

Авторефер.

А 45

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М.В.Ломоносова

---

Инженер АЛЕЙНИКОВ В.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА  
РЕЖИМОВ СУШКИ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ С  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ

05,375. Хранение зерна (элеваторно-складское хозяйство)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1969

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М.В.Ломоносова

Инженер АЛЕЙНИКОВ В.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА  
РЕЖИМОВ СУШКИ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ С  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ

Переучет 1984 г.

05.375. Хранение зерна (элеваторно-складское хозяйство)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

~~с.д. 1721~~ V001721

~~Одесский технологический  
институт  
имени М.В.Ломоносова  
Библиотека~~

Одесса - 1969

ОНАХТ  
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена на кафедре элеваторно-складского хозяйства Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель - кандидат технических наук, В.И.ЖИДКО

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор П.Н.ПЛАТОНОВ  
кандидат технических наук В.П.ДУБРОВСКИЙ

Ведущее предприятие - Казахский филиал ВНИИЗа.

Автореферат разослан 26 авг. 1969 г.

Защита состоится 26 сент. 1969 г.  
на заседании Совета Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова.

Просим Вас принять участие в заседании Совета, посвященного защите диссертации, или выслать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, по адресу: г.Одесса-39, ул.Свердлова, 112. Технологический институт имени М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

## ВВЕДЕНИЕ

В системе послеуборочной обработки и хранения важнейшей сельскохозяйственной продукции - зерна пшеницы - одним из основных звеньев является искусственная сушка, своевременность и качество проведения которой обуславливают стойкость зерна при хранении, сокращение потерь сухих веществ, семенные свойства, хлебопекарные качества и другие показатели.

В нашей стране - самое мощное зерносушильное хозяйство в мире. На 1-ое ноября 1968 г. производительность зерносушилок в системе заготовок составляла 75 млн.пл.т./месяц, а к 1971 г. предусмотрено довести ее до 107 млн.пл.т./месяц. Однако, дефицит зерносушильной мощности к концу текущей пятилетки предполагается все еще значительным.

Современным требованиям поточной и высокопроизводительной обработки зерна на хлебоприемных пунктах наиболее полно удовлетворяют широко внедряемые в последние годы рециркуляционные зерносушилки, но вследствие развития зерносушильной базы страны в течение 40 лет путем строительства в основном шахтных сушилок, их удельный вес составляет в настоящее время более 95% и за ними сохранится преобладающая роль в следующем /1971-80 гг./ десятилетии. Поэтому перспективное развитие зерносушильного хозяйства в системе заготовок намечено осуществить преимущественно за счет строительства рециркуляционных и реконструкции существующих шахтных зерносушилок.

В связи с развитым в стране парком сушилок шахтного типа важное народохозяйственное значение имеет увеличение их объемного влагонапряжения, повышение гарантии сохранения качества зерна при сушке, снижение удельных энергетических затрат и создание режимов, удовлетворяющих требованиям поточной обработки высоковлажного зерна.

Проводившаяся ранее интенсификация процесса сушки в плотном зерновом слое за счет повышения парамет-

ров агента сушки в основном исчерпала свои возможности, так как даже предусмотренные действующей инструкцией режимы, как установлено во ВНИИЗе, являются "жесткими" для свежееубранного зерна пшеницы.

На основании установленных зависимостей от температуры зерна для физических величин, определяющих интенсивности внутреннего влагопереноса и внешнего влагообмена (работы А.В.Лыкова, В.И.Полова, А.С.Гинзбурга, В.П.Дубровского, С.Д.Птицына, И.Л.Любошица, Х.А.Беккера, Х.Р.Салланса, Г.Гофмана и др.) одним из путей дальнейшего совершенствования шахтных зерносушилок является повышение температуры зерна перед сушкой.

Настоящее исследование посвящено изучению процесса сушки зерна пшеницы с предварительным подогревом.

#### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сушка зерна в нашей стране и за рубежом осуществляется преимущественно конвективным способом в плотном малоподвижном слое шахтных зерносушилок. Широкое распространение зерносушилок шахтного типа объясняется рядом их достоинств — таких как простота конструкции и надежность в эксплуатации, относительно низкие удельные капитальные и эксплуатационные расходы, возможность применения для любых зерновых культур и в широком диапазоне производительностей, возможность автоматизации.

В то же время шахтные зерносушилки обладают рядом существенных недостатков, которые состоят в относительно низком и не всегда достаточном снижении влажности зерна за один проход, что осложняет их применение в поточных линиях; неравномерности нагрева и сушки зерна по сечению шахты, в результате чего возможно ухудшение его продовольственных и семенных свойств; в необходимости перед сушкой очистки зерна и подразделения на партии по влажности.

