

Автор ер.

Ж 69

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Кандидат технических наук

ЖИДКО В.И.

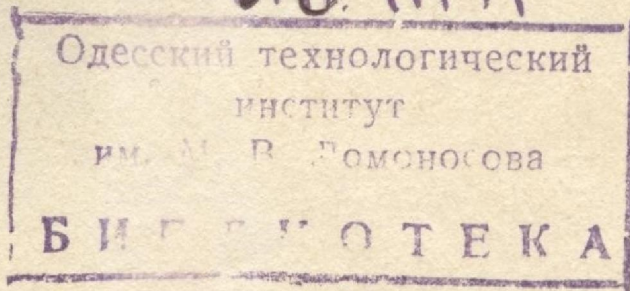
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА  
В СВЯЗИ С ЕГО АВТОМАТИЗАЦИЕЙ

Специальность 05375 - хранение зерна  
(элеваторно - складское хозяйство)

Автореферат

диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук

V. B. 11771



Одесса - 1970

Перечет 19 82 г.

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

Научный консультант – доктор технических наук  
профессор П.Н. ПЛАТОНОВ.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук  
профессор А.С. ГИНЗБУРГ.

Заслуженный деятель науки РСФСР, доктор сельскохозяйственных наук профессор Л.Н. ЛЮБАРСКИЙ.

Доктор технических наук И.Т. ЭЛЬПЕРИН.

Кандидат технических наук А.Ф. ТРУНОВ.

Ведущее предприятие – Всесоюзный научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ) Министерства заготовок СССР.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1970 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1970 г.

на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

Л.А. ЗАПОРОЖЕЦ

## В в е д е н и е

Коммунистическая партия и Советское правительство поставили задачу дальнейшей интенсификации, комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в заготовительной системе и пищевой промышленности. В октябре 1968 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление, в котором указывается на необходимость создания и освоения высокоэффективных технологических процессов, обеспечивающих улучшение качества продукции, повышение производительности, снижение трудовых затрат и улучшение условий труда. Решение этой проблемы должно базироваться на применении автоматизированных систем управления технологическими процессами, основанных на использовании математических методов, электронно-вычислительных и управляющих машин.

В области зерносушильного хозяйства это постановление приобретает большое значение в связи с тем, что производство зерна в стране из года в год увеличивается и за ближайшее пятилетие значительно возрастет.

Интенсивный рост заготовок зерна требует соответствующего прироста сушильных мощностей. Решение этой сложной задачи будет развиваться в двух направлениях: путем строительства новых сушильных агрегатов и реконструкции существующих сушилок с применением на них более совершенных режимов и автоматизации процесса. Последнее направление более предпочтительно, так как требует минимальных капиталь-

ных затрат на тонну прироста сушильной мощности при одновременном увеличении производительности труда и снижении издержек производства. Кроме этого, автоматизация процесса позволит проводить сушку без снижения качественных показателей продукта, что особенно важно для зерна как термолabileного материала.

Данная работа посвящена исследованию процесса сушки зерна с целью разработки рациональных режимов, получения математической модели и оптимизации процесса для осуществления автоматического регулирования работы сушилки.

Возможность реализации данной проблемы показана на примере полной автоматизации сушилок шахтного типа, которые занимают доминирующее положение в сушильном парке страны и отличаются сравнительно небольшими габаритами, простотой конструкции и высоким коэффициентом использования тепла. Кроме того, они являются универсальными с точки зрения возможности сушки самых различных зерновых, масличных и бобовых культур как семенного, так и продовольственного назначения.

Исследования, начатые в 1958 году, завершились в 1967 году сдачей межведомственной комиссии в длительную опытно-промышленную эксплуатацию шахтной зерносушилки ДСП-24 в гор. Бийске, оснащенной системой автоматического регулирования процесса сушки зерна с управляющей вычислительной машиной (УВМ).

В связи с перспективностью сушки зерна в кипящем слое нами также проведено исследование этого процесса с целью получения его математической модели.

Исследования проведены в лабораториях Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова и на промышленных объектах.

Диссертация включает семь глав, излагающих состояние вопроса и теоретические предпосылки, описание эксперимен-

тальных установок, методику исследования, обобщение экспериментальных данных, производственную проверку полученных рекомендаций.

Основное содержание диссертации приведено в автореферате в той же последовательности, что и в реферируемой работе.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### Шахтная зерносушилка как объект управления

Процесс сушки зерна как коллоидного капиллярно-пористого материала в общем виде характеризуется уравнениями тепло- и массообмена, полученными А.В. Лыковым. Точное аналитическое решение этой системы в настоящее время не представляется возможным даже для тел правильной формы и однородного строения.

С целью упрощения задачи, на основании анализа процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке, зависимости, характеризующие кинетику сушки и нагрева материала по длине аппарата ( $\frac{\partial w}{\partial h}$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ ), можно записать в общем виде:

$$F_1 \left( \frac{\partial w}{\partial h}, \theta, v_z, t, w_1, \theta_1, \tau \right) = 0,$$

$$F_2 \left( \frac{\partial \theta}{\partial h}, w, v_z, t, w_1, \theta_1, \tau \right) = 0. \quad (1-1)$$

Система уравнений (1-1) составлена для случая сушки определенной культуры заданного качества и назначения при неизменных конструктивных параметрах сушилки (толщины слоя, скорости агента сушки в слое, характера движения зерна, распределения агента сушки и др.) без учета ряда переменных, принятых постоянными или незначительно влияющих на характер протекания процесса (параметров наружного воздуха, относительной влажности агента сушки и др.).

Управление технологическим режимом сушки согласно зависимости (1-1) возможно обеспечить двумя управляющими па-

раметрами - температурой агента сушки  $t$  и скоростью движения зерна  $v_g$ . При этом, наряду с обеспечением основного задания на сушение продукта, необходимо выполнить экстремум показателя эффективности.

В качестве критерия оптимальности нами принята себестоимость сушки условной единицы продукта - одной плановой тонны  $M$ . Этот критерий служит показателем экономической эффективности всего процесса в целом, так как включает в себя стоимость топлива  $M_T$  и электроэнергии  $M_E$ , амортизационные отчисления  $M_A$ , заработную плату обслуживающего персонала  $M_Z$ .

Аналитически себестоимость сушки можно представить в следующем виде:

$$M = M_T + M_E + M_A + M_Z. \quad (2-1)$$

Выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки получило всеобщее признание и успешно применено в работах С.М. Смирнова, В.В. Клейносова, А.Н. Фишмана, А.А. Гуревича, Фан Дянь-Цэня и Вань Чу-Сеня и др.

Учитывая сложный характер кинетики сушки (изменение влажности и нагрева зерна по длине сушилки), условно разбиваем процесс на  $n$  элементарных ступеней (рис.1). В этом случае представляется возможность упростить анализ процесса путем усреднения основных параметров в каждом элементарном слое и разработать рекомендации по их оптимизации и выбору основного управляющего фактора. Такая постановка задачи позволяет использовать зависимость (2-1) для любой элементарной ступени. Причем оптимизация параметров должна отвечать условиям минимальной себестоимости сушки  $M_{min}$ , которая обеспечивается максимальным значением скорости сушки  $(\partial w / \partial t)_i$  и минимальными расходами тепла и агента сушки.

Интенсивность обезвоживания для материалов со значительным внутренним сопротивлением диффузии влаги, согласно работам А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, В.П. Дубровского, Л.М.

Никитиной, М.А. Кучмель, В.В. Красникова, Г.А. Максимова, В.А. Загоруйко, С. Джонса, И. Баббита и др., определяется в основном температурой нагрева материала (величина коэффициента диффузии влаги  $\alpha_m$  резко возрастает с повышением температуры материала). Скорость испарения влаги с поверхности зерна пропорциональна давлению насыщенного пара  $P'_{нас}$  при температуре поверхности испарения, т.е. тоже зависит от температуры нагрева зерна. Минимальные расходы тепла и агента сушки связаны с рациональным распределением этих параметров по ходу процесса, обеспечивающим полное использование тепла и максимальное насыщение отработанного агента сушки.

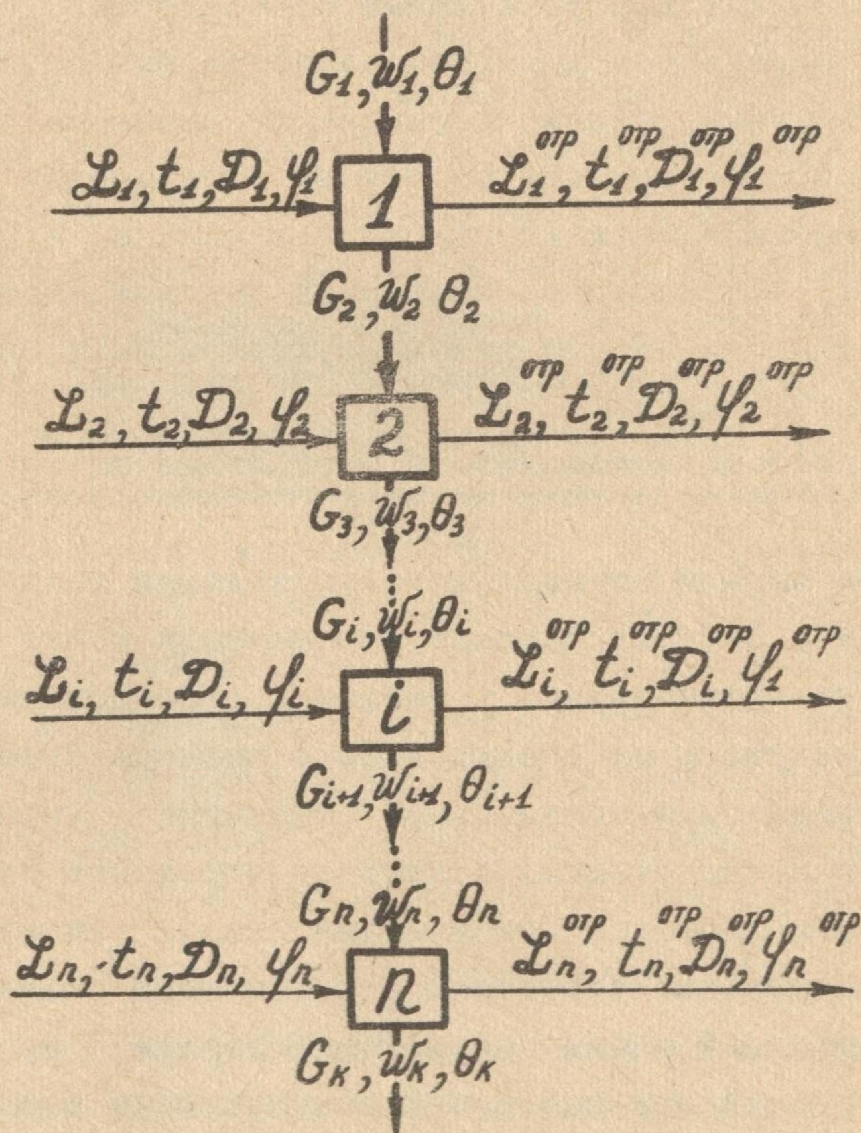


Рис.1. Ступенчатая схема работы шахтной зерносушилки.

Таким образом, в общем виде для каждой элементарной ступени оптимальный режим должен удовлетворять условиям:

$$t_i = t_{max}; \theta_i = \theta_{max}; t_i^{отр} = \theta_i; \psi_i^{отр} = \psi_{max}. \quad (3-1)$$

Следует отметить, что в начале процесса (пока значение  $\theta$  не достигло своего максимального значения) определяющим является величина  $t_{max}$ , затем, по мере прогрева зерна, вступает в силу ограничение по  $\theta_{max}$ . В этом случае основным управляющим параметром является температура агента сушки  $t$ , которая при учете ряда переменных однозначно определяет нагрев материала. Скорость движения зерна  $\psi$  может служить лишь вспомогательным параметром, так как она в силу конструктивных особенностей сушилки должна быть одинаковой для всех элементарных ступеней.

Рассмотренные условия оптимизации процесса в шахтных сушилках позволяют принять за основу зависимость (1-1) при разработке математического описания процесса, а уравнения (2-1) и (3-1) - в качестве критериев при разработке рациональных режимов и объема реконструкции в ходе подготовки сушилки к автоматизации.

#### Выбор системы оптимального управления шахтной зерносушилкой

Решение задачи оптимального управления зерносушилкой как объектом с распределенными параметрами может быть сведено к задаче оптимального управления сосредоточенных объектов с последующим их соединением в пространстве.

При определении оптимальной стратегии управляющего устройства с целью отыскания методов упрощения общего решения в работе проведен графический анализ экстремали в фазовом пространстве состояний управляемого объекта. Движение изображающей точки рассмотрено серией пространственных построений при различной совокупности координат:

$$w, \theta, t; \theta, t, h; w, t, h; w, \theta, h.$$

Рассмотренные графики позволили сделать важный вывод. Даже при наличии только изменений входных параметров зерна  $w_1$  и  $\theta_1$ , в пространстве  $w, \theta, t, h$  появляется пучок экстремалей, где каждая экстремаль имеет свое минимальное время перехода в область  $w_k, \theta_k$  в соответствии с положением начальной изображающей точки. Поэтому любая совокупность  $w_1, \theta_1$  требует дифференциации управления  $t$  (при постоянстве задания  $w_k, \theta_k$ ), которое не может быть распространено на ближайшие точки с разными начальными параметрами вследствие невозможности движения зерна с различной скоростью по высоте  $H$  или трансформации протяженности шахты  $H$ .

Анализ возможных систем оптимального управления показал, что для шахтных сушилок наиболее рациональным способом управления является управление через модель объекта. Основанный на таком способе метод прогнозирования предполагает выбор экстремали в фазовом пространстве с помощью вычислителя на основании данных о входных параметрах, свойствах объекта управления и задания на качество продукта переработки. При этом необходимые значения управляющих параметров рассчитываются немедленно в начале работы системы и установившийся динамический процесс в объекте возникает спустя время одной экспозиции сушки  $\tau'$ , минимально возможного при данной технологической схеме переработки.

