные данные показывают, что при выборе режимов сушки зерна кукурузы для крахмало-паточной промышленности с предварительным подогревом и рециркуляцией нагрев зерна после подогревателя должен быть равен $45-52^\circ\text{C}$, а в конце сушки - $50-55^\circ\text{C}$ при начальном влагосодержании зерна в диапазоне 22,7-36,2% (меньшему нагреву соответствует большее значение влагосодержания).

Учитывая, что в кипящем слое (как и в падающем разрыхленном слое зерна в подогревателе) достигается большая равномерность нагрева зерна, всхожесть зерна кукурузы, как это видно из таблицы I, не снижается по сравнению с исходной. При сушке же в плотном слое нагрев зерна и его сушка протекают неравномерно и всхожесть зерна при нагреве в допустимых пределах снижается до 55-60%.

Таблица I

Зависимость всхожести (β) от влажности (W^c) и нагрева (θ) зерна кукурузы

$W_H^c = 22,7\%$		$W_H^c = 28,1\%$		$W_H^c = 36,2\%$ $W_{cm}^c = 21,1\%$		$W_H^c = 28,1\%$ $W_{cm}^c = 21,1\%$	
Сушка		Сушка		Сушка		Сушка	
θ	β	θ	β	θ	β	θ	β
$^{\circ}C$	%	$^{\circ}C$	%	$^{\circ}C$	%	$^{\circ}C$	%
53	96	55	68	50	95	52	82
55	96	54	76	52	94	57	57
58	95	58	59	54	92	55	64
54	96	53	83	51	96	56	69

Таким образом, при выборе режимов сушки зерна с предварительным подогревом и рециркуляцией предельный нагрев зерна кукурузы в подогревателе должен быть равен 45-52 $^{\circ}C$, а при сушке в плотном слое шахтной сушилки - 50-55 $^{\circ}C$. При этом обеспечивается всхожесть зерна на уровне 55-60%.

Для получения математических моделей влагосъема ΔW^c и нагрева зерна θ_k на стадии предварительного подогрева была проведена серия опытов по ротатбельному центральному композиционному плану. Диапазоны варьирования факторов следующие: $W_H^c = 18-58\%$, $\theta_H = 5-55^{\circ}C$, $t = 158-242^{\circ}C$. Для всех опытов время подогрева $\tau = 15$ с, скорость агента сушки $v = 5$ м/с, что близко к параметрам подогревателей ОТИШ.

$$y_1 = 1,1197 + 0,1911x_1 + 0,0362x_2 + 0,0889x_3 - 0,0568x_1^2 - 0,0003x_2^2 + 0,0015x_3^2 + 0,0038x_1x_2 + 0,0188x_1x_3 + 0,0063x_2x_3; \quad (1)$$

$$y_2 = 53,15 - 2,62x_1 + 11,93x_2 + 6,47x_3 - 0,54x_1^2 + 2,11x_2^2 - 0,34x_3^2 - 0,63x_1x_2 - 0,13x_1x_3 + 1,38x_2x_3; \quad (2)$$

где y_1 - влагосъем, %; y_2 - нагрев зерна, $^{\circ}C$;

x_1, x_2 и x_3 - кодированные переменные соответственно W_H^c, θ_H и t .

Для описания кинетики сушки и нагрева зерна кукурузы в плотном слое проведена серия опытов по D -оптимальному плану типа B_5 . С целью обеспечения инвариантности конечных результатов относительно изменяющихся характеристик зерна в процессе сушки, при составлении плана экспериментов применены относительные единицы. Интервалы варьирования факторов следующие: влажность зерна в начале сушки $W_H^c = 23-57\%$; величина ΔW_o^* , характеризующая положение точки отсчета (начало стадии сушки) $\Delta W_o^* = 0-0,8$; температура зерна в точке отсчета $\theta_o = 45-65^{\circ}C$ (выбрана из условия сушки зерна после предварительного подогрева); температура агента сушки $t = 80-200^{\circ}C$; величина ΔW^* , характеризующая текущую влажность $\Delta W^* = 0,1-1,0$.

Относительные величины ΔW_o^* и ΔW^* определяются по следующим выражениям

$$\Delta W_o^* = (W_H^c - W_o^c) / (W_H^c - 16); \quad \Delta W^* = (W_o^c - W^c) / (W_o^c - 16), \quad (3)$$

где W_o^c и W^c соответственно влажность в начале сушильной зоны (стадии) и текущая влажность, %.