Многолетние изыскания путей совершенствования шахтных зерносушилок привели к сокращению некоторых из отмеченных недостатков. Во ВНИИЗе, МТИППе, ВИМе, в ОТИ имени М.В.Ломоносова и других научных учреждениях определены оптимальные значения ряда технологических и конструктивных параметров, такие как скорость агента сушки, толщина продуваемого слоя, форма и расположение коробов. Разработаны рекомендации по устранению неравномерности движения, нагрева и влажности зерна по сечению шахты, предложены новые методы и режимы сушки и охлаждения зерна.

В настоящее время для шахтных зерносушилок действующей инструкцией предусмотрены одноступенчатые (обычные), ступенчатые и дифференцированные режимы сушки зерна пшеницы продовольственного назначения. При этих режимах температура агента сушки назначается от 363 до 433°K (в зависимости от влажности зерна, а при дифференцированных режимах и от качества его клейковины), которая ступенчато увеличивается в направлении движения зерна в шахте. Вследствие принятого восходящего изменения температуры агента сушки зерно медленно нагревается в шахте и его температура достигает допустимой только в конце сушильной зоны. Восходящие ступенчатые и дифференцированные режимы обосновывались авторами (М.А.Скороваров, Н.И.Соседов, А.П.Гержой) необходимостью постепенного прогрева зерна в процессе сушки во избежание пересыхания оболочки и образования "закала".

В результате исследований И.И.Ленарского, П.Н.Платонова и Л.Н.Любарского были рекомендованы режимы, в основу построения которых положена зависимость биохимических изменений при нагревании зерна в процессе сушки от влажности и продолжительности термического воздействия. В предложенных режимах предусматривалось повышение нагрева зерна по мере снижения его влажности в соответствии с границей "условно-безопасных" температур. Так, в разработанном Л.Н.Любарским режиме после достижения зерном 323°K дальнейшее этапное повышение его температуры в шахте до 343°K позволяет увеличить влагосъем при сушке на 55-79%.

С целью повышения производительности и экономичности шахтных зерносушилок П.Н.Платоновым и В.И.Жидко разработаны нисходящие („прогрессивные“) режимы, при которых зерно нагревается до  $308-313^{\circ}\text{K}$  в конце 1/4 высоты сушильной зоны. В эту зону, названную зоной прогрева, подается агент сушки при температуре  $433-453^{\circ}\text{K}$ . Авторами экспериментально установлено, что после быстрого прогрева зерна в верхней зоне изменение его температуры, в соответствии с допустимой, достигается при снижении интенсивности подводимого теплового потока, что при нисходящих режимах осуществляется за счет уменьшения температуры агента сушки по ходу процесса до  $393-413^{\circ}\text{K}$ . Специально поставленными экспериментами „закал“ зерна при этих режимах не обнаружен.

Производственная проверка нисходящих режимов подтвердила их целесообразность, но повышение температуры зерна по мере уменьшения его влажности (в соответствии с граничной кривой нагрева) осложнено несовершенством конструкции шахтных зерносушилок.

Уменьшение количества подводимого к зерну тепла в направлении его движения в шахте достигается в некоторых отечественных и зарубежных зерносушилках также за счет изменения скорости агента сушки и толщины продуваемого слоя по высоте шахты. Нисходящее распределение тепла позволяет сократить продолжительность нагрева зерна и более полно соответствует потребности в тепловой энергии в процессе его сушки в связи с падающей интенсивностью испарения влаги по высоте шахты.

Платоновым П.Н. и Атаназевичем В.И. для шахтных сушилок разработан импульсный метод сушки, основанный на чередовании нагрева и охлаждения либо отлежки зерна, что позволило увеличить температуру агента сушки до  $433-503^{\circ}\text{K}$ . Импульсный режим интенсифицирует процесс, так как позволяет увеличить количество подводимого тепла в шахту и ускорить нагрев зерна в соответствии с допустимой температурой, а также использовать положительное влияние термовлагопроводности.

На основании имеющихся данных о повышении питательной ценности зерна при сохранении его семенных

свойств в решении конференции по теории и технике сушки зерна (Москва, 1969 г.) рекомендовано оценивать качество зерна после сушки, как семенного так и продовольственного, по всхожести. В настоящее время в нашей стране наметилась тенденция более строгого обоснования режимов обработки пищевого сырья для гарантированного сохранения его нативных свойств.

При проверке в 1967-68 гг. инструкционных режимов в шахтных зерносушилках ВНИИЗом установлено, что они завышены для свежесобранного зерна пшеницы, на основании чего предложены пониженные режимы сушки, которые наиболее полно отвечают требованиям сохранности исходных продовольственных свойств зерна. При пониженных режимах уменьшается производительность сушилок на 20% и увеличиваются удельные затраты тепла и электроэнергии. Однако, учитывая первостепенную важность сохранения питательной ценности зерна, эти режимы с 1968г. приняты к внедрению Министерством хлебопродуктов РСФСР на тех пунктах, где имеется резерв зерносушильной мощности.