Сложность реализации управляющего устройства в целом зависит от количества  $\Delta$  - ступеней (горячих зон шахты), определяемых кинетикой сушки зерна, степенью грубости объекта, дающей возможность квантования величин входных параметров, а также заданием на точность управления.

#### Задачи исследования

Рассмотренные возможности построения оптимального режима, а также пути выбора системы автоматического регулирования процесса сушки зерна в шахтной зерносушилке ставят

ряд технологических и теплофизических задач, решение которых необходимо для осуществления поставленной проблемы.

В связи с этим в задачи настоящего исследования входит:

1. Выбор рационального режима сушки зерна с точки зрения его максимальной эффективности.
2. Определение границ предельно допустимых температур нагрева зерна пшеницы продовольственного назначения при сушке в зависимости от качественного состояния исходного зерна, его влажности и длительности процесса.
3. Определение границ максимально допустимых температур агента сушки для зерна различной исходной влажности и степени зрелости.
4. Установление оптимального распределения тепла и агента сушки по ходу процесса и выбор рационального количества ступеней сушильной камеры.
5. Разработка математической модели процесса сушки зерна и алгоритма расчета оптимального режима с целью создания системы автоматического регулирования работы сушилки с использованием модели объекта.
6. Исследование шахтных зерносушилок с целью устранения ряда их конструктивных недостатков и подготовки объекта к автоматизации (оснащение датчиками, выбор структурной схемы автоматизации и др.).
7. Производственная проверка эффективности разработанных режимов, адекватности математической модели и производственного объекта при работе шахтной сушилки в системе автоматического регулирования с использованием математической модели объекта.
8. Определение экономической эффективности внедрения разработанной системы на производственной сушилке.

## П. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕЖИМОВ В ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКЕ

В настоящее время в промышленности применяют одноступенчатые и ступенчатые восходящие режимы, предложенные еще в 1942 году М.А. Скороваровым.

С точки зрения эффективности тепло- и массообмена данные режимы не соответствуют поставленным условиям (уравнения 2-1, 3-1). В первую зону, которая занимает примерно половину всей высоты сушильной камеры (и даже несколько больше), при двухступенчатом режиме подается агент сушки при самой низкой температуре. Зерно медленно прогревается. Процесс сушки идет при минимальных значениях коэффициента  $a_m$  и величины  $R'_{нас}$ . Во вторую зону, в которой значительно уменьшается интенсивность удаления влаги, агент сушки поступает при более высокой температуре. Вследствие этого зерно продолжает интенсивно нагреваться и температура его достигает своего максимального значения только в конце процесса сушки. Из-за значительного уменьшения скорости сушки, по сравнению с первой зоной, тепло агента сушки полностью не используется. Не используется агент сушки также и как влагоноситель ввиду неполного его насыщения на выходе из слоя.

Исходя из приведенных данных, наиболее производительным и экономичным режимом на шахтных зерносушилках можно считать такой, в котором правильно используются законы внутренней диффузии влаги и внешнего тепло- и массообмена. Этим условиям отвечает режим с организацией зоны, в которой происходит предварительный нагрев зерна до максимально допустимой температуры, а затем последующая сушка в области максимальных температур его нагрева в соответствии с изменением влажности материала по ходу процесса. В зоне сушки подвод тепла и агента сушки необходимо дифференцировать в соответствии с изменением интенсивности сушки. Иными словами, должен быть обеспечен нисходящий режим сушки, т. к.

по мере замедления интенсивности испарения влаги и нагрева зерна подвод тепла должен уменьшаться. При таком построении режима в процессе сушки будет иметь место максимальное значение коэффициента  $\alpha_m$  и отсутствовать или мало ощущаться термовлагопроводность, а зона испарения будет приближена непосредственно к поверхности зерновки.

На целесообразность применения таких режимов указывали в свое время М.Ю. Лурье (1940 г.), Л.Н. Любарский (1948г) и в последующем А.С. Гинзбург, А.П. Гержой, М.А.Скороваров.

В 1950-1953 гг. нами проведены предварительные лабораторные исследования по выявлению эффективности сушки зерна с предварительным прогревом материала в верхней части сушилки. Исследование позволило установить, что производительность сушилки увеличилась по сравнению с обычными режимами на 50+80 % при одновременном снижении удельных затрат тепла и электроэнергии на 20+25 % и полном сохранении качественных показателей просушенного зерна. В дальнейшем эффективность и экономичность нисходящих режимов были подтверждены в исследованиях М.А. Скороварова, Б.В. Даммана и Л.В. Кима.

Приведенные выше данные говорят о том, что нисходящие режимы являются наиболее эффективными и экономичными и могут быть оптимальными в случае правильного выбора числа ступеней, рационального распределения тепла и агента сушки по ходу процесса, т.е. при выполнении условий, обеспечивающих минимальное значение выбранного критерия оптимальности (уравнение 2-1).

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА ЗЕРНА И АГЕНТА СУШКИ

Исследованию биохимических изменений, происходящих в зерне при сушке, и выбору максимальных температур нагрева зерна посвящены работы В.Л. Кретовича, Н.П. Козьминой, Л.Н. Любарского, А.Б. Вакара, А.С. Гинзбурга, Н.И. Соседова,

И.И. Ленарского, С.Д. Птицына, А.П. Гержоя, В.А. Резчикова, А.М. Уварова, Г.А. Джорогына, Т.Г. Флоренской, Н.И. Андреевой, В.А. Швецовою, Е.Н. Рязанцевой, О.Н. Катковой, З.В. Дроздовой, Л.В. Кима, В.А. Ревякиной, Е.Г. Онищенко, И. Линдберга, М.Рорлиха, Ж.Бржкнера и др. В результате было установлено, что такие важнейшие изменения свойств зерна, как изменение энергии прорастания и всхожести, изменения физических свойств клейковины и активности ферментов, находятся в определенной зависимости от степени денатурации белков зародыша и эндосперма. Степень денатурации белков является сложной функцией температуры нагрева зерна, его влажности, времени действия температуры и зависит от природы белка.

#### Границы предельно допустимых температур нагрева зерна в плотном слое

На основании исследований И.И. Ленарским предложена граница „условно безопасных“ температур нагрева зерна, лежащая в области начала денатурации спирторастворимых белков эндосперма при длительности нагрева, равной одному часу. Эта граница получена И.И. Ленарским в условиях, несколько отличных от имеющих место в производственных сушилках. В исследованиях И.И. Ленарского зерно находилось в закрытых сосудах, помещенных в термостат, в котором поддерживалась определенное время постоянная температура заданной величины. Влажность зерна в процессе опыта также оставалась неизменной. В процессе сушки зерна в шахтных зерносушилках температура и влажность зерна на протяжении всего процесса изменяется (температура постепенно увеличивается, а влажность уменьшается); движение воздуха в межзерновом пространстве, испарение влаги с поверхности зерна, неравномерность распределения влаги и температуры по сечению отдельных зерен определяют особый температурный режим нагрева

зерна. Наконец, необходимо отметить тот факт, что зерно в зоне интенсивной продувки (под подводными коробами) находится незначительным промежутком времени — около 10 % от общей экспозиции сушки. Остальное время оно движется в зонах продувки агентом сушки при температуре, близкой к нагреву зерна. Здесь между зёрнами происходит перераспределение влаги и тепла, снижение температуры зерна за счет самоиспарения и т.д.

В связи с этим в настоящем исследовании поставлена задача уточнения полученной И.И. Ленарским границы „условно безопасных“ температур нагрева зерна продовольственной пшеницы. Исследование было проведено на экспериментальной установке, на которой условия опыта были максимально приближены к условиям сушки зерна в производственной зерносушилке шахтного типа. В процессе сушки зерна определяли: степень денатурации белка глина, качество теста на альвеографе, количество и качество клейковины, качество хлеба. Количество спирторастворимых белков определяли по методике И.И. Ленарского с использованием полумикрометода Кьельдаля.

В качестве материала для исследования была взята сортовая пшеница Од-3. Для получения необходимой влажности, требуемой условиями исследования, зерно искусственно увлажняли с последующей трехсуточной отлежкой. Исследование состояло из четырех серий опытов. Каждая серия предполагала проведение сушки зерна определенной начальной влажности (1-я — 22; 2-я — 27; 3-я — 32 и 4-я — 37 %) при различных режимах.

Полученные в результате исследований данные, характеризующие изменения растворимости белка глина, дают возможность установить границу начала его денатурации (кривая АС, рис. 2а). Как следует из графика, кривая начала денатурации глина (кривая АС) не совпадает с кривой

1-1 (по И.И.Ленарскому). Такое несоответствие объясняется различием в условиях проведения опытов, на которые указывалось ранее.

Сопоставляя результаты анализов по качеству клейковины, качеству хлеба и степени денатурации глиаина, можно сделать вывод, что изменение качественных показателей верна в процессе сушки протекает в две стадии (рис.2б).

1-я стадия - начало укрепления клейковины при отсутствии денатурации глиаина (область между кривыми АВ и АС). В этом случае хлебопекарные качества сохраняются.

2-я стадия - дальнейшее укрепление клейковины, сопровождающееся денатурацией глиаина и ухудшением хлебопекарных качеств муки, полученной из просушенного зерна (область выше кривой АС).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что, по-видимому, тепловой денатурации глиаина предшествуют изменения в белковой молекуле, вызывающие укрепление клейковины. При этом глиаин сохраняет свою растворимость.

Таким образом, область, лежащая между кривыми АВ и АС, является „зоной укрепления клейковины“, а верхняя граница этой зоны (кривая АС) одновременно служит границей начала денатурации глиаина. Этим самым подтверждены высказывания других исследователей (В.Резчикова, О.Катковой и Б.Ревакиной; Н.И.Соседова, А.П.Гержоя, З.Б. Дроздовой и Ю.П.Доманской; И.А.Клеева, Н.И.Андреевой и Н.А.Палюлиной; И.Линдберга и др.) о возможности укрепления клейковины без изменения растворимости белков эндосперма.

Специально поставленные эксперименты показали, что при сушке пшеницы с крепкой исходной клейковиной граница начала денатурации глиаина и „зона укрепления клейковины“ смещаются в область более низких температур (рис.2в, соответственно кривая АВ и заштрихованная область). Таким образом, кривая АС является границей максимально допусти-

ных температур при сушке пшеницы с нормальной клейковиной, а кривая АВ - при сушке пшеницы с крепкой исходной клейковиной.

В данном исследовании не удалось получить закономерностей изменения биохимических и технологических свойств зерна в зависимости от времени сушки. В связи с этим для установления указанной закономерности было проведено специальное исследование, позволившее получить изменения качества клейковины в широком диапазоне температур, влажности зерна и времени нагрева.

Исследование проведено на экспериментальной установке для сушки зерна в неподвижном слое. Замеры температуры, влажности зерна и определение количества и качества клейковины проводили в четырех элементарных слоях.

В экспериментах были приняты следующие значения основных параметров. Толщина слоя зерна - 200 мм, скорость движения агента сушки в слое зерна - 0,35 м/сек, охлаждающего воздуха - 0,7 м/сек, начальная влажность зерна - 20, 25, 30, 35, 40 и 50 %. Для каждой исходной влажности зерна применяли температуру агента сушки на уровне - 100, 120, 140, 160, 180 и 200°С. Границу предельных температур нагрева зерна устанавливали в зависимости от  $w$  и  $\zeta$  в области начала уменьшения выхода клейковины.

Обработка экспериментальных данных показывает, что полученная ранее граница предельно допустимых температур (рис. 2, кривая АС) действительна при времени сушки порядка 21-30 минут. При времени нагрева от 2 до 20 минут эта граница незначительно смещается в зону более высоких температур (на 1-3°С). При длительности нагрева более 30 минут располагается на 3-10°С ниже.

Полученные границы предельно допустимых температур нагрева зерна в результате проверки в производственных условиях при сушке продовольственной пшеницы на реконструиро-

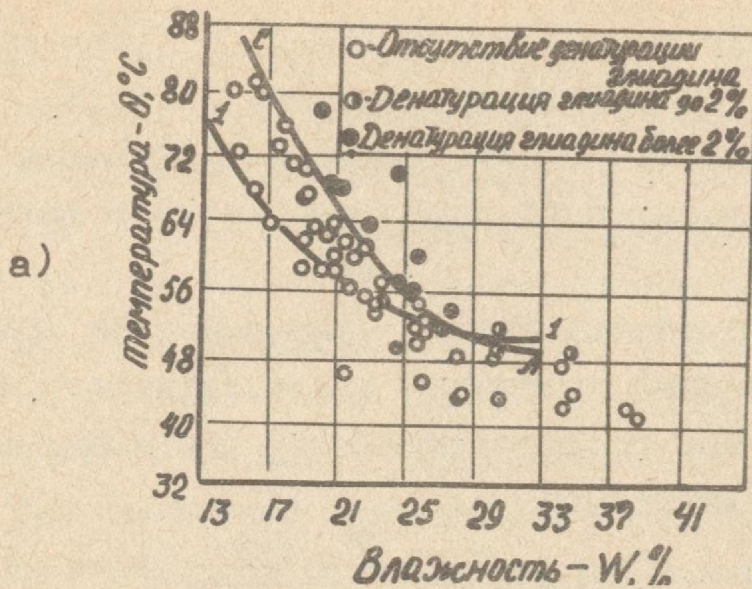


Рис. 2. Границы начала денатурации глиадина и зоны "укрепления клейковины" для нормальной (а, б) и крепкой (в) клейковины.

В. Д. 11771

ванной по нашему методу зерносушилке ДСП-24 в г.Бийске в течение 1963-1965 гг. были снижены примерно на 10°С. Это позволило создать „запасную зону“, исключая возможность порчи зерна в случае локального перегрева зерна в шахте сушилки.

Математическая обработка данных экспериментов позволила получить эмпирические уравнения для предельно допустимых температур нагрева продовольственной пшеницы в виде:

для нормальной клейковины

$$\theta_{max} = 78 - 1,85w + 0,03w^2 - \frac{\tau - 90}{0,023w^2}; \quad (1-III)$$

для слабой клейковины

$$\theta_{max} = 88 - 2,15w + 0,03w^2 - \frac{\tau - 90}{0,023w^2}; \quad (2-III)$$

для крепкой клейковины

$$\theta_{max} = 73 - 1,85w + 0,03w^2 - \frac{\tau - 90}{0,023w^2}, \quad (3-III)$$

где  $\tau$  - время сушки в мин.