После реализации плана и вычисления коэффициентов получены уравнения регрессии, описывающие кинетику сушки и нагрева зерна в процессе сушки в зависимости от значения текущей влажности:

$$y_1 = 4,6419 + 0,0325x_1 + 2,0187x_2 - 0,2379x_3 - 2,3451x_4 + 1,1846x_5 - 0,3769x_1^2 - 0,1139x_2^2 + 0,1761x_3^2 + 0,3501x_4^2 + 0,3371x_5^2 + 0,2703x_1x_2 + 0,0224x_1x_3 + 0,1083x_1x_4 + 0,0907x_1x_5 + 0,1921x_2x_3 - 0,9487x_2x_4 - 0,3421x_2x_5 + 0,1173x_3x_4 + 0,1120x_3x_5 - 0,0581x_4x_5; \quad (4)$$

$$y_2 = 1,8386 - 0,5248x_1 + 1,6956x_2 - 0,4279x_3 + 1,4571x_4 + 0,6755x_5 + 0,1274x_1^2 - 1,1181x_2^2 - 0,0151x_3^2 - 0,1526x_4^2 - 0,0296x_5^2 - 0,6426x_1x_2 + 0,2224x_1x_3 - 0,9795x_1x_4 - 0,3520x_1x_5 + 0,1269x_2x_3 - 0,0381x_2x_4 - 0,9827x_2x_5 - 0,1665x_3x_4 + 0,0412x_3x_5 - 0,1101x_4x_5 \quad (5)$$

1013501

где $y_1 = 1/N = (\tau_0 - \tau) / (W_0^c - W^c)$, мин/%; $y_2 = (\theta_0 - \theta) / (W_0^c - W^c)$, °C/%; τ_0 - время сушки, соответствующее W_0^c ; x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5 - нормированные значения параметров соответственно $W_n^c, \Delta W_n^*, \theta_0, t$ и ΔW^* .

Статистический анализ полученных уравнений (оценка адекватности моделей, вычисление дисперсий, проверка значимости коэффициентов и пр.) осуществляли по общепринятым методикам, изложенным в литературе по планированию многофакторных экспериментов.

Приведенные уравнения использованы для выбора режимов, обеспечивающих минимальный расход тепла на сушку.

Алгоритм расчета оптимальных режимов сушки основан на методе динамического программирования, позволяющим осуществлять последовательный перебор ограниченного числа вариантов при дискретном изменении параметров процесса и характеристик высушиваемого материала. Для перевода непрерывно изменяющихся параметров времени и влажности в дискретное значение производили разбиение плоскости $W - \tau$ на N стадий, каждая из которых на входе и выходе может принимать определенные значения влажности. На полученной сетке переменных путем перебора всех возможных состояний входа и выхода каждой стадии строится расчетный процесс сушки, определяемый из условия минимума затрат тепла. Результирующая оценка такого многостадийного процесса определяется как аддитивная функция результатов, получаемых на каждой стадии.

Вычисления начинают на первой стадии, характеризующейся лишь одним значением входа (W_n^c, θ_n и $\tau_0 = 0$). На каждой j -й стадии определяют оптимальные кусочно-линейные траектории и соответствующие им управления по рекуррентному соотношению $Q_{0,N}^{opt} = \min [Q_{j,N} + Q_{0,j}^{opt}]$. Таким образом находят оптимальную стратегию управления для всего многостадийного процесса, являющуюся функцией конечного состояния процесса (W_k^c, τ_k). Так как значение

выхода последней стадии, определяемое величиной кондиционной влажности и требуемой производительностью сушильной установки, задано, то затем последовательно определяют оптимальное распределение температуры агента сушки (t_j^{opt}) для каждой стадии процесса сушки, соответствующее минимальным затратам тепла.

Разработанный алгоритм оптимизации режимов сушки был реализован на ЭВМ "Наири-К". Расчеты выполнены применительно к зерносушилке типа ДСП-32-от. В результате определены режимы сушки, обеспечивающие при заданной экспозиции минимальный расход тепла.

Для внедрения оптимальных режимов сушки разработаны рекомендации по переводу зерносушилок ДСП-32-от на комбинированный способ сушки, осуществлена их реконструкция и проведены производственные испытания, подтвердившие полученные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основании выполненных исследований по интенсификации процесса сушки зерна кукурузы при сохранении его качества теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения комбинированного метода сушки - с предварительным подогревом и рециркуляцией.