Как следует из приведенного обзора, интенсификация процесса в шахтных зерносушилках в большинстве случаев увязывалась с возможностью увеличить время пребывания зерна в шахте при повышенной температуре его нагрева, что достигалось в основном за счет увеличения температуры агента сушки. При всех рассмотренных режимах зерно нагревалось до температуры, близкой к допустимой, только после прохождения значительной части сушильной зоны.

Таким образом, на основании экспериментальных данных о существенном влиянии температуры материала на интенсивность его влагоотдачи резервом для дальнейшей интенсификации процесса в шахтных зерносушилках является разработка таких режимов, при которых температура зерна поддерживается на максимально целесообразном уровне от начала и до конца процесса сушки. Такие условия могут быть выполнены при методе сушки с предварительным подогревом зерна, изучению которого посвящена настоящая работа.

Ниже приводятся теоретические предпосылки исследования.

Тепловая сушка влажных материалов, в частности зерна, в современном представлении рассматривается как совокупность процессов переноса тепла и влаги, протекающих одновременно и взаимно влияющих друг на друга. В процессе сушки происходит перераспределение тепловой энергии и влаги внутри материала — внутренний тепло- и массоперенос, а также обмен тепловой энергией и массой между материалом и взаимодействующей с ним средой — внешний тепло- и массообмен. Феноменологический закон переноса энергии и вещества математически описывается линейным уравнением:

$$j = L \cdot X \quad (1)$$

где  $L$  — плотность потока  
 $X$  — движущая сила процесса  
 $L$  — кинетический коэффициент, зависящий от физико-химических свойств материала.

Из приведенного уравнения видно, что интенсификация процесса тепло- и влагообмена при сушке должна идти по двум главным направлениям — путем повышения потенциалов переноса ( $X$ ) и изменения свойств материала ( $L$ ) с целью повышения его теплопроводящей и влагообменной способности.

А.В.Лыков применил для переноса массы в процессах внешнего влагообмена уравнение, аналогичное уравнению переноса тепла:

$$q_m = \beta (P_m - P_{cp}) \quad (2)$$

В этом уравнении движущей силой переноса является разность парциальных давлений пара на поверхности материала ( $P_m$ ) и в среде ( $P_{cp}$ ), а массообменные свойства взаимодействующих сред характеризуются коэффициентом внешнего влагообмена ( $\beta$ ). Для парциального давления пара на поверхности зерна пшеницы установлены следующие эмпирические зависимости:

$$\text{Уравнение С.Д.Птицына} - P_m = A \cdot \theta^2 + B \cdot \theta + C \quad (3)$$

где коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  зависят в основном от влажности зерна.

$$\begin{aligned} \text{Уравнение В.И.Жидко} & - P_m = 2,94(1,67 + 0,0052 \cdot W_n)^{0,1 \cdot \theta} + 6(4) \\ \text{Уравнение Г.офмана} & - P_m = P - a(W_p - W) \quad (5) \end{aligned}$$

где  $P$  — давление пара над поверхностью воды при данной температуре ;

$a$  — коэффициент, зависящий от температуры зерна.

Таким образом, парциальное давление пара зерна  $P_m$  зависит от его температуры и влажности. Так как в практике зерносушения влажность материала является заданным параметром, из приведенных уравнений (2-5) следует, что повышение парциального давления пара  $P_m$ , а следовательно, интенсивности внешнего влагообмена в процессе сушки зерна может быть достигнуто путем увеличения его температуры.

Для суммарного потока влаги внутри тела в процессе его сушки А.В.Лыков получил следующее уравнение:

$$q_m = -a_m \rho (\Delta u + \delta \cdot \Delta \theta) \quad (6)$$

Зависимости для коэффициента диффузии влаги ( $a_m$ ) и термоградиентного коэффициента ( $\delta$ ) от влагосодержания имеют сложный характер с наличием максимума и определяются преобладающей формой связи удаляемой влаги.

В интервале распространенной на практике влажности зерна пшеницы скорость его сушки определяется прежде всего значением коэффициента внутренней диффузии влаги —  $a_m$ , вследствие значительного сопротивления скелета тела внутреннему влагопереносу.

В исследованиях В.И.Полова, А.С.Гинзбурга, В.П.Дубровского, Я.М.Миниовича, Х.А.Беккера, Х.Р.Салланса и др. установлена резкая степенная зависимость коэффициента диффузии влаги зерна от его температуры, которая в общем виде выражается формулой:

$$a_m = a_{m_0} \left( \frac{T}{293} \right)^n \quad (7)$$

где  $a_{m_0}$  — коэффициент диффузии влаги при  $T = 293^\circ \text{K}$ ;  
 $n$  — показатель степени, изменяющийся в зависимости от влажности зерна от 8 до 18.