Уравнения (1-III) - (3-III) действительны для диапазона влажности от 15 до 35 %.

#### Границы предельно допустимых температур нагрева зерна в кипящем слое

Для сохранения качества зерна при сушке в кипящем слое нами впервые применен чередующийся нагрев и охлаждение зерна (осциллирующий режим). Такое построение режима позволяет, с одной стороны, регулировать максимальный нагрев зерна, с другой - осуществлять процесс любой длительности, необходимой для заданного снижения влажности. Кроме того, чередующийся нагрев и охлаждение зерна позволяют применять сравнительно высокие температуры агента сушки (до 200°), обеспечивающие интенсивную влагоотдачу зерна при достаточной экономичности процесса. С целью определения  $\theta_{max}$  для осциллирующего режима нами проведено ис-

следование на экспериментальной установке, рабочая часть шахты которой изготовлена в виде параллелепипеда с суженной нижней частью. Конфигурация и размеры рабочей шахты выбраны в результате специально поставленных аэродинамических исследований. В опытах влажность зерна изменялась от 25 до 43 %, а температура агента сушки была выбрана на уровне 120, 135, 150 и 165<sup>0</sup>С. Чередование нагрева (2 мин) с охлаждением (1 мин.) осуществляли без выключения установки при различной длительности опытов. В процессе исследования определяли всхожесть зерна, степень денатурации спирторастворимых белков и качественные показатели клейковины (выход и удельную растяжимость). Подопытным материалом служили сортовые пшеницы ОД-3 и ОД-16.

Как следует из полученных данных, граница безопасных температур нагрева пшеницы как продовольственного, так и семенного назначения при сушке в кипящем слое находится примерно на 10<sup>0</sup>С выше, чем для плотного слоя.

Анализируя эти данные, приходим к выводу, что периодическое охлаждение способствует сохранению как семенных, так и продовольственных качеств зерна. Как правило, после периода охлаждения наблюдалось некоторое увеличение всхожести, выхода сырой клейковины и удельной ее растяжимости. По-видимому, при промежуточном охлаждении зерна происходит восстановление свойств белкового комплекса зародыша и эндосперма, изменившихся при нагреве.

Границы предельно допустимых температур нагрева пшеницы при сушке в кипящем слое с чередующимся нагревом и охлаждением зерна могут быть выражены в виде эмпирических зависимостей:

для семенного зерна

$$t_{max} = 87 - w; \quad (4-III)$$

для зерна продовольственного назначения (с нормальной исходной клейковиной)

$$t_{max} = 100 - 1,3 w. \quad (5-III)$$

Приведенные уравнения действительны для влажности зерна от 15 до 39 %.

Границы предельно допустимых температур нагрева зерна в кипящем слое при чередующемся нагреве и охлаждении слоя были проверены в производственных условиях на зерне естественной влажности и получили подтверждение. Опыты проведены на полупромышленной установке производительностью 1 т/час.

#### Границы предельно допустимых температур агента сушки

Для плотного подвижного слоя (шахтные зерносушилки) ограничением при выборе  $t_{max}$  является образование „закала“ зерна. Явление „закала“ совершенно не изучено. Ряд авторов (В.П.Горячкин, С.Д.Птицын, М.А.Скороваров, Х.Гоффманн) считает, что „закал“ зерна связан с закрытием капилляров в оболочках. Другие исследователи (А.С.Гинзбург, А.П.Гершой и Н.И.Соседов, Б.Дамман и Л.Ким) полагают, что наряду с закрытием пор оболочек в алейроновом слое и прилегающих к нему периферийных частях эндосперма происходят сложные биохимические изменения: коагуляция белковых веществ и декстринизация крахмала. Однако в литературе отсутствуют данные об условиях и режимных параметрах, при которых образуется „закал“ зерна.

В связи с этим нами была поставлена задача проверить возможность образования „закала“ при сушке свежееубранного зерна пшеницы естественной влажности и установить границу  $t_{max}$  для первой ступени. В качестве метода обнаружения „закала“ нами использовано свойство оболочек, подвергшихся „закалу“, не пропускать влагу.

Эксперименты были проведены непосредственно на элеваторе в г.Бийске в период заготовок 1963 и 1964 годов. Для исследования была создана установка, в которой зерно подвергалось сушке в неподвижном слое толщиной 20–25 мм. Подопытным материалом служила свежееубранная пшеница, посту-

падающая на элеватор непосредственно из-под комбайнов. Для зерна определенной влажности проводили эксперименты при температурах агента сушки от 100 до 220°С (через каждые 20°С). Время сушки для каждого подопытного образца выбрано на уровне 3,5 и 6 минут. Скорость агента сушки в слое была выбрана такой же, как и в шахтной зерносушилке (0,35–0,5 м/сек).

В данном исследовании „закала“ зерна не было обнаружено. В связи с этим температура агента сушки до 200°С применима для теплового обезвоживания зерна в плотном подвижном слое. Однако, учитывая неравномерное движение зерна в шахте сушилки, частичную задержку зерна на коробах, а также возможность загорания легких примесей, границу  $t_{max}$  для первой зоны сушилки в первом приближении можно записать в виде

$$t_{max}^I = 180 - 0,7 w_1. \quad (6-III)$$

Уравнение (6-III) было использовано нами при разработке алгоритма расчета оптимального режима сушки. Испытания автоматизированной сушилки ДСП-24 в г.Бийске в течение 3х лет и последующая ее опытная эксплуатация показали, что температура агента сушки, рассчитанная по уравнению (6-III), не снижает качественных показателей зерна.

#### 1У. РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА И АГЕНТА СУШКИ ПО ХОДУ ПРОЦЕССА

Для решения этой проблемы нами обработаны данные экспериментов наших и других исследований (А.С.Гинзбурга; А.П.Гержоя; В.И.Атаназевича; В.И.Костенко, Н.А. Ильвицкого и М.Б.Саакяна и др.), проведенных как в лабораторных, так и в производственных условиях. Сюда вошли опыты по сушке различных культур при различных режимах (одноступенчатые, ступенчатые восходящие и нисходящие, импульсные). В экспериментах параметры режимов изменялись в следующих пределах: температура агента сушки от 70 до 220°С; начальная

влажность зерна от 20 до 40 %; скорость агента сушки в слое от 0,15 до 0,5 м/сек; толщина продуваемого слоя зерна от 25 до 250 мм.

Закономерность изменения скорости сушки, интенсивности и величины нагрева материала, скорости приращения и величины влагосодержания отработанного агента сушки представлены в виде обобщенных зависимостей в безразмерных координатах (рис.3). Усреднение проведено для двух режимов: ступенчатого нисходящего (кривые 1, 1', 1'', 1''', I) и ступенчатого восходящего (кривые 2, 2', 2'', 2''', II). Кривые безразмерной температуры и скорости нагрева материала (рис.3, в, с) для простоты расчетов аппроксимированы ломаными кривыми, состоящими из трех прямых.

Пользуясь усредненной зависимостью скорости сушки в безразмерных координатах, получаем уравнения для расчета общего количества испаренной влаги в результате суммирования уравнений скорости сушки для трех характерных участков (прогрева материала, постоянной скорости сушки и убывающей скорости сушки) для нисходящего  $U'$  и восходящего  $U''$  режимов.

$$U' = \left( \frac{dU}{d\tau} \right)'_{max} \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx; \quad f(x) = \begin{cases} \frac{x}{0,15} & \text{при } 0 \leq x \leq 0,15, \\ 1 & \text{при } 0,15 < x < 0,45, \\ 1,57 - 1,27x & \text{при } 0,45 \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (1-1У)$$

где  $x = \frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{h}{H}$ .

Величина скорости сушки  $\left( \frac{dU}{dx} \right)'_{max}$  определена как максимальное значение ординаты безразмерной скорости сушки, если общий часовой съем влаги за весь период сушки выражается величиной  $G_1 \frac{\Delta w}{100 + w_1}$  и равен площади, расположенной под кривой 1 (рис.3, а):

$$\left( \frac{dU}{dx} \right)'_{max} = 1,36 G_1 \frac{\Delta w_1}{100 + w_1}. \quad (2-1У)$$

$$U'' = \left( \frac{dU}{dx} \right)'' \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx; \quad f_2(x) = \begin{cases} 0,5x & \text{при } 0 \leq x \leq 0,2, \\ 1 & \text{при } 0,2 < x < 0,3, \\ 1,28 - 0,93x & \text{при } 0,3 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (3-1У)$$

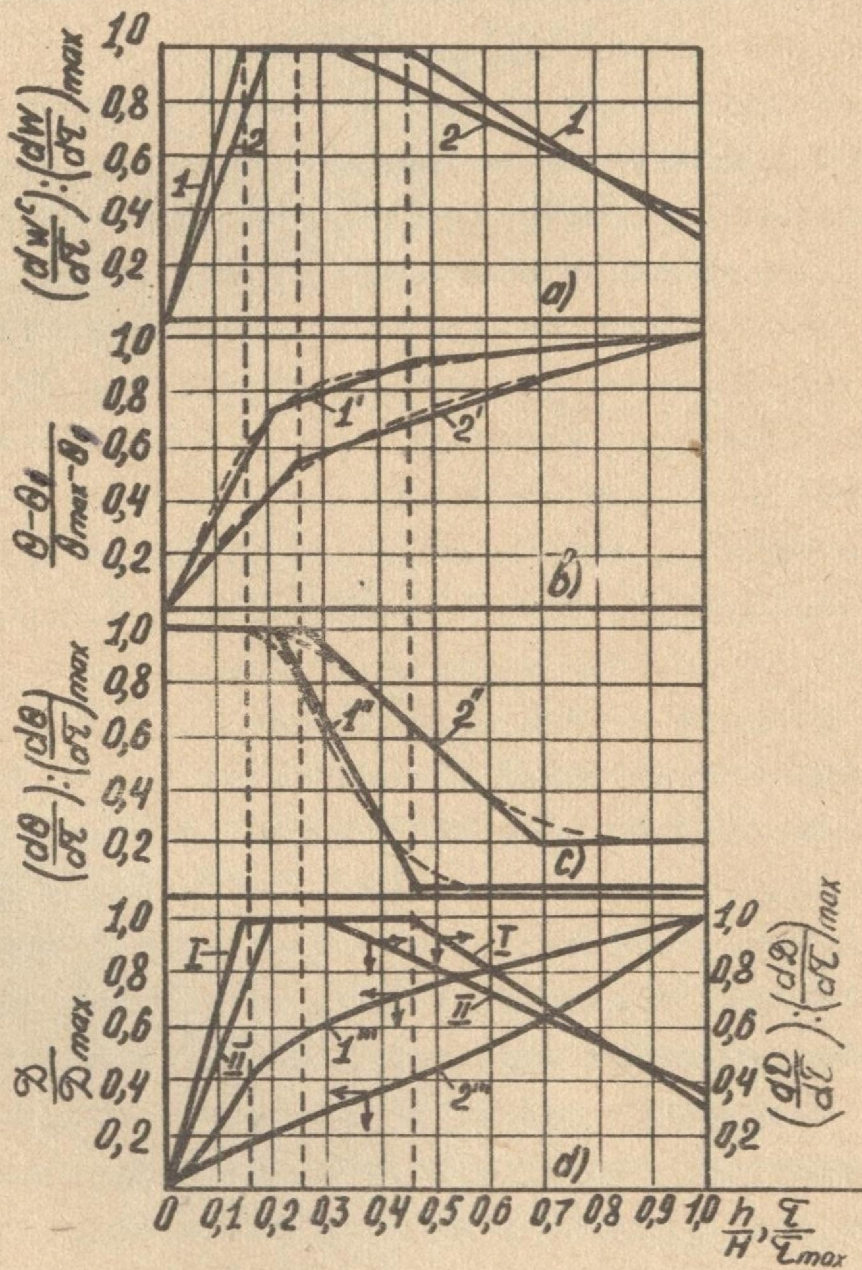


Рис.3. Обобщенные зависимости кинетики сушки в безразмерных координатах. 1, 1', 1'', 1''', I - для ступенчатых нисходящих режимов; 2, 2', 2'', 2''', II - для ступенчатых восходящих режимов.

$$\left(\frac{dU}{dx}\right)''_{max} = 1,49 G_1 \frac{\Delta w}{100 + w_1} \quad (4-1Y)$$

На основании уравнений (1-1Y) и (3-1Y) получаем зависимости затрат тепла на испарение влаги по ходу процесса.

Для нисходящего режима:

$$Q'_{исп} = U' r_0 \psi \quad (5-1Y)$$

Для восходящего режима:

$$Q''_{исп} = U'' r_0 \psi \quad (6-1Y)$$

В уравнениях (5-1Y) и (6-1Y) коэффициент  $\psi$  характеризует дополнительные затраты тепла на разрушение связи влаги с материалом, преодоление термоградиентного перемещения влаги и сопротивления тканей зерна при движении влаги к зоне испарения и оттуда к поверхности.

Определение величины коэффициента  $\psi$  расчетным путем по теплоте гидратации или методом Отмера здесь неприменимо, т.к. указанные методы учитывают только прочность связи влаги с материалом. Это показано прямыми экспериментами В.П.Дущенко, М.С.Панченко и В.В.Бельдий, а также В.Ф.Казанским при сушке крахмала, муки и силикагеля.

В связи с этим нами определена зависимость дополнительных затрат тепла на испарение влаги  $\psi$  как функция от текущей влажности зерна с использованием коэффициентов для перевода количества просушенного зерна в плановые тонны, вследствие того что они (коэффициенты) наиболее полно характеризуют комплексные затраты энергии на процесс сушки в зависимости от исходной и конечной влажности зерна.