2. Установлены кинетические закономерности при комбинированном методе сушки зерна кукурузы, особенностью которых является высокая скорость влагоотдачи и снижение температуры зерна в начальном периоде сушки. На конечной стадии процесса скорость теплообмена инвариантна относительно начальных характеристик зерна и метода сушки.

3. Определены периоды времени минимальных значений температуры зерна, позволяющие применять агент сушки с наибольшим потенциалом. Уточнены граничные значения предельно допустимой температуры нагрева зерна кукурузы, применяемой в крахмало-паточной

промышленности.

4. Получены интерполяционные модели кинетики теплообмена на стадиях предварительного подогрева и сушки в плотном слое, на основании которых разработан алгоритм оптимизации процесса сушки, позволяющий определить параметры процесса, обеспечивающие минимальный расход тепла на сушку.

5. Для сушки зерна кукурузы, используемой в крахмало-паточной промышленности, рекомендованы следующие режимы, обеспечивающие минимальные затраты тепла при сохранении всхожести на уровне 55-60%:

- кратковременный конвективный подогрев зерна до 50°C при температуре агента сушки 130-240°C, отлежка в течение 5-10 минут и сушка в плотном слое при температуре агента сушки в первой и второй зоне соответственно 120-150 и 70-110°C в зависимости от исходной влажности (19-36%).

6. При сушке зерна кукурузы, идущей на переработку и для комбикормовых целей, рекомендованы режимы:

- кратковременный конвективный подогрев зерна до 65°C при температуре агента сушки 140-250°C, отлежка в течение 5-10 минут и сушка в плотном слое при температуре агента сушки в первой и второй зоне соответственно 150-180 и 90-130°C в зависимости от исходной влажности зерна (19-36%).

7. Производственная проверка результатов работы на реконструированных зерносушилках ДСП-32-от подтвердила полученные выводы об эффективности применения комбинированного метода и оптимальных режимов сушки зерна кукурузы. Производительность сушилки после реконструкции и сушки по рекомендованным режимам увеличилась на 32,1% при одновременном снижении удельных затрат топлива и электроэнергии и сохранении качества просушенного зерна. Экономическая эффективность от внедрения рекомендованных режимов сушки

составила 5,2 тыс.руб. на одну сушилку (при 1230 часовом периоде работы). Срок окупаемости дополнительных капитальных затрат около 2-х лет.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Остапчук Н.В., Алейников В.И., Станкевич Г.Н. Сушка продовольственно-фуражной кукурузы с предварительным подогревом.- Кукуруза, 1972, № II, с.31-32.

2. Сушка зерна в шахтных сушилках с его рециркуляцией в отдельном аппарате / В.И. Жидко, В.И. Алейников, А.Н. Смоляр, Г.Н. Станкевич.- В кн.: Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна: Тез.докл. II Всес.сов. М., 1973, с.120-121.

3. Математическая модель для определения времени контакта фаз дисперсных потоков в аппаратах с насадками / А.М. Пизик, Г.Н. Гросул, Н.В. Остапчук, Г.Н. Станкевич.- Тез.докл. III Всес. конф. Механика сыпучих материалов. Одесса, 1975, с.290.

4. Алейников В.И., Спиридонова М.Г., Станкевич Г.Н. Сушка зерна и семян подсолнечника с предварительным подогревом и рециркуляцией.- В кн.: Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники: Тез.докл. Всес. конф. в Калинин, М., 1977, с.21-31.

5. Станкевич Г.Н. Установка и режим для комбинированной сушки продовольственно-фуражной кукурузы.- В кн.: Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок, вып.2: Тез. докл. респ. сов. в Смяферополе, Киев: УкрНИИТИ, 1978, с.17-18.

6. Руководство по переводу зерносушилок на комбинированный способ сушки.- Одесса, ОТИШ, 1976, с.35.

7. Алейников В.И., Спиридонова М.Г., Станкевич Г.Н. Технология комбинированного способа сушки зерна и модернизация шахтных сушилок.- Проспект на ВДНХ СССР, Одесса, ОТИШ, 1979, с.10.

8. Алейников В., Спиридонова М., Станкевич Г. Комбинированный способ сушки зерна.- Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность, 1979, № II, с.12-13.