А.С.Гинзбургом и В.П. Дубровским получено уравнение для коэффициента диффузии влаги  $a_m$  зерна пшеницы в интервале влагосодержания  $U = 0,324-0,36$  кг влаги/ кг сухого вещества

$$a_m = (0,147 + 0,55 \cdot U) \left( \frac{T}{193} \right)^K \cdot 10^{-9} \quad (8)$$

где  $K = 11,72 + 16,5 \cdot U$

Х.А.Беккер и Х.Р.Салланс для пшеницы влажностью 10,3-12,3% получили зависимость для коэффициента диффузии влаги  $a_m$  от температуры вида:

$$a_m = a_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot \theta}} \quad (9)$$

где  $E$  - энергия активирования.

Значительное повышение внутренней теплопроводности зерна пшеницы с ростом его температуры наблюдается при кондиционировании. Так, И.А.Наумовым установлено, что скорость проникновения влаги в эндосперме зерна при его температуре 311-313°K вдвое больше, чем при 296-298°K и в 6-8 раз больше, чем при температуре 277-279°K.

Как следует из эмпирической зависимости, полученной Л.Д.Комышником

$$\Delta W = A \cdot e_n \left[ \theta^{1,3} \left( \frac{W_1 - W_2}{100} \right)^{0,3} \right] \quad (10)$$

преобладающее влияние на снижение влажности зерна ( $\Delta W$ ) за один цикл в рециркуляционной зерносушилке оказывает температура его нагрева -  $\theta$ .

Таким образом, на основании имеющихся теоретических данных интенсивности внутреннего влагопереноса и внешнего влагообмена при сушке зерна пшеницы могут быть существенно повышены за счет его предварительного подогрева и применения режимов, при которых обеспечивается наибольшая безопасная температура зерна на протяжении всего процесса. Поэтому можно предположить, что применение метода сушки зерна с предварительным подогревом позволит достигнуть увеличения производительности шахтных зерносушилок даже при более "мягких" температурных режимах, чем действующие.

Несмотря на то, что некоторые зарубежные фирмы („Миаг“, „Боби“, „Олдерслей“ и др.) выпускают зерносушилки с камерами для предварительного подогрева зерна, в настоящее время отсутствуют данные об особенностях тепло- и влагообмена при этом методе, эффективности его применения и влиянии на качественные показатели зерна, а также по обоснованию режимных параметров сушки и способа предварительного подогрева зерна.

На основании изложенного с целью повышения интенсивности влагосъема в шахтных зерносушилках при более „мягких“ режимах, чем действующие, в настоящей работе поставлены следующие задачи исследования:

- Изучить влияние предварительного подогрева зерна пшеницы на характер изменения его влажности и температуры в процессе конвективной сушки в плотном слое.
- Экспериментально определить эффективность применения предварительного подогрева зерна перед сушкой в зависимости от основных параметров зерна и агента сушки.
- Разработать методику построения режимов сушки зерна с предварительным подогревом.
- Обосновать способ предварительного подогрева зерна перед сушкой с учетом особенностей распространенных в нашей стране шахтных зерносушилок.
- Разработать конструктивное решение по реконструкции шахтной зерносушилки при переводе ее на метод сушки с предварительным подогревом зерна.
- Проверить в производственных условиях эффективность применения метода сушки зерна с предварительным подогревом при рекомендованном режиме сушки и способе подогрева и наметить пути рационального внедрения метода в широких масштабах.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

В качестве материала для исследования во всех опытах принята торговая пшеница ОД-16 урожая 1966 г. с содержанием сырой клейковины 24,8% при ее удельной растяжимости 0,76 см/мин.

Для сравнения характера распределения влажности и температуры зерна по толщине слоя при его сушке с предварительным подогревом и без подогрева методикой предусматривалось проведение опытов в неподвижном слое толщиной 0,1 м, разделенном на 5 одинаковых элементарных. Опыты проведены на лабораторной установке, состоящей из вентилятора, электрического калорифера, электромагнитного стола, съемной сушильной камеры с выдвижными кассетами, потенциометров и термостата.

Зерно пшеницы, увлажненное до 35,9% - 44,7% (здесь и в дальнейшем влажность зерна принята по отношению к сухому весу) после трехсуточной отлежки, распределяли в 5 кассет высотой по 0,02 м с сетчатым дном. На медно-константановые термопары нализывали зерна, затем кассеты герметизировали и помещали в термостат для нагрева. После подогрева зерна до 320-321°K кассеты распаковывали и вставляли в сушильную камеру, которая в рабочем положении устанавливалась на электромагнитный стол сушильной установки. Температура агента сушки принималась в опытах 373 и 423°K, скорость - 0,5 м/сек. При аналогичных условиях проведены опыты с зерном без подогрева при его температуре 292 и 294°K. В процессе нагрева и сушки потенциометром ЭПП-09 М записывались температура агента сушки и зерна в элементарных слоях. Для расчета влажности зерна определялось изменение его веса в каждой кассете после 300 секунд продувки слоя.