Полученные данные обработаны в полулогарифмических координатах и методом наименьших квадратов получено уравнение для коэффициента  $\psi$  в таком виде:

$$\psi = 1 + 13,07 \exp(-0,23 w) \quad (7-1Y)$$

## Затраты тепла на нагрев материала

Распределение тепла, затраченного на нагрев зерна, по высоте сушильной камеры пропорционально площадям, расположенным под кривыми 1'' и 2'' (рис. 3, с). Тогда, применив методику, использованную при выводе уравнения для усредненной кривой скорости сушки, получим соответственно для нисходящего и восходящего режимов:

$$Q'_{нз} = 2,79 G_{ср} C_{з(ср)} (\theta_k - \theta_1) \int_{x_1}^{x_2} f_3(x) dx; f_3(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq x \leq 0,2, \\ 1,76 - 3,8x & \text{при } 0,2 < x < 0,45, \\ 0,05 & \text{при } 0,45 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (8-1У)$$

$$Q''_{нз} = 1,68 G_{ср} C_{з(ср)} (\theta_k - \theta_1) \int_{x_1}^{x_2} f_4(x) dx; f_4(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq x \leq 0,25, \\ 1,43 - 1,73x & \text{при } 0,25 < x < 0,7, \\ 0,23 & \text{при } 0,7 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (9-1У)$$

## Потери тепла с отработанным агентом сушки

Потери тепла с уходящим из слоя агентом сушки пропорциональны температуре нагрева зерна (рис. 3, в; кривые 1' и 2' соответственно для нисходящего и восходящего режимов).

Принимаем в качестве первого приближения, что температура отработанного агента сушки равна средней температуре нагрева зерна в каждом элементарном слое. Тогда уравнения для  $Q_{отр}$  можно записать в виде:

$$Q'_{отр} = L_{обш} C_в \theta_k \int_{x_1}^{x_2} f_5(x) dx; f_5(x) = \begin{cases} 3,75x & \text{при } 0 \leq x \leq 0,2, \\ 0,63 + 0,6x & \text{при } 0,2 < x < 0,45, \\ 0,82 + 0,18x & \text{при } 0,45 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (10-1У)$$

$$Q''_{отр} = L_{обш} C_в \theta_k \int_{x_1}^{x_2} f_6(x) dx; f_6(x) = \begin{cases} 2,2x & \text{при } 0 \leq x \leq 0,25, \\ 0,38 + 0,67x & \text{при } 0,25 < x < 0,7, \\ 0,5 + 0,5x & \text{при } 0,7 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (11-1У)$$

## Распределение тепла по ходу процесса

Полученные обобщенные уравнения (5-1У), (6-1У), (8-1У), (9-1У), (10-1У), (11-1У) используем для построения распределения общего расхода тепла по высоте сушильной камеры, пренебрегая потерями в окружающую среду. Исходные данные для расчета приведены в табл.1.

Таблица 1

Режимы	Производ. по сырью зерну $G_1$ , т/час	Влажность зерна		Нагрев зерна до сушки $\theta_1$ , °С	Максим. нагрев зерна $\theta_k$ , °С	Общий расход агента сушки $L$ , кг/час
		до сушки $w_1$ , %	После сушильной камеры $w_k$ , %			
Нисходящий	40	25	17	0	50	120000
Восходящий	32	25	17	0	50	120000

На рис.4 приведены затраты тепла по статьям расхода, отнесенные к безразмерному времени сушки, для нисходящего (кривые  $a, a', a'', a'''$ ) и восходящего (кривые  $b, b', b'', b'''$ ) режимов.

Кривые  $a'''$  и  $b'''$  характеризуют общие затраты тепла на сушку по высоте сушильной камеры, слагаемые из расходов энергии на испарение влаги (площади, ограниченные кривыми  $a', b'$  и осью абсцисс), нагрев материала (площади, заключенные между кривыми  $a', a''$  и  $b', b''$ ) и потери тепла с отработанным агентом сушки (площади, расположенные между кривыми  $a'', a'''$  и  $b'', b'''$ ). На рис.4 заштрихованные области соответствуют затратам тепловой энергии на разрушение связи влаги с материалом и преодоление сопротивления при перемещении влаги к поверхности. Анализ полученных данных показывает, что общие затраты тепла резко возрастают до максимума на участке, составляющем примерно 20 % от общей длительности сушильного процесса, в основном за счет рас-

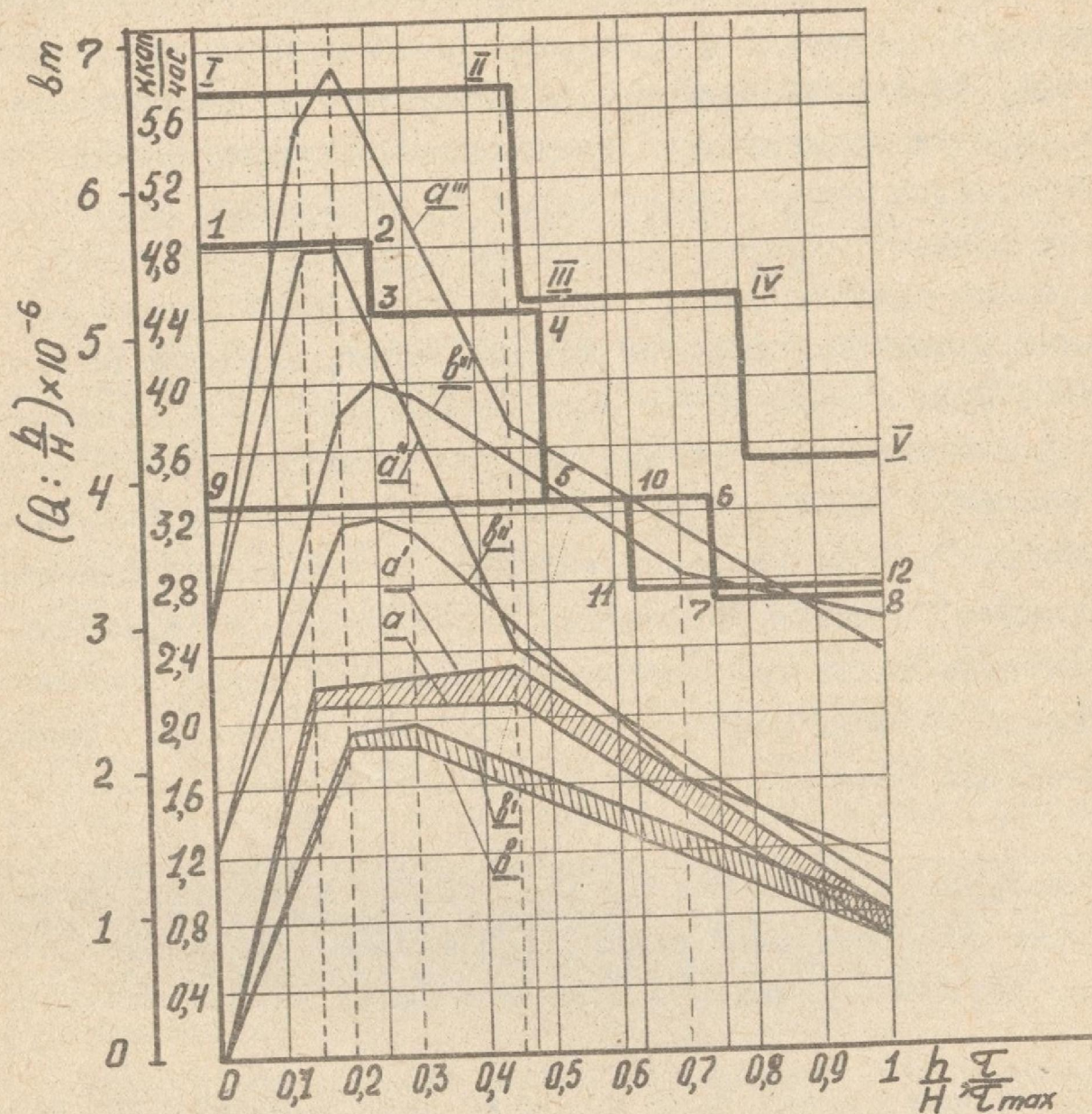


Рис.4. Распределение затрат тепла по ходу процесса сушки.  
 $\alpha, \alpha', \alpha'', \alpha'''$ , 1-2-3-4-5-6-7-8 - для нисходящего режима;  
 $\beta, \beta', \beta'', \beta'''$ , 9-10-11-12 - для восходящего режима;  
 I-II-III-IV-V - для сушилки Кэмпбелл.

ходов тепла на прогрев материала. Затем, несмотря на наличие постоянной и максимальной скорости сушки, затраты тепла снижаются в связи с сокращением расхода тепла на нагрев материала. Во второй половине процесса они продолжают снижаться за счет непрерывного уменьшения скорости сушки.

Усреднение общих затрат тепла по двум зонам для восходящего режима (сушилка ДСП-32) дает кривую 9-10-11-12. Отсюда можно сделать вывод, что при восходящем режиме тепло агента сушки полностью не используется, особенно во второй зоне, куда подают агент сушки с максимальной температурой. Для нисходящего режима выдержать распределение тепла по кривой  $\alpha'''$  практически сложно и экономически невыгодно. Поэтому, исходя из конструктивных особенностей шахтных зерносушилок, с целью унификации вентиляторов и строительных элементов шахты без особых погрешностей можно принять соотношение четырех горячих зон, как один к одному. Такая аппроксимация показана на рис.4 (ломаная кривая 1-2-3-4-5-6-7-8).

Пользуясь уравнениями (5-1У), (8-1У) и (10-1У), можно рассчитать температурный режим, в принципе, при любом количестве ступеней сушильной камеры и любой их протяженности.

Полученные данные были положены нами в основу при выборе и расчете оптимального режима, а также при практическом осуществлении 4-х ступенчатого нисходящего режима на зерносушилке ДСП-24 в г.Бийске.

На рис.4 приведены данные по распределению тепла для сушилки Кэмпбелл Драйер (кривая I-II-III-1У-У). Соотношение расхода тепла по зонам для этой сушилки составит:

$$Q^I : Q^{II} : Q^{III} = 1,64 : 1,27 : 1.$$

Если аппроксимировать кривую  $\alpha'''$ , полученную в наших исследованиях, для трех ступеней в таком же соотношении высоты ступеней, как и в сушилке Кэмпбелл Драйер, то отноше-

ние расходов тепла, отнесенных к безразмерной высоте сушилки по ступеням, составит: 1,78 : 1,25 : 1. Как следует из приведенных данных, соотношение расхода тепла по высоте сушилки, полученное нами, примерно соответствует аналогичному распределению тепла в сушилке Кэмпбелл Драйер.

Пути решения задачи оптимального использования  
агента сушки как влагоносителя

На рис.3, *d* приведены безразмерные приращения влагосодержания  $(dD/d\tau) : (dD/d\tau)_{max}$  в зависимости от безразмерного времени сушки и расчетные данные по изменению безразмерного влагосодержания отработанного агента сушки  $D/D_{max}$  при оптимальном его насыщении ( $\varphi_{отп} = 0,8$ ) в соответствии с изменением температуры агента сушки на выходе из слоя (кривые 1<sup>м</sup> и 2<sup>м</sup> соответственно для нисходящего и восходящего режимов). Из графиков следует, что при одинаковом расходе агента сушки по высоте сушильной камеры наиболее полно как влагоноситель он используется при нисходящем режиме. Однако даже в этом случае влагоемкость отработанного агента сушки имеет наибольшее значение в конечной стадии процесса, тогда как приращение влагосодержания в этом периоде заметно уменьшается.

Анализ приведенных данных показывает, что величину расхода агента сушки необходимо дифференцировать по ходу процесса в соответствии с характером изменения скорости сушки и температуры нагрева материала. Исходя из этого, оптимальный расход агента сушки для *i*-той ступени должен удовлетворять условиям уравнения (12-1У) и неравенству (13-1У):

$$L_i = U_i \frac{1000}{622 \frac{\varphi_{отп} \rho_{нас}(i)}{6 - \varphi_{отп} \rho_{нас}(i)} - D_1}; \quad (12-1У)$$

$$0,5 > v_{8(i)} > 0,15. \quad (13-1У)$$

В уравнении (12-1У)  $R'_{нас} = 5,33 \theta_{cp(i)}^2 - 33,33 \theta_{cp(i)} + 922$ , а величину  $U_i$  находим из выражения (1-1У). Неравенство (13-1У) получено из условий обеспечения необходимого теплообмена между поверхностью зерна и агентом сушки и ограничения скорости агента сушки на выходе из отводящих коробов.

Расчеты показывают, что для четырехступенчатого режима (кривая 1-2-3-4-5-6-7-8, рис.4) наиболее рациональным решением задачи является применение максимально допустимых расходов агента сушки в I и II ступенях, в которых наблюдаются максимальные затраты тепла и некоторое снижение расходов агента сушки в III и IV ступенях (до 20 %). В этом случае для сохранения необходимого распределения тепла по ходу процесса температура агента сушки, начиная со второй зоны, должна соответственно уменьшаться.

Такое распределение агента сушки по ступеням было осуществлено при подготовке к автоматизации сушилки ДСП-24 в г.Бийске.

#### У. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА

Вопросу получения аналитических уравнения для расчета кинетики процесса сушки посвящено значительное количество исследований. В работах использованы методы А.В.Лыкова, Г.К.Филоненко, Н.Ф.Докучаева и М.С.Смирнова, И.Л.Любошица для математического описания процесса сушки самых различных культур в кипящем и плотном слоях с различным энергоподводом. На основании анализа многочисленных данных по этой проблеме был сделан вывод о неприменимости рассмотренных методов математического описания процесса для условий сушки зерна в плотном подвижном слое. Главным недостатком этих методов является отсутствие возможности расчетным путем учесть период прогрева материала, что при сушке зерна является необходимым. В связи с этим нами сделана попытка

получить общие уравнения для расчета длительности сушки и нагрева материала на любом этапе процесса, включая периоды прогрева материала, постоянной и убывающей скорости сушки.

Вывод уравнения для расчета длительности процесса  
(уравнение сушки)

Для этого воспользуемся дифференциальным уравнением внутреннего тепло- и массообмена, предложенным А.В. Лыковым, представив зерновку в виде шара радиуса  $R$  и пренебрегая влиянием термоградиента:

$$\frac{\partial w(z, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_m \left[ \frac{\partial^2 w(z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{z}{r} \frac{\partial w(z, \tau)}{\partial z} \right]. \quad (1-У)$$

Уравнение (1-У) приближенно решено с использованием способа преобразования Лапласа. В окончательном виде приближенное выражение для среднего значения влажности по объему зерновки можно записать в виде:

$$w_{cp} = (w_1 - w_p) \exp(-\mu_1^2 F_0) + w_p, \quad (2-У)$$

где  $\mu_1$  - корень характеристического уравнения.