Основные серии опытов по изучению закономерностей и определению режимов сушки зерна с предварительным подогревом, а также по обоснованию способа его нагрева проведены при условиях, приближенных к производственным при сушке в шахтных зерносушилках с диагональным расположением коробов и периодически действующим выпускным затвором.

Выбору исследуемого слоя предшествовало обоснование оптимального хода зернового слоя за время его выпуска из шахты, который для зерносушилок типа ВТИ и ДСП установлен равным половине шага коробов по вертикали. В качестве исследуемого принят условно выделенный в шахтной зерносушилке зерновой слой, равный по

высоте его оптимальному ходу при выпуске зерна, а по толщине - половине толщины продуваемого слоя. Вторая половина продуваемого слоя используется в опытах в качестве вспомогательного для изменения в процессе сушки температуры и влажности агента сушки перед исследуемым слоем. Изменения направлений продувки исследуемого слоя и состояний агента сушки (свежий либо отработанный - после продувки прилегающего полуслоя) в методике настоящего исследования и в экспериментальной установке приняты соответственно условиям, имеющим место в шахтной зерносушилке.

Лабораторные исследования проведены на экспериментальной установке (рис.1), состоящей из вентилятора ВВД-3 (1), тарельчатого клапана (2) на всасывающем воздуховоде, электрического калорифера (6), электромагнитного стола (10) и сушильной камеры (12), состоящей из двух шахт, расположенных параллельно и соединенных между собой сверху трубопроводом. Снизу каждая шахта имеет плавающий фланец (13), прижатием которых к электромагнитному столу (10) достигается плотность соединения с трубопроводом (7) нагретого воздуха. Одна из шахт имеет люк (18) с быстродействующими эксцентриковыми запорами (19) для установки в нее кассеты (17) высотой 0,125 м с сетчатым дном. В кассете (17) полный зерновой слой условно разделяется на исследуемый (нижний полуслой) и вспомогательный. Для предварительного нагрева зерна без испарения влаги применены герметически закрываемые кассеты (31), которые помещались в водяную ванну (35) с трубчатыми электронагревателями (36), а для конвективного нагрева - съемная камера (37) с плавающим фланцем (40), которая устанавливалась на электромагнитный стол (10). Температура зерна  $\theta_n = 283$  и  $298^\circ\text{K}$  достигалась в кассетах (31), помещенных в термостат (42) либо в холодильник (43).

Продолжительность цикла продувки устанавливали на реле времени РВ-52 (28). Температура зерна измерялась в исследуемом полуслое при помощи медно-константановых термопар, заделанных в зерно, с непрерывной записью потенциометрами типа ЭПП-09М (20); температура агента сушки поддерживалась на заданном уровне ре-

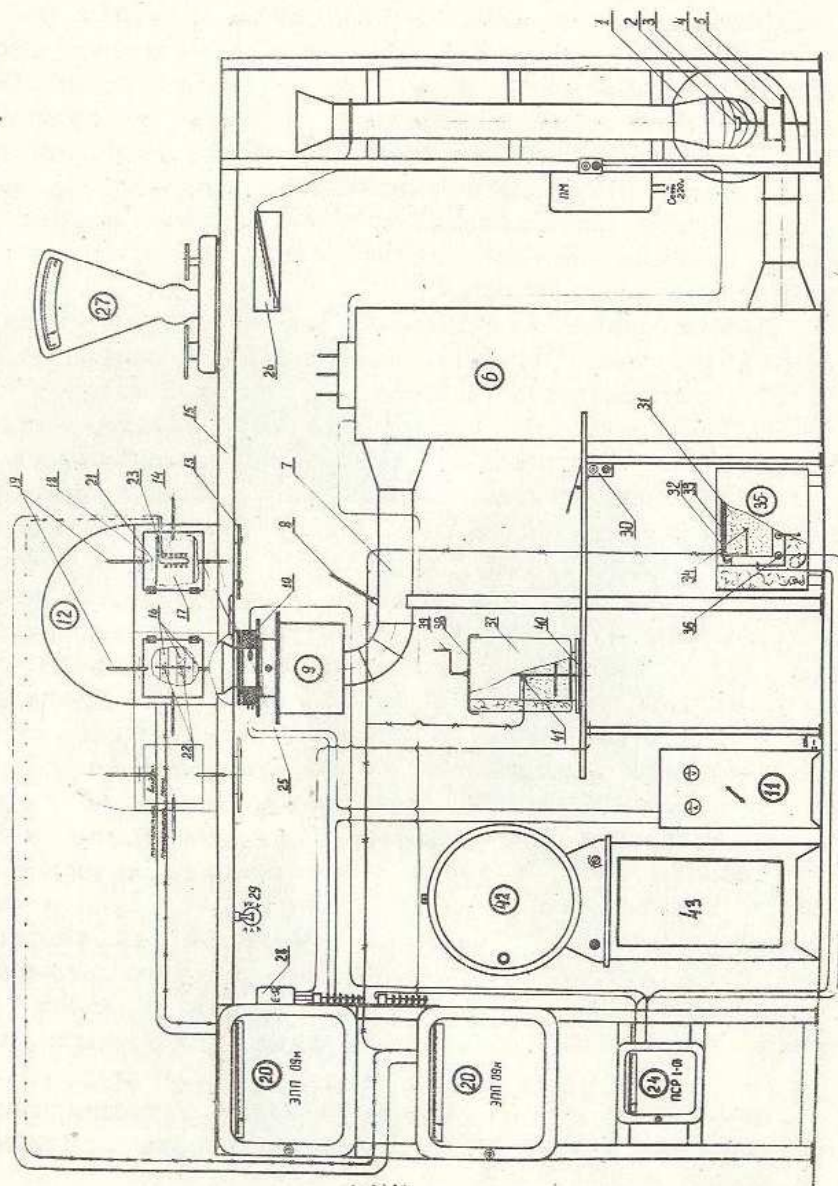


Рис.1.

гулирующим потенциометром ПРС-1-01 (24); взвешивание зерна производили на циферблатных весах (27) со шкалой 200 г. Термодары для измерения температуры агента сушки устанавливали с обеих сторон полного зернового слоя, а для измерения температуры зерна в исследуемом полуслое закрепляли на каркас (23) в 4-х сечениях на расстоянии 0,005 м, 0,015 м, 0,03 м и 0,045 м от сетчатого дна кассеты (17). Средней температуре зернового слоя с погрешностью не более 8% соответствует среднеарифметическое от показаний термодар расположенных во 2-м и 3-м сечениях слоя.

Опыты проводили в следующем порядке: увлажненное зерно после трехсуточной отлежки засыпали в кассеты (31), в которых достигалась заданная температура, после чего пересыпали в кассету (17).

В нейтральном положении сушильной камеры (12) в нее устанавливали кассету с зерном (17) и камера располагалась фланцем одной из шахт над электромагнитным столом (10). Педальной кнопкой (30) одновременно включались реле времени, электромагнитный стол и ход диаграммной ленты потенциометров. После заданного цикла реле отключало электромагнитный стол и камера вновь перемещалась в нейтральное положение для взвешивания кассеты, а затем устанавливалась над электромагнитным столом фланцем второй шахты, т.е. направление продувки менялось на противоположное. Аналогичные циклы повторялись до заданного снижения влажности зерна.

При конвективном подогреве зерна в камере (37) сразу же после нагрева взвешиванием определялась убыль влаги за время кипения, затем в кассету (17) переставляли каркас (23) с термодарами и в нее пересыпалось зерно до принятого веса. Перед сушкой зерно в кассете (17) проходило отлежку при герметических условиях.

В опытах непосредственно измерялись температура зернового слоя и убыль влаги в нем, температура и скорость агента сушки, температура в аппаратах для термической подготовки зерна и продолжительность отдельных процессов.

Анализы по определению влажности зерна, а также содержания и удельной растяжимости клейковины проводили до и после подогрева и сушки зерна по стандартной методике.

В основных сериях опытов приняты следующие значения переменных и постоянных параметров зерна и агента сушки:

начальная влажность зерна -  $W_n^c = 18, 21, 27, 33, 38\%$ ;  
 начальная температура зерна -  $\theta_n = 283, 298, 313, 323, 331^\circ\text{K}$ ;

температура агента сушки -  $T_g = 305, 338, 368, 403^\circ\text{K}$ ;  
 скорость агента сушки перед слоем -  $V_g = 0,45$  м/сек;  
 толщина продуваемого слоя -  $h = 0,1$  м.

Цикл продувки, соответствующий времени между срабатываниями выпускного затвора, принят равным 2 минутам.

Для сопоставления характера изменения влажности и температуры зерна при его сушке с предварительным подогревом и без подогрева проведено пять серий сравнительных опытов во всем принятом диапазоне влажности зерна  $W_n^c = 18 - 38\%$  при трех значениях начальной температуры зерна  $\theta_n = 283, 298, 323^\circ\text{K}$  и температуры агента сушки -  $T_g = 338, 368$  и  $403^\circ\text{K}$ .