Для качественной оценки выражения  $\mu_1^2 F_0$  решим задачу массообмена на границе тепло- и массообмена согласно уравнениям, записанным для единицы поверхности испарения:

$$-\frac{dw'_{cp}}{d\tau} = \alpha_m \left( \frac{w'_{cp} - w'_{cp}(пов)}{R} \right); \quad (3-У)$$

$$-\frac{dw'_{cp}}{d\tau} = \beta w'_{cp}(пов), \quad (4-У)$$

где  $w'_{cp} = w_{cp} - w_p$ .

В уравнении (4-У) скорость сушки принята пропорциональной концентрации влаги на поверхности материала  $w'_{cp}(пов)$  согласно принятому нами механизму обезвоживания зерна.

Совместное решение уравнений (3-У) и (4-У) при допущении, что величины  $\alpha_m$  и  $\beta$  не зависят от влажности

зерна, с учетом начальных условий  $w_{cp}(0) = w_{1(cp)}$ , дает уравнение такого же вида, как и уравнение (2-У):

$$w_{cp} = (w_1 - w_p) \exp\left(-\frac{a_m \beta}{a_m + R\beta} \tau\right) + w_p. \quad (5-У)$$

В уравнениях (2-У) и (5-У) выражение  $\mu_1^2 \tau_0 = \frac{a_m \beta}{a_m + R\beta} \tau$  представляет сложную зависимость коэффициентов, характеризующих внутренний и внешний влагоперенос. Определение этой зависимости в явном виде не представляется возможным вследствие нелинейной зависимости коэффициентов от ряда режимных параметров. В связи с этим нами предпринята попытка представить это выражение в виде произведения основных параметров, которые определяют интенсивность влагоотдачи при сушке влажных материалов.

В окончательном виде одно общее полуэмпирическое уравнение для расчета средней влажности зерна на любом этапе процесса можно записать в виде:

$$w_{cp} = (w_1 - w_p) \exp\left[-AK_K \Psi(w_1) P'_{нас} \frac{F}{G_{сух}} \tau\right] + w_p. \quad (6-У)$$

В уравнении (6-У) величины постоянного коэффициента  $A$  и  $\Psi(w_1)$  определены на основании экспериментальных данных при сушке мягкой пшеницы:  $A = 3,4 \cdot 10^{-8}$ ;

$\Psi(w_1) = -1,35 + 1,325 w_1 - 0,0225 w_1^2$ . Значение  $w_p$  принято равным 10 %, согласно данным, приведенным в работах С.Д. Птицына, Джонса, Беккера и Салланса. Коэффициент  $K_K$  характеризует сравнительную интенсивность обезвоживания и численно равен отношению средней скорости сушки данной культуры к средней скорости сушки мягкой пшеницы при условии одинаковой исходной и конечной влажности зерна и данном режиме. Величина коэффициента  $K_K$  для различных культур определена в результате обработки данных специально поставленных нами экспериментов (табл. 2).

Таблица 2

Культура	: Пшени- ца : твер- дая	: Куку- руза	: Рожь	: Овес	: Про- со	: Гре- чи- ха	: Го- рох	: Под- сол- неч- ник	: Яч- мень	: Соя
$K_k$	0,9	0,6	0,9	1,2	0,9	1,4	0,4	1,3	0,8	0,6

Величина  $P'_{нас}$  получена нами в виде эмпирической за-  
висимости по данным С.Д.Птицына.

$$P'_{нас} = 2,94(1,67 + 0,0052 w)^{0,18} + 6. \quad (7-у)$$

Уравнение (7-у) может быть использовано для различных культур, так как по данным С.Д.Птицына максимальные отклонения давления пара  $P'_{нас}$  над поверхностью пшеницы, кукурузы, гороха, овса в диапазоне температур  $40 + 60^{\circ}\text{C}$  не превышают 5 %.

Удельную поверхность испарения  $F/G_{сух}$  легко подсчитать, предварительно определив поверхность зерен по формуле

$$F = \pi d_{экв} n \delta_z, \quad (8-у)$$

где  $n$  - количество зерен в навеске;  $\delta_z$  - коэффициент формы зерен;  $d_{экв} = 0,124 \sqrt[3]{G'/\rho_z}$ ;  $G'$  - вес тысячи зерен. Для пшеницы  $F/G_{сух} = 295 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

#### Вывод уравнения для расчета температуры нагрева зерна в процессе сушки

При сушке зерна наиболее приемлемым методом вывода уравнения, описывающего кинетику нагрева материала, является метод теплового баланса, предложенный А.С.Гинзбургом и В.А.Резчиковым. Исходное уравнение теплового баланса в дифференциальной форме для сушильной камеры шахтной зерносушилки можно записать в виде

$$L C_p (t - \theta) d\tau = G C_z d\theta + G \frac{dw}{100 + w} \rho_0 \Psi + dQ_{пот}. \quad (9-у)$$

В этом уравнении  $C_z = f_1(w)$ ,  $\Psi = f_2(w)$ ,  $\rho_0 = f_3(\theta)$ .

При написании уравнения (9-У) было сделано допущение, обоснованное нами в главе 1У, о том, что температура агента сушки на выходе из элементарного слоя равна средней его температуре. Для расчета  $\theta$  нами использовано уравнение скорости сушки в безразмерных координатах (1-1У). Тогда, пренебрегая потерями в окружающую среду, уравнение (9-У) для  $i$ -той зоны можно записать в единицу времени:

$$L_i C_b t_i = U_i C_{ж} (\theta_{cp(i)} - \theta_i) + U_i \rho_{o(cp)} t_{cp(i)} + G_{i+1} C_{z(i+1)} (\theta_{i+1} - \theta_i) + L_i C_b \theta_{cp(i)}, \quad (10-У)$$

где

$$\theta_{cp(i)} = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}; \quad \rho_{o(cp)} = (2500 - 2,35 \theta_{cp(i)}) \cdot 10^3;$$

$$w_{cp(i)} = \frac{w_i + w_{i+1}}{2}; \quad w_{i+1} = w_i - \frac{U_i}{G_i} (100 + w_i);$$

$$G_{i+1} = G_i - U_i; \quad C_{z(i+1)} = 4190 \left( \frac{37 + w_{i+1}}{100 + w_{i+1}} \right).$$

$U_i$  находим из уравнения (1-1У).

Подставив в уравнение (10-У) значение  $\rho_{o(cp)}$  и  $\theta_{cp(i)}$ , решаем его относительно  $\theta_{i+1}$ :

$$\theta_{i+1} = \frac{L_i C_b (t_i - 0,5 \theta_i) + U_i (0,5 C_{ж} \theta_i - 25 \cdot 10^5 \psi_{cp(i)} + 1175 \theta_i) + G_{i+1} C_{z(i+1)} \theta_i}{U_i (0,5 C_{ж} - 1175 \psi_{cp(i)}) + G_{i+1} C_{z(i+1)} + 0,5 C_b L_i}. \quad (11-У)$$

Уравнение (10-У) можно решить относительно температуры агента сушки в зоне. Такая задача возникает при заданном темпе нагрева зерна. В этом случае получаем выражение

$$t_i = \frac{U_i [0,5 (\theta_{i+1} - \theta_i) C_{ж} + \rho_{o(cp)} \psi_{cp(i)}] + G_{i+1} C_{z(i+1)} (\theta_{i+1} + \theta_i) + L_i C_b \theta_{cp(i)}}{C_b L_i}. \quad (12-У)$$

Для проверки надежности расчета температуры нагрева зерна по уравнению (11-У) было проведено сравнение расчетных и опытных данных, полученных при испытании автоматизи-

рованной сушилки ДСП-24 в г.Бийске в 1966 и 1967 гг., которое показало, что максимальные расхождения этих величин не превышают 8 %.

### Математическая модель процесса сушки зерна для плотного подвижного слоя и метод расчета оптимального режима

Математическая модель процесса сушки зерна в плотном подвижном слое (для условий шахтной зерносушилки) в первом варианте была представлена в виде системы уравнений, состоящей из уравнения сушки (6-У), уравнения нагрева материала (11-У) и граничных уравнений (1-Ш), (2-Ш), (3-Ш), (6-Ш). Для расчета оптимального режима применен итерационный метод, который сводится к определению путем последовательных приближений  $\theta_{max}$  и  $t_{max}$  для каждой ступени сушильной камеры по заданным значениям  $w_1$ ,  $\theta_1$  и исходного качества зерна.

Математическая модель процесса сушки и итерационный метод расчета оптимального режима по ступеням использованы для разработки управляющей вычислительной машины (УВМ) при автоматизации процесса сушки в шахтной зерносушилке ДСП-24 в г.Бийске. УВМ разработана Тбилисским научно-исследовательским институтом средств автоматизации и приборостроения (ТНИИСА), а система автоматического регулирования при нашем участии - Одесским институтом "Пищепром-автоматика".

Предварительные испытания сушилки, работающей на рекомендованных режимах с системой автоматического регулирования процесса и УВМ, позволили уточнить величины некоторых режимных параметров, а также наметить пути упрощения математической модели процесса сушки зерна и алгоритма расчета оптимального режима с целью снижения стоимости и повышения надежности работы УВМ.

В новом виде математическую модель процесса сушки зерна можно записать в следующем виде.

Уравнения сушки:

$$\bar{\tau}_0 = \frac{1}{3,4 \cdot 10^{-3} K_k \varphi(w_1) \rho'_{нас} F / G_{сух}} \ln \frac{w_1 - 10}{w - 10}, \quad (13-У)$$

$$\varphi(w_1) = -3,5 + 1,325 w_1 - 0,0225 w_1^2, \quad (14-У)$$

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_0 (1 - \alpha' \theta_1), \quad (15-У)$$

здесь  $\bar{\tau}_0$  - экспозиция сушки при  $\theta_1 = 0$ ;

$\alpha'$  - коэффициент, учитывающий увеличение производительности сушилки при повышении начальной температуры нагрева зерна на  $1^\circ\text{C}$  ( $\alpha' = 0,005$ ).

Уравнения температуры нагрева зерна:

$$\theta_4 = \theta_{max}(w_4), \quad w_4 = 0,25 w_1 + 0,75 w_k; \quad (16-У)$$

$$\theta_k = \theta_{max}(w_k), \quad \begin{cases} w_k = 17,2 & w_1 < 35\% \\ w_k = 0,8 w_1 - 8 & w_1 \geq 35\% \end{cases} \quad (17-У)$$

Уравнения температуры агента сушки:

$$t_{max}^I = 180 - 0,7 w_1; \quad (18-У)$$

$$t^II = 0,94 t_{max}^I; \quad (19-У)$$

$$t_r = 1,25 t_{max}^I. \quad (20-У)$$

Граничные уравнения при исходной клейковине ( $\bar{\tau} = 90$  мин):

$$\text{нормальной} \quad \theta_{max} = 78 - 1,85 w + 0,03 w^2; \quad (21-У)$$

$$\text{слабой} \quad \theta_{max} = 88 - 2,15 w + 0,03 w^2; \quad (22-У)$$

$$\text{крепкой} \quad \theta_{max} = 73 - 1,85 w + 0,03 w^2. \quad (23-У)$$

В данной математической модели по данным производственных экспериментов уточнена зависимость  $\varphi(w_1)$  и максимальный съем влаги (уравнения 14-У и 17-У). Выражение для  $w_4$  (уравнение 16-У) определено исходя из зависимости (1-1У) при известном соотношении высот ступеней.

Определение величины коэффициента  $\alpha'$  представляет значительные трудности, так как в литературе отсутствуют какие-либо данные о влиянии начальной температуры нагрева

зерна на производительность сушилки. В связи с этим нами были проведены специальные расчеты с помощью приведенной выше математической модели процесса сушки и уравнений (1-У), (11-У) и (12-У). Расчеты проведены для наиболее распространенного диапазона начальной влажности зерна от 20 до 27 % (через каждый процент) на ЦВМ „Минск-2“. Для математической модели принято среднеарифметическое значение коэффициента  $\alpha' = 0,005$ .

После наших работ по определению влияния начальной температуры нагрева на общую длительность процесса, проведенных в 1965 г., в 1967 г. исследования в этом направлении осуществлены ВНИИЗом. Пересчет данных ВНИИЗа по нашей методике дает величину  $\alpha'$ , близкой к нашему значению ( $\alpha' = 0,006$ ).

Расчет оптимального режима по новой математической модели сводится к определению экспозиции сушки  $\zeta$  по уравнениям (13-У) и (15-У), максимальных температур нагрева зерна после третьей и четвертой ступени по уравнениям (16-У) и (17-У) с использованием уравнений (21-У) - (23-У), температур агента сушки на первой, второй ступени и после топочного устройства по уравнениям (18-У) - (20-У).

Данная математическая модель процесса сушки с одно-разовым расчетом оптимального режима позволила упростить УВМ, снизить ее стоимость примерно на 30 % и повысить надежность работы. Адекватность математической модели реальному процессу подтверждена производственными испытаниями сушилки ДСП-24 в г.Бийске, проведенными в 1966 и 1967 годах (рис.5). Как следует из приведенных данных, средне-квадратичное отклонение расчетных величин общей длительности сушки от эксперимента не превышает 10 %.