Для определения эффективности сушки зерна с предварительным подогревом был введен коэффициент „К“, равный процентному отношению средних скоростей сушки при  $\theta_n = 323, 298$  и  $283^\circ\text{K}$ .

$$K_1 = \frac{\Delta W}{\tau_{323}} : \frac{\Delta W}{\tau_{283}} \cdot 100\% = \frac{\tau_{283}}{\tau_{323}} \cdot 100\% \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{\Delta W}{\tau_{323}} : \frac{\Delta W}{\tau_{298}} \cdot 100\% = \frac{\tau_{298}}{\tau_{323}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Результаты опытов обрабатывались в виде графических зависимостей:

$$W^c = f(\tau); \quad \theta = f(\tau); \quad \theta_k = f(W_n^c);$$

$$\frac{dW^c}{d\tau} = f(W^c); \quad \Delta\theta = f(W_n^c)$$

При построении режимов сушки зерна пшеницы с предварительным подогревом принято условие постоянства его начальной температуры на протяжении всего процесса сушки. Температура нагрева зерна принимается равной до-

пустимой, установленной для шахтных зерносушилок с учетом назначения и исходного качества клейковины. При этих условиях из уравнения баланса тепла получена следующая зависимость для температуры агента сушки:

$$T_g = 2490 \cdot \frac{1}{100 + W^c} \cdot \frac{G_3}{G_g} \cdot \frac{dW^c}{d\tau} + \theta_n \quad (13)$$

Для экспериментального определения режимов сушки зерна с предварительным подогревом методом подбора находили такие значения температуры агента сушки, при которых температура зерна, предварительно нагретого до  $323^\circ\text{K}$ , в процессе сушки остается практически постоянной. Результаты опытов обрабатывали в виде графических зависимостей:

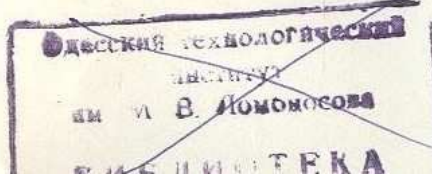
$$W^c = f(\tau); \quad \frac{dW^c}{d\tau} \text{ ср.} = f(\theta_n); \quad \theta = f(\tau)$$

В сериях опытов по обоснованию метода предварительного подогрева зерна перед сушкой сравнивались интенсивности изменения влажности и температуры зерна, нагретого до  $323^\circ\text{K}$  без испарения влаги и с одновременным испарением влаги. В последнем случае зерно перед сушкой проходило отлежку при оптимальной продолжительности, которая устанавливалась специальными опытами.

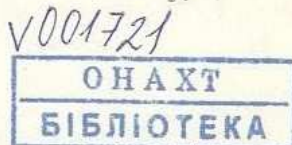
С целью производственной проверки результатов лабораторных исследований предусмотрено внедрение метода сушки зерна с предварительным подогревом и проведение производственных испытаний.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СУШКИ ЗЕРНА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ

В опытах по сушке в неподвижном зерновом слое, разделенном на элементарные, установлено существенное влияние начальной температуры зерна на характер распределения его влажности и температуры по толщине слоя.



с.в. 1721



При продувке слоя в течение 300 сек агентом сушки при температуре 373 и 423°K в предварительно нагретом зерне (320-321°K) снижение влажности происходит во всем слое. В неподогретом зерне (292-294°K) влага удаляется только со стороны ввода агента сушки с резким падением интенсивности влагосъема по толщине слоя, а со стороны выхода агента сушки (в двух последних элементарных слоях) происходило увлажнение зерна. За рассматриваемый период сушки из предварительно нагретого зерна испарялось на 19-85% влаги больше, чем из неподогретого.

Температура предварительно нагретого зерна снижается по всей толщине слоя с самого начала процесса, причем, продолжительность и степень снижения увеличиваются по мере удаления элементарных слоев от ввода агента сушки в слой. При сушке зерна без подогрева его температура непрерывно повышается по всей толщине слоя.

В основных сериях опытов при иммитированном подвижном слое влажность зерна снижалась до принятой на практике в конце горячей зоны в шахтных сушилках — 16-17%. Как следует из анализа сравнительных опытов, при сушке предварительно нагретого зерна (323°K) во всем рассматриваемом диапазоне влажности (18-38%) и температуры агента сушки (338-403°K) наблюдается резкое превышение скорости сушки в начале процесса (особенно в первые 4-6 минут продувки слоя) над соответствующей скоростью неподогретого зерна (283-298°K). В этот период сушки зерна с предварительным подогревом снижение его влажности до заданной (16-17%) составляет от 20 до 100%, а при сушке зерна без предварительного подогрева — не более 25%. При дальнейшем течении процесса (после 6-8 минут) разница в интенсивностях влагоотдачи зерна с различной начальной температурой начинает сглаживаться и кривые сушки, соответствующие одной и той же температуре агента сушки, становятся примерно параллельными, что иллюстрируется графиком при  $W_n^c = 27\%$

(рис.2) Для принятых условий опытов во всем диапазоне начальной влажности зерна и температуры агента сушки не установлены периоды выраженной постоянной скорости