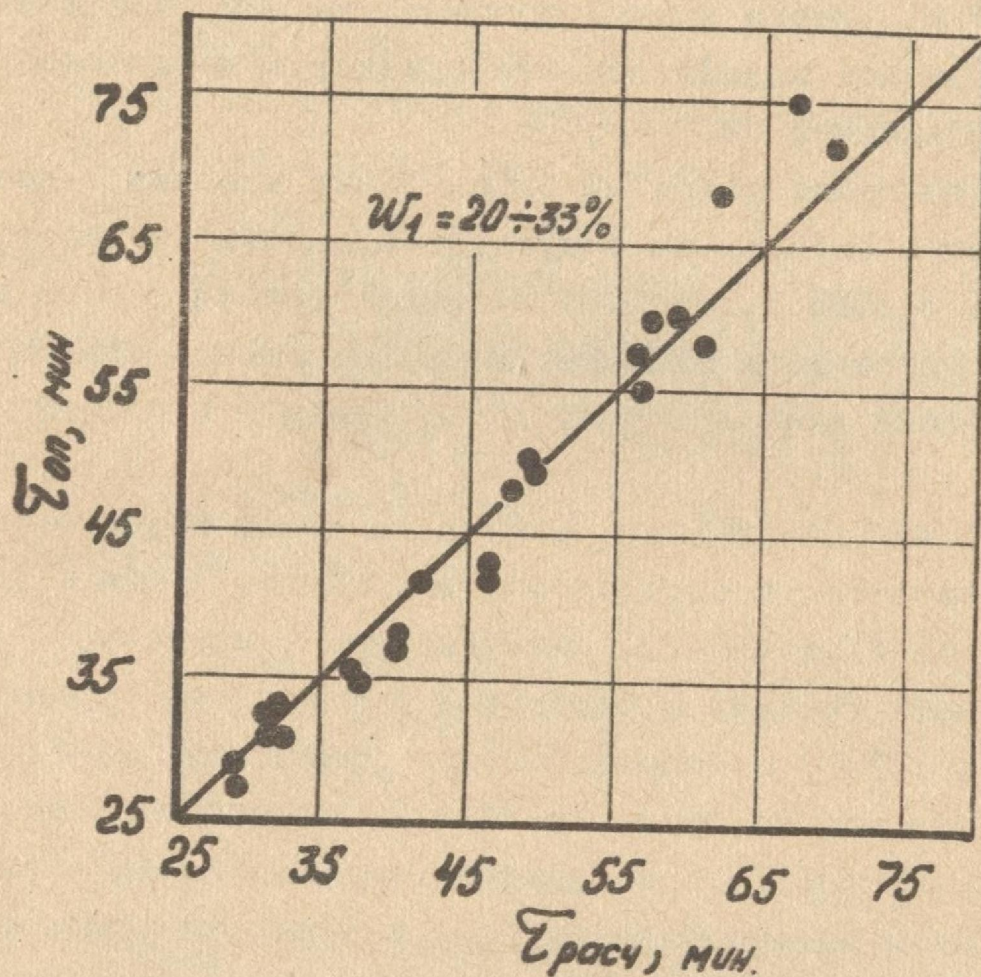


Рис.5. Сопоставление расчетных и опытных данных, полученных при испытании автоматизированной сушилки ДСП-24 в г.Бийске.

Математическая модель процесса сушки зерна  
в кипящем слое

Исследования процесса сушки зерна в кипящем слое проведены нами, а также рядом других исследователей (А.С.Гинзбургом, В.А.Резчиковым, А.С.Васильевой, И.Ф.Пикусом, Х.Гоффманном, К.Матуром и П.Гишлером и др.). В результате установлены основные закономерности удаления влаги в зависимости от режимных параметров и предложены первые конструкции сушильных установок.

В нашей стране внедрение разработанных конструкций находится на стадии освоения полупромышленных образцов.

Проведенные нами исследования процесса сушки зерна в кипящем слое, начатые в 1956 году, завершились разработкой двух полупромышленных сушильных агрегатов: первого производительностью 1 пл.т/час, второго - 50 пл.т/час.

На разработанную конструкцию сушилки выдано авторское свидетельство.

На основе системы связанного тепло- и массопереноса, полученной А.В.Лыковым, математическая модель процесса сушки в кипящем слое может быть представлена в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial u}{\partial x} - a_m(\theta) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{A(v_z)}{c_z \gamma_z} (\theta - t) - \frac{\rho_0}{c_z} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) = 0,$$

где  $\bar{u}(\tau, x) = \frac{2}{R^2} \int_0^R z u(\tau, x, z) dz;$

с граничными условиями  $u(\tau, 0, z) = u^0(\tau, z),$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(\tau, x, R) = \begin{cases} -\frac{B(\theta, v_z)}{a_m(\theta)} (u_R - u_p), & u_R \leq u_2 \\ -\frac{B(\theta, v_z)}{a_m(\theta)} (u_1 - u_p), & u_R > u_2 \end{cases}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(\tau, x, 0) = 0 \quad (\text{условие симметрии}), \quad \theta(\tau, 0) = f_1(\theta)$$

и начальными условиями  $u(0, x, z) = u_0(x, z),$

$$\theta(0, x) = f_2(x). \quad (24-У)$$

В данной системе уравнений неизвестными являются коэффициенты  $A(v_z)$  и  $B(\theta, v_z)$ , которые должны быть определены по экспериментальным данным.

Полагая в уравнениях (24-У)  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$  и  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ , запишем стационарное состояние объекта:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\alpha_m(\theta)}{v_3} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{A(v_3)}{C_3 \gamma_3} (t - \theta) - \frac{2\beta B(\theta, v_3)}{C_3 v_3 R} (u_R - u_p),$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial u}{\partial z}(x, R) = \begin{cases} -\frac{B(\theta, v_3)}{\alpha_m(\theta)} (u_R - u_p), & u_R \leq u_2 \\ -\frac{B(\theta, v_3)}{\alpha_m(\theta)} (u_2 - u_p), & u_R > u_2 \end{cases}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(x, 0) = 0$$

и начальными условиями

$$u(0, z) = u_0(z), \quad \theta(0) = \theta_1. \quad (25-У)$$

При переходе к системе уравнений (25-У) была учтена зависимость средней скорости сушки от поверхностного вла-  
госодержания:

$$\Delta u = \frac{2}{R^2} \int_0^R z \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = \frac{2}{R} \frac{\partial u}{\partial R}. \quad (26-У)$$

Используя метод прямых при шаге между прямыми  $h' = \frac{R}{4}$ , преобразуем систему (25-У):

$$\frac{du_1}{dx} = \frac{\alpha_m(\theta)}{v_3 R^2} (24u_2 - 24u_1),$$

$$\frac{du_2}{dx} = \frac{\alpha_m(\theta)}{v_3 R^2} (20u_3 - 32u_2 + 12u_1),$$

$$\frac{du_3}{dx} = \frac{\alpha_m(\theta)}{v_3 R^2} \left( \frac{56}{3} u_4 - 32u_3 + \frac{40}{3} u_2 \right),$$

$$\frac{du_4}{dx} = \frac{9B(\theta, v_3)}{v_3 R} (u_4 - u_p) + \frac{32\alpha_m(\theta)}{v_3 R^2} (u_3 - u_4),$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{A(v_0)}{C_3 \gamma_3 v_3} (t - \theta) - \frac{2R B(\theta, v_0)}{C_3 v_3 R} (\mu_4 - \mu_p),$$

с начальными условиями  $\mu_i(0) = \mu_0$ ,  $\theta(0) = \theta_1$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ . (27-У)

В результате решения системы уравнений (27-У) на ЦВМ „Промінь“ получено распределение  $\theta$  и  $\bar{\mu}$  по длине сушильного аппарата, причем

$$\bar{\mu} = \frac{2}{R^2} \int_0^R \mu z dz \approx \frac{2}{R^2} \frac{k'}{2} (z_0 \mu_0 + 2z_1 \mu_1 + 2z_2 \mu_2 + 2z_3 \mu_3 + z_4 \mu_4) = \frac{1}{8} (\mu_1 + 2\mu_2 + 3\mu_3 + 2\mu_4). \quad (28-У)$$

Расчеты проведены на основании опытных данных, полученных на полупромышленной установке производительностью 1 пл.т/час.

В расчетах коэффициент диффузии влаги  $\alpha_m$  определен по данным работ А.С.Гинзбурга и В.П.Дубровского в виде эмпирической зависимости от температуры материала  $\theta$  :

$$\alpha_m = 0,622 \cdot 10^{-12} \theta^2. \quad (29-У)$$

Коэффициенты  $A(v_0)$  и  $B(\theta, v_0)$  получены на основании обработки экспериментальных данных методом средних:

$$A = 5120, \text{дж/м}^3 \text{град сек}; \quad B = 3,15 \cdot 10^{-8} \theta, \text{ м/сек при } v_0 = 1,6 - 1,8.$$

Степень соответствия модели реальному процессу оценивали по максимальным отклонениям расчетных значений  $\theta$  и  $\bar{\mu}$  от экспериментальных, которые не превышают 10-12 %. Следовательно, величина полученных погрешностей для условий сушки зерна в производственных условиях вполне приемлема для подтверждения модели.

Рассмотренная математическая модель применима для расчета оптимального режима при сушке зерна в кипящем слое с введением в систему уравнений ограничений по  $\theta_{max}$  (урав-

нение 5-III) и  $t_{max} = 200^{\circ}\text{C}$ . В этом случае расчет может свестись (при фиксированных значениях протяженности горячих и холодных секций) к нахождению оптимальных значений  $t_i$  по зонам, обеспечивающих ведение процесса при  $\theta = \theta_{max}(\omega)$ .

#### У1. АВТОМАТИЗАЦИЯ ШАХТНЫХ ЗЕРНОСУШИЛОК

В связи с поставленной задачей автоматизации шахтной зерносушилки возникает ряд требований к ней как к объекту автоматизации. Сюда относятся задачи технологического порядка, решение которых связано с осуществлением оптимальных режимов, а также задачи, относящиеся к системе автоматического регулирования.

Существующие шахтные зерносушилки, несмотря на то, что они являются полностью механизированными агрегатами, не соответствуют поставленным условиям. Как правило все известные конструкции имеют одну или две сушильные зоны, не отвечающие рациональному распределению тепла по ходу процесса. Параметры процесса контролируют примитивными методами и регулируют вручную. Все это не позволяет поддерживать стабильный режим сушки. Зачастую такой контроль и регулирование процесса приводят к уменьшению эффективности работы сушилки и снижению качественных показателей просушенного зерна. И, наконец, самым существенным недостатком всех шахтных сушилок является неравномерность нагрева и сушки зерна, доходящая соответственно до  $\pm 20-35^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 3-4\%$ .

В связи с этим нами поставлена задача исследования шахтной зерносушилки в направлении выявления ее недостатков и разработки мероприятий для их устранения. Исследование было проведено на сушилках ВТИ-15 (Куйбышев, Балашов, Саратов), ДСП-12 (Киев) и ДСП-24 (Бийск). В процессе обычной повседневной работы сушилки проводили замеры

температуры нагрева, влажности и скорости движения зерна в горизонтальном сечении шахты сушилки, скорости агента сушки на выходе из отводящих коробов.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что неравномерность нагрева и сушки зерна обуславливается следующими основными причинами:

- 1) неравномерным движением зерна в шахте сушилки;
- 2) неравномерным распределением агента сушки, как по коробам из распределительной камеры, так и по длине отдельных коробов;
- 3) неудовлетворительной работой выпускного механизма;
- 4) неудачным относительным расположением подводящих и отводящих коробов;
- 5) значительными колебаниями температуры агента сушки при входе в слой зерна (при работе топки на твердом топливе).

#### Подготовка сушилки к автоматизации

Для устранения неравномерности нагрева и сушки зерна разработан ряд рекомендаций и предложений:

- а) перевод топок на жидкое или газообразное топливо для стабилизации температуры агента сушки;
- б) установка в пристенных зонах, идущих параллельно коробам, жалюзийных стенок вместо полукоробов и ближайших коробов для устранения неравномерности скоростного поля движения зерна в шахте;
- в) установка в распределительных камерах всех ступеней сушильной зоны направляющих аппаратов с поворотными лопатками для устранения неравномерного распределения агента сушки по коробам;
- г) установка подводящих диффузоров горячих вентиляторов по всей высоте сушильной камеры при переводе сушилки на трех- или четырехступенчатый режим сушки для устранения неравномерного распределения агента сушки по высоте распределительной камеры;

д) замена рядового расположения подводящих и отводящих коробов диагональным для получения одинаковых условий сушки во всех вертикальных потоках зерновой массы (предложение ВНИИЗ);

е) установка выпускного механизма периодического действия типа ВТИ с выпуском 200 кг зерна на 1 шахту за одно открытие затвора для ликвидации локальных застойных зон и снижения опасности перегрева зерна при продувке его агентом сушки под подводящими коробами.

Разработанные мероприятия внедрены на сушилках ВТИ-15 в г. Ленинграде, ДСП-12 в г. Киеве и ДСП-24 в г. Бийске. Испытания этих сушилок после реконструкции показали, что неравномерность нагрева и сушки зерна сократилась примерно в 3 раза. Так, среднеквадратичные отклонения от средних значений температуры и влажности зерна снились соответственно с 10 до 4<sup>0</sup>С и с 2 до 0,5 %.

Таким образом, рекомендованный объем реконструкции обеспечивает достаточную равномерность нагрева и сушки зерна и может быть использован при подготовке сушилки к автоматизации.

Для дистанционного контроля и регулирования основных параметров режима (температуры агента сушки по ступеням, нагрева и влажности зерна) указанные выше сушилки оснащены соответствующими датчиками и устройствами.

На реконструированную сушилку шахтного типа нами получено авторское свидетельство.

#### Выбор структурной схемы автоматизации процесса сушки в шахтной зерносушилке

В соответствии с выбранной системой оптимального регулирования процесса сушки зерна, использованием математической модели объекта и алгоритма расчета оптимального режима, а также реализацией четырехступенчатого нисходящего режима нами разработана структурная схема полной автоматизации шахтной зерносушилки ДСП-24 с УВМ (рис. 6).

## Условные обозначения

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>⦿ датчик температуры сгвмта сушицы</li> <li>⦿ датчик температуры нагрева зерна</li> <li>⊙ исполнительный механизм</li> <li>□ датчик влажности зерна</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ спаренная индукционная задвижка</li> <li>□ регулятор</li> <li>○ датчик уровня зерна</li> <li>◇ автоматический задатчик</li> </ul> |
|---|--|

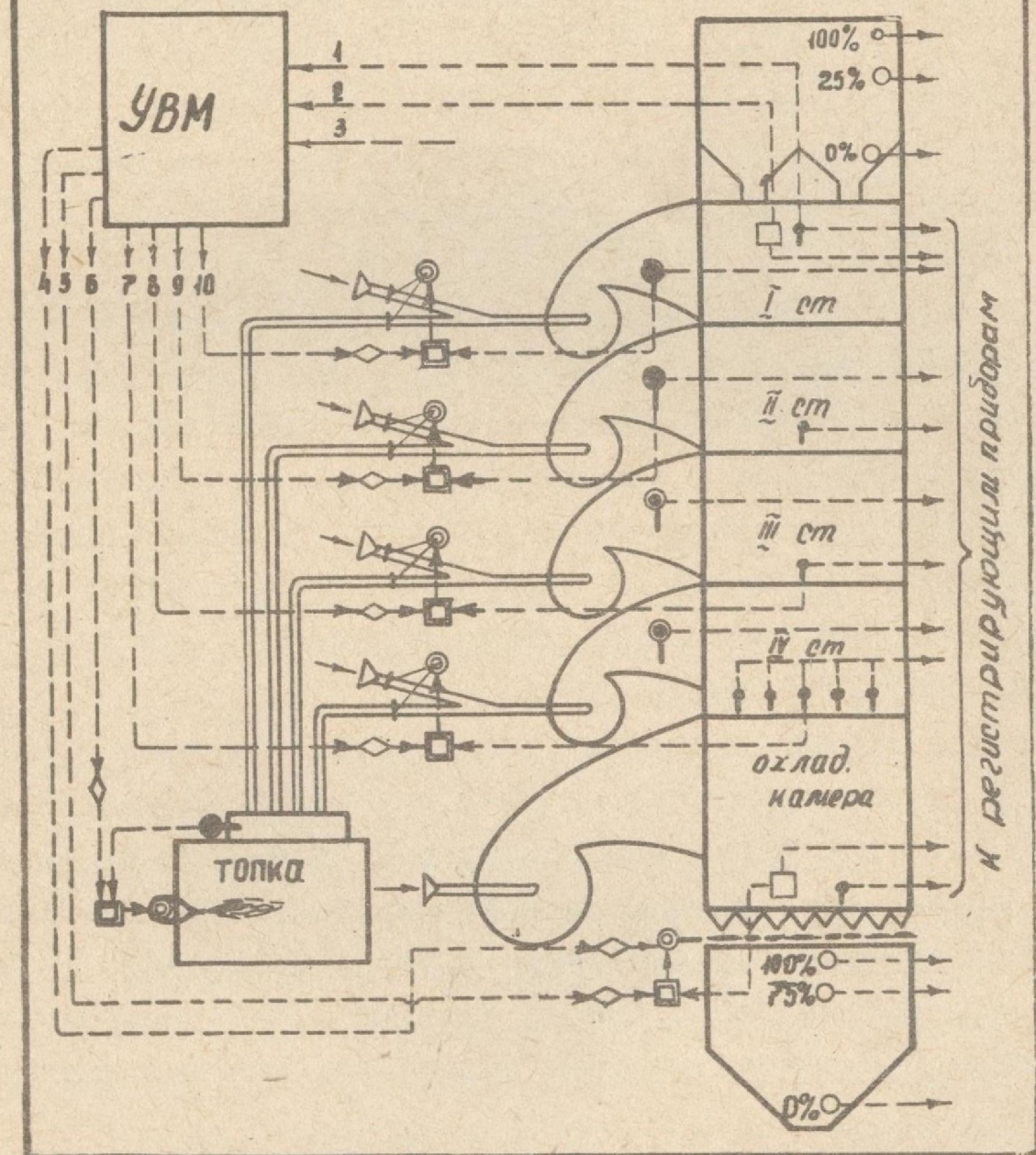


Рис. 6. Структурная схема автоматического регулирования процесса сушки зерна на зерносушилке ДСП-24 в г. Бийске.

Работа сушилки в автоматическом режиме сводится к следующему. В УВМ автоматически вводятся значения входных параметров зерна  $\theta_1$  (1) и  $w_1$  (2) и вручную - исходное качество клейковины (3). УВМ реализует математическую модель процесса сушки и выдает регуляторам значения экспозиции сушки  $\tilde{t}'$  (4), конечной влажности зерна  $w_k$  (5), температуры агента сушки после топки  $t_T$  (6), максимальной температуры нагрева зерна после IУ-й  $\theta_k^{max}$  (7) и III-й  $\theta_4^{max}$  (8) ступеней сушильной камеры и температуры агента сушки на II-й  $t_{II}^{\bar{}}$  (9) и I-й  $t_{I}^{\bar{}}$  (10) ступени. Регуляторы системы автоматического регулирования (САР) поддерживают заданные значения  $\theta_4^{max}$  и  $\theta_k^{max}$  и, следовательно, автоматически устанавливают необходимые температуры агента сушки на III-й и IУ-й ступенях.

В связи с возможностью внесения возмущений в процесс сушки, связанных с колебаниями  $w_1$  и  $\theta_1$ , наличием неравномерности по этим же параметрам в исходной партии зерна, изменением параметров наружного воздуха, погрешностями расчета УВМ и работы регуляторов САР, предусмотрена коррекция влажности зерна на выходе из охладительной камеры путем изменения экспозиции сушки в пределах  $\pm 15\%$  от величины общей экспозиции сушки.

УВМ непрерывно осуществляет поиск оптимального режима, а в случае изменения входной влажности зерна более чем на 2% производит его пересчет и выдает новые задания регуляторам, спустя одну экспозицию сушки при уменьшении  $w_1$  или сразу после пересчета с увеличением  $w_1$ . Таким образом, система САР с УВМ на сушилке ДСП-24 позволяет вести процесс в автоматическом режиме при оптимальных параметрах.

Схемой предусмотрена возможность работы системы без УВМ. В этом случае задание всем регуляторам выдает оператор вручную.

Полная автоматизация процесса согласно структурной схеме (рис.6) осуществлена на сушилке ДСП-24 в г.Бийске, предварительно реконструированной по нашему проекту. Испытания автоматизированной сушилки, проведенные Бийской МИС в 1965, 1966 и 1967 годах, подтвердили высокую эффективность применяемых режимов, соответствие математической модели реальному процессу сушки зерна, а также работоспособность всей системы в целом. В процессе испытаний получено увеличение производительности сушилки на 50-60 % при одновременном снижении удельных затрат топлива и электроэнергии на 20-25 % и полном сохранении качества просушенного зерна.

Межведомственная комиссия приняла автоматизированную сушилку с УВМ в длительную опытно-промышленную эксплуатацию с оценкой „хорошо“.

#### УП. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ШАХТНЫХ ЗЕРНОСУШИЛКАХ

Расчет технико-экономических показателей проведен на основании данных, полученных при испытании автоматизированной сушилки ДСП-24 в г.Бийске в 1966 и 1967 годах в двух вариантах: для сушилки, оснащенной системой автоматического регулирования (САР) с управляющей вычислительной машиной (УВМ), и сушилки, оснащенной САР без УВМ. Последний вариант принят ввиду того, что в некоторых случаях рационально применить систему автоматического регулирования без УВМ, вследствие отсутствия на предприятиях, где установлена сушилка, специалистов по электронной технике. В этом варианте оптимальные режимы устанавливает оператор вручную по табличным данным в зависимости от  $\omega_1$  и  $\theta_1$ . В связи с этим производительность сушилки без УВМ снижена на 8 % и принята на уровне 36 пл.т/час.

Сравнение этих двух вариантов автоматизации сушилки проводили с сушилкой ДСП-24 до реконструкции, в которой

топка переведена на жидкое топливо. При испытании автоматизированной сушилки параллельно был проведен ряд сравнительных экспериментов на нереконструированной сушилке ДСП-24, которые позволили получить основные исходные данные для экономических расчетов.

Основные технико-экономические показатели работы автоматизированной сушилки приведены в табл.3.

Таблица 3

Технико-экономические показатели работы автоматизированной сушилки

Показатели	Един. измерения	З/с ДСП-24 на жидком топливе		
		реконструированная САР и УВМ	реконструированная с САР без УВМ	нереконструированная
1	2	3	4	5
1. Производительность	$\frac{\text{пл.т}}{\text{час}}$	39,1	36,0	24,0
Увеличение производительности	%	62,9	50,0	-
2. Затраты на реконструкцию	тыс.руб.	6,6	6,6	-
САР	" "	15,7	15,7	-
УВМ	" "	10,0	-	-
3. Расход электроэнергии	$\frac{\text{квт.-ч}}{\text{пл.т}}$	1,9	2,0	2,5
Снижение расхода электроэнергии	%	24,7	18,2	-
4. Расход топлива	$\frac{\text{кг усл.топл.}}{\text{пл.т}}$	9,5	10,3	13,2
Снижение расхода топлива	%	28,0	21,7	-

1	2	3	4	5
5. Себестоимость сушки одной пл. тонн коп				
а) средний объем работ		51,9	53,6	63,5
б) большой объем работ		45,2	46,8	57,7
Снижение себестоимости %				
а) средний объем работ		18,5	15,7	-
б) большой объем работ		21,7	18,8	-
6. Годовая экономия руб.				
а) средний объем работ		5610	4420	-
б) большой объем работ		9020	7220	-
7. Срок окупаемости затрат лет				
а) средний объем работ		5,8	5,0	-
б) большой объем работ		3,6	3,1	-

Из таблицы следует, что внедрение системы автоматического регулирования с УВМ экономически оправдано при среднем и большом объеме работ. В этом случае годовая экономия составляет соответственно 5,6 и 9,0 тыс. рублей при сроках окупаемости дополнительных затрат 5,8 и 3,6 года за счет увеличения более чем на 60 % производительности сушилки и снижения примерно на 25 % удельных затрат топлива и электроэнергии.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В связи с автоматизацией шахтных зерносушилок в качестве критерия оптимальности выбрана себестоимость сушки одной плановой тонны (уравнение 2-1). Исходя из этого, сушильная камера представлена в виде ряда элементарных сту-

пеней, для каждой из которых определены оптимальные условия ведения процесса  $\theta_i = \theta_{max}, t_i = t_{max}, t_i^{отпр} = \theta_i, \varphi_i^{отпр} = \varphi_{max}$ , принятые за основу при построении режимов сушки, разработке математической модели процесса и выборе структурной схемы автоматизации сушки.

2. На основании исследования биохимических и технологических изменений, происходящих в зерне при сушке, найдена граница начала денатурации глиаина и „зона укрепления клейковины“, а также установлено, что изменение качественных показателей зерна протекает в две стадии:

1-я стадия - начало укрепления клейковины при отсутствии денатурации глиаина и полном сохранении хлебопекарных качеств зерна; 2-я стадия - дальнейшее укрепление клейковины, сопровождающееся денатурацией глиаина и ухудшением хлебопекарных качеств зерна. Исходя из этого получены границы предельно допустимых температур нагрева продовольственной пшеницы для плотного подвижного (шахтные зерносушки) и кипящего (с осциллирующим режимом) слоев зерна в зависимости от исходного качества клейковины, текущей влажности зерна и длительности процесса (уравнения 1-Ш, 2-Ш, 3-Ш, 5-Ш). Уравнения для расчета  $\theta_{max}$  проверены в производственных условиях и скорректированы с учетом неравномерности нагрева зерна.

3. В результате исследования процесса сушки свежубранного зерна получено уравнение для расчета максимально допустимой температуры агента сушки в зависимости от начальной влажности зерна (уравнение 6-Ш).

4. Обработка результатов исследований процесса сушки зерна в безразмерных координатах  $(dw/dt) : (dw/dt)_{max} = f_1(\tau/\tau_{max})$ ,

$$\begin{aligned} d\theta/d\theta_{max} &= f_2(\tau/\tau_{max}), & \theta - \theta_1 / \theta_{max} - \theta_1 &= f_3(\tau/\tau_{max}), \\ (dD/dt) : (dD/dt)_{max} &= f_4(\tau/\tau_{max}), & D/D_{max} &= f_5(\tau/\tau_{max}) \end{aligned}$$

позволила получить обещенные уравнения для расчета затрат тепла и минимального расхода агента сушки по ходу процесса для ступенчатых нисходящих и восходящих режимов (уравнения 5-1У, 6-1У, 8-1У, 9-1У, 10-1У, 11-1У, 12-1У, 13-1У). В результате определено оптимальное число ступеней сушильной камеры для нисходящего режима (четыре ступени равной высоты). В уравнения для расчета затрат тепла на испарение влаги (5-1У, 6-1У) введен коэффициент  $\psi$ , определяющий величину дополнительных затрат тепла на разрушение связи влаги с материалом и преодоление сопротивления при движении ее к поверхности зерна (уравнение 7-1У).

5. На основании обобщенных зависимостей в безразмерных координатах и баланса тепла получены уравнения, позволяющие рассчитать с точностью до 10 % количество испаренной влаги (уравнение 1-1У) и температуру нагрева зерна (уравнение 11-У) на любом этапе процесса, включая и период прогрева материала.

6. Приближенное решение дифференциального уравнения влагопереноса позволило получить одно общее уравнение сушки (6-У), удовлетворительно описывающее кинетику обезвоживания зерна в плотном подвижном слое на всем протяжении процесса, начиная с периода прогрева материала и кончая периодом убывающей скорости сушки.

7. Получена математическая модель процесса сушки зерна в плотном подвижном слое (уравнения 13-У + 23-У) и разработан алгоритм расчета оптимального режима. Математическая модель реализована при внедрении САР с УВМ на зерносушилке ДСП-24 в г.Бийске. Испытания автоматизированной сушилки подтвердили адекватность модели реальному процессу с максимальной погрешностью порядка 10 %.

8. Разработана математическая модель процесса сушки зерна в кипящем слое с осциллирующим режимом (система уравнений 25-У), решение которой для стационарного состояния осуществлено с использованием метода прямых на ЦВМ

„Промінь”. Погрешность этой модели на основании данных, полученных при испытании полупромышленной установки, находится в пределах 8-12 %.

9. При подготовке сушилок ВТИ-15 в г. Ленинграде, ДСП-12 в г. Киеве и ДСП-24 в г. Бийске к автоматизации разработан ряд мероприятий для устранения основного недостатка шахтных зерносушилок - неравномерности нагрева и сушки зерна. Испытания реконструированных сушилок показали, что неравномерность нагрева и сушки зерна снизилась в несколько раз и находится соответственно в пределах  $\pm 3-5^{\circ}\text{C}$  и 0,4-0,6 % (до реконструкции эти показатели находились на уровне  $\pm 20-30^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 3-4\%$ ).

10. Полная автоматизация процесса сушки с применением УВМ осуществлена на зерносушилке ДСП-24 в г. Бийске. Испытания этой сушилки, проведенные Бийской МИС, показали надежность работы САР и УВМ, а также подтвердили эффективность разработанных режимов. Производительность сушилки увеличилась на 50-60 % при одновременном снижении удельных расходов топлива и электроэнергии на 20-25 % и полном сохранении качественных показателей просушенного зерна. Реконструированная сушилка ДСП-24 с САР и УВМ принята межведомственной комиссией в длительную опытно-промышленную эксплуатацию.

11. Расчет технико-экономической эффективности внедрения оптимальных режимов с САР и УВМ на реконструированной сушилке ДСП-24 в г. Бийске показал, что годовая экономия составляет 5,6 тыс. рублей при среднем объеме работ (1230 часов) и 9,0 тыс. рублей при большом объеме работ (1845 часов) со сроком окупаемости соответственно 5,8 и 3,6 года.

12. Исходя из проведенного исследования, для внедрения в промышленность можно рекомендовать:

а) ступенчатые нисходящие режимы сушки продовольствен-

ного зерна на шахтных зерносушилках, математическую модель процесса (уравнения 13-У + 23-У) и разработанный метод расчета оптимального режима;

б) разработанный объем реконструкции шахтных зерносушилок типа ВТИ и ДСП;

в) систему автоматического регулирования процесса сушки с УВМ для сушилок, установленных при элеваторах с ДАУ, и без УВМ для сушилок, установленных при элеваторах или на хлебоприемных пунктах с частичной автоматизацией.

### ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$w, w_1, w_k, w_p$  - влажность зерна по отношению к сухому веществу соответственно текущая, при входе в сушилку, при выходе из сушильной камеры или сушилки, равновесная, %;  $u, u_0, u_p, u_z$  - влагосодержание материала соответственно текущее, начальное, равновесное, гигроскопическое;  $t$  - температура агента сушки, °С;  $t_r$  - температура сушильного агента после топки;  $v_z, v_b$  - скорость движения соответственно зерна и агента сушки (воздуха), м/сек;  $c_b, c_{ж}, c_z$  - удельная теплоемкость соответственно пара, агента сушки (воздуха), воды и зерна, дж/кг град;  $\alpha_m$  - коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/час;  $L$  - расход агента сушки (воздуха), кг с.в./час;  $\varphi$  - относительная влажность агента сушки (воздуха) в долях единицы;  $\theta$  - температура нагрева материала, °С;  $\tau$  - время;  $p_{нас}, p'_{нас}$  - парциальное давление пара соответственно насыщенного при температуре окружающей среды, насыщенного при температуре поверхности испарения, н/м<sup>2</sup>;  $D$  - влагосодержание агента сушки (воздуха), г/кг с.в.;  $\rho_0$  - удельная теплота парообразования, дж/кг;  $Q$  - расход тепла, Вт;  $b$  - барометрическое давление, н/м<sup>2</sup>;  $\gamma_z, \gamma_b$  - плотность соответственно зерна и агента сушки, кг/м<sup>3</sup>;  $U$  - скорость сушки (количество испаренной влаги), кг исп.вл./час;  $G_1$  - производительность сушилки по сырому зерну, кг/час;  $G_{сух}$  - вес сухого вещества,

кг;  $R$  - радиус зерновки, м;  $z$  - координата вдоль радиуса зерна, м;  $F_0$  - критерий Фурье;  $H, h$  - общая и текущая длина сушильной камеры, м.

Индексы: отр. - отработанный; исп - испарение; н.э. - нагрев зерна; ср - среднее; з - зерно; в - агент сушки (воздух); ж - вода (жидкость); пов - поверхность.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. ПЛАТОНОВ П.Н., ЖИДКО В.И. О допустимых температурах нагрева зерна продовольственной пшеницы при сушке. Труды ОТИ им.Ломоносова, вып.5, 1955.
2. ПЛАТОНОВ П.Н., ЖИДКО В.И. Зависимость производительности зерносушилок от начальной влажности зерна. „Мукомольно-элеваторная промышленность”, № 9, 1955.
3. ГОРБИС З.Р., ЖИДКО В.И. Контроль нагрева зерна в шахтных зерносушилках. „Мукомольно-элеваторная промышленность”, № 8, 1957.
4. ЖИДКО В.И., ЗЕЛИНСКИЙ Г.С. Исследование процесса сушки зерна во взвешенном состоянии. Краткий отчет научно-исследовательских работ, ЦВТИ, М., 1958.
5. ПЛАТОНОВ П.Н., ЖИДКО В.И., ЗЕЛИНСКИЙ Г.С., ЛЕБЕДИНСКИЙ В.Г. К вопросу автоматизации шахтных зерносушилок. „Мукомольно-элеваторная промышленность”, № 10, 1959.
6. ГОРБИС З.Р., ЖИДКО В.И., ЗЕЛИНСКИЙ Г.С. Исследование аэродинамики кипящего слоя зерна. Известия ВУЗов, „Пищевая технология”, № 2, 1959.
7. ГОРБИС З.Р., ЖИДКО В.И., ЛЕМБЕРГ М.А. Дистанционный контроль нагрева зерна в зерносушилках. Автоматизация производственных процессов на элеваторах (обмен опытом), вып.5, ЦЕТИ, Хлебоиздат, М., 1959.
8. ГОРБИС З.Р., ЖИДКО В.И., ЛЕМБЕРГ М.А. Устройство для дистанционного измерения температуры твердых частиц сыпучих продуктов (в частности зерна) непосредственно в нисходящем потоке в шахтных и других сушилках. Изобретение, Авторское свидетельство № 124338, „Бюллетень изобретений”, № 20, 1959.

9. ЖИДКО В.И. О допустимых температурах нагрева пшеницы при сушке в псевдооживленном слое. Известия ВУЗов, "Пищевая технология", № 3, 1959.
10. ЖИДКО В.И. Разработка конструкции сушилки для сушки зерна в кипящем слое. Краткий отчет по теме, ЦВТИ, М., 1960.
11. ЖИДКО В.И. Исследование процесса сушки зерна в "кипящем" слое. Вестник технической информации, ЦВТИ, № 9, 1960.
12. ЖИДКО В.И., ПЛАТОНОВ П.Н. О распределении теплоносителя в шахтных зерносушилках в связи с их автоматизацией. "Вестник технической информации", № 7, ЦВТИ, М., 1960.
13. ЖИДКО В.И., ПЛАТОНОВ П.Н. Эффективность "прогрессивных" режимов сушки зерна. Труды ОТИ им. Ломоносова, вып. X1, 1961.
14. ЖИДКО В.И., ПЛАТОНОВ П.Н. К вопросу о расчете процесса сушки зерна. Труды ОТИ им. Ломоносова, вып. X1, 1961.
15. ПЛАТОНОВ П.Н., ЖИДКО В.И., РЕМЕННЫЙ Л.И. Автоматизация шахтных зерносушилок. Заготиздат, М., 1962.
16. ЖИДКО В.И., Эффективность сушки зерна в кипящем слое. Тепло- и массоперенос, т. 1У, Госэнергоиздат, М.-Л., 1963.
17. ЖИДКО В.И., ПЛАТОНОВ П.Н., МИТРОФАНОВ Ю.Н. Пути комплексной автоматизации процесса сушки зерна. Автоматизация процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве, Машгиз, М., 1963.
18. ЖИДКО В.И. Сушка кукурузы в кипящем слое. "Кукуруза", № 11, 1964.
19. ЖИДКО В.И. Установка для сушки зерновых материалов в кипящем слое. Изобретение, Авторское свидетельство № 160460, Бюллетень изобретений, № 3, 1964.
20. ЖИДКО В.И. Методы повышения эффективности процесса сушки зерна. Сб. "Опыт работы зерносушилок на хлебоприемных предприятиях", ЦИНТИ, М., 1964.
21. ПЛАТОНОВ П.Н., ЖИДКО В.И. Комплексная автоматизация процесса сушения зернистых материалов в шахтных сушилках. Тезисы доклада на Всесоюзном научно-техническом совещании по интенсификации процессов сушки в химичес-

- кой и смежных с нею отраслях промышленности, секция  
Ш"Автоматизация процессов сушки" Москва, октябрь 1965.
22. ЖИДКО В.И. Применение кипящего слоя с механическим побудителем для сушки зерновых культур. Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции по применению кипящего слоя в химической промышленности, изд. "Химия", М.-Л., 1965.
  23. ЖИДКО В.И., КОРЧАК А.С. Эффективность режимов сушки зерна продовольственно-фуражной кукурузы. Известия ВУЗов, "Пищевая технология" № 4, 1965.
  24. ЖИДКО В.И. Сушка зерна в кипящем слое с механическим побудителем. Сб. "Применение кипящего слоя в народном хозяйстве СССР", Цветмет - информация, М., 1965.
  25. ЖИДКО В.И. Способ интенсификации процесса сушки влажных зернистых материалов в кипящем слое с механическим побудителем. Тезисы докладов и сообщений, Секция П, Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов сушки, М., 1965.
  26. ЖИДКО В.И., КОРЧАК А.С. О режимах сушки зерна кукурузы в шахтных зерносушилках. "Мукомольно-элеваторная промышленность", № 8, 1965.
  27. ЖИДКО В.И., ПЛАТОНОВ П.Н., БОМКО А.С., МИТРОФАНОВ Ю.Н. Математическое описание процесса в шахтных зерносушилках. Известия ВУЗов, "Пищевая технология", № 5, 1965.
  28. БОМКО А.С., ЖИДКО В.И. Применение метода прямых к анализу математических моделей объектов с распределенными параметрами. Тезисы докладов на П научно-технической конференции по автоматическому управлению, Институт автоматике, АН Киргизской ССР, Фрунзе, 1966.
  29. ПЛАТОНОВ П.Н., ЖИДКО В.И., МИТРОФАНОВ Ю.Н. Оптимальное управление шахтным зерносушилом как объектом с распределенными параметрами. Тезисы докладов на П научно-технической конференции по автоматическому управлению, Институт автоматике, АН Киргизской ССР, Фрунзе, 1966.
  30. БОМКО А.С., ЖИДКО В.И. Решение системы уравнений тепло- и массопереноса методом прямых. ИФЖ, т.Х1, № 3, 1966.
  31. ЖИДКО В.И., КОРЧАК А.С. Качество зерна при нисходящих режимах сушки. "Кукуруза", № 10, 1963.

32. ЖИДКО В.И. Тепло- и массообмен при сушке зерна в плотном подвижном слое, Сб. "Тепло- и массоперенос", т.У, изд. "Энергия", М.-Л., 1966.
33. КОРЧАК А.С., ЖИДКО В.И. Экономическая эффективность нисходящих режимов сушки зерна. "Кукуруза", № 10, 1967.
34. ЖИДКО В.И., ГОРОДЕЦКИЙ А.Э. Автоматическое регулирование температуры нагрева зерна в шахтной зерносушилке. Автоматизация производственных процессов на предприятиях по хранению и переработке зерна, ЦИНТИ, М., 1967.
35. КОРЧАК А.С., ЖИДКО В.И. О нисходящих ступенчатых режимах сушки зерна продовольственно-фуражной кукурузы. Известия ВУЗов, "Пищевая технология", № 1, 1968.
36. ЖИДКО В.И., КАЛАНДАДЗЕ Г.Ш. Математическое описание и управляющая вычислительная машина для сушки зерна. Известия ВУЗов, "Пищевая технология", № 6, 1968.
37. ЖИДКО В.И. Рациональное распределение тепла и сушильного агента при сушке зерна. Известия ВУЗов, "Пищевая технология", № 3, 1969.
38. ЖИДКО В.И., БОМКО А.С. Моделирование производственного процесса сушки зерна в плотном и кипящем слоях. Тезисы докладов на научной конференции по теории и технике сушки зерна, ВНИИЗ, М., 1969.
39. ЖИДКО В.И. Математическая модель процесса в связи с автоматизацией зерносушилок с применением ЭВМ. Материалы докладов Всесоюзного научно-технического совещания по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки, секция 1У, "Автоматизация сушильных установок", М., декабрь 1969.
40. ЖИДКО В.И., БОМКО А.С. Моделирование процесса сушки зерна в потоке. Известия ВУЗов, "Пищевая технология", № 5, 1969.
41. ЖИДКО В.И., КОРЧАК А.С. Исследование режимов сушки зерна продовольственно-фуражной кукурузы. Тезисы докладов на научной конференции по технике сушки зерна, ВНИИЗ, М., 1969.
42. ЖИДКО В.И., ПЛАТОНОВ П.Н. Шахтная сушилка для зернистых материалов. Положительное решение Комитета по изобретениям о выдаче авторского свидетельства ст 7/1-1970 года по заявке № 1314620/24-6.

По материалам диссертации сделаны доклады:

1. На Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену, Минск, июнь 1961.
2. На научно-техническом совещании по автоматизации процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве, Москва, май 1962.
3. На семинаре по автоматизации производственных процессов на хлебоприемных пунктах и предприятиях по переработке зерна, Москва, май, 1963.
4. На Всесоюзном семинаре по применению кипящего слоя в народном хозяйстве СССР, Москва, ВДНХ, сентябрь-октябрь 1963.
5. На совещании по обобщению опыта эксплуатации зерносушилок и повышению эффективности их работы, Целиноград, декабрь 1963.
6. На Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену, Минск, 1964.
7. На научно-технической конференции по применению кипящего слоя в химической промышленности, Ленинград, март 1965.
8. На Всесоюзном научно-техническом совещании по интенсификации процессов сушки в химической и смежных с нею отраслях промышленности, Москва, октябрь 1965.
9. На II научно-технической конференции по автоматическому управлению, Фрунзе, май 1966.
10. На Всесоюзной научной конференции по теории и технике сушки зерна, Москва, апрель 1969.
11. На Всесоюзно-техническом совещании по новой технике и прогрессивной технологии в процессах сушки, Москва, декабрь 1969.
12. На XXIII-XXX научных конференциях ОТИ им.М.В.Ломоносова.