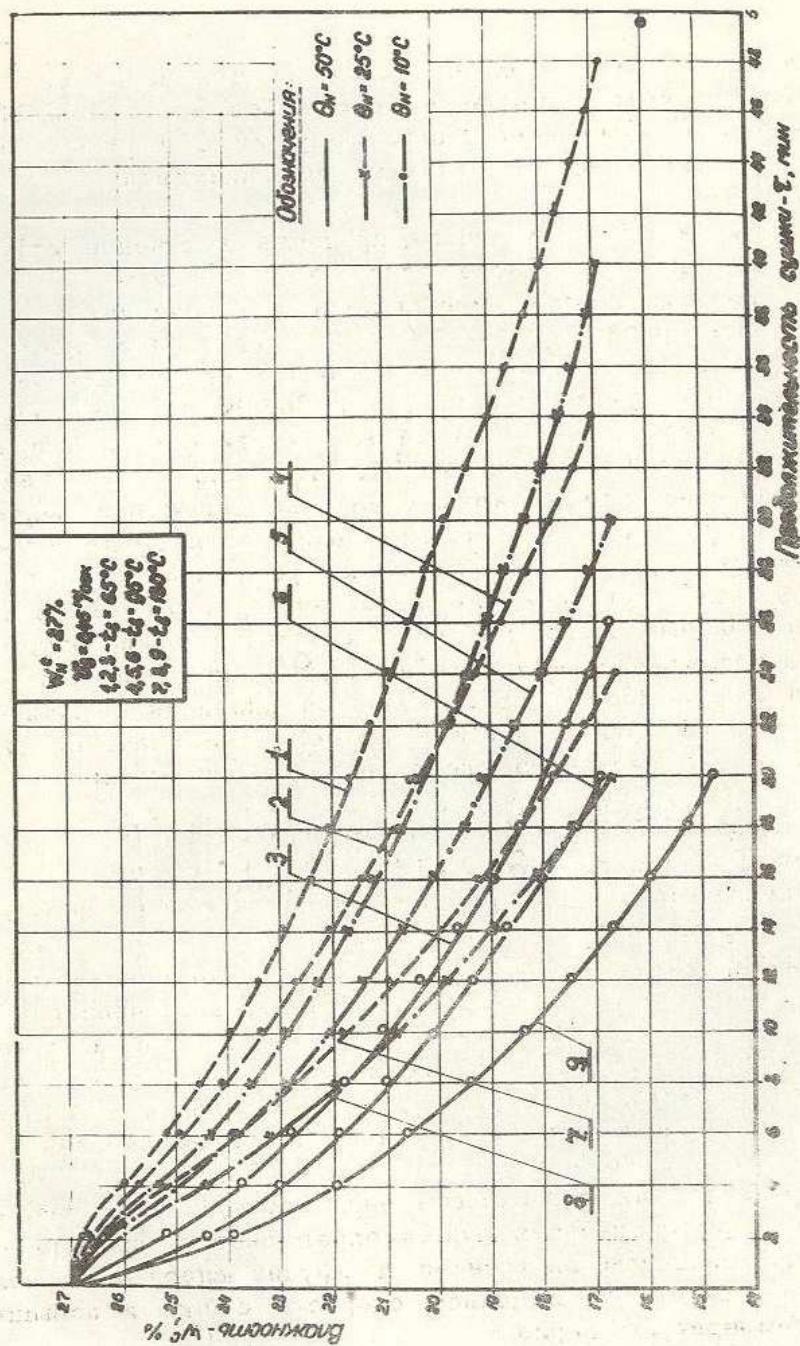


Рис.2.

сушки при ее максимальном значении для зерна как с предварительным подогревом, так и без подогрева. Наиболее резкие изменения скорости сушки с наличием максимума при всех рассматриваемых значениях начальной влажности и температуры зерна, а также температуры агента сушки имели место в начале процесса в течение 2-10 минут продувки слоя. После достижения максимального значения скорость сушки уменьшалась до окончания процесса.

Характерной особенностью сушки зерна после предварительного подогрева является убывание его начальной температуры при агенте сушки 338 и 368°K во всем рассматриваемом диапазоне начальной влажности зерна, а при  $W_M^c = 38\%$  также и при 403°K. На рис.3 в качестве примера приведен график кривых нагрева зерна при  $W_M^c = 27\%$ .

С увеличением начальной влажности зерна и уменьшением температуры агента сушки увеличивается продолжительность и степень снижения температуры зерна. Величина максимального снижения начальной температуры предварительно нагретого зерна ( $\Delta\theta$ ) при температуре агента сушки 338 и 368°K является линейной функцией начальной влажности зерна и в пределах ее значений  $W_M^c = 18-38\%$  определяется из следующих зависимостей:

$$\text{при } T_c = 338^\circ\text{K } \Delta\theta = 279,3 + 0,44(W_M^c - 18)^\circ\text{K}$$

$$\text{при } T_c = 368^\circ\text{K } \Delta\theta = 277,1 + 0,22(W_M^c - 18)^\circ\text{K}$$

Снижение температуры предварительно нагретого зернового слоя во время его продувки агентом сушки при температуре даже вдвое большей, чем температура зерна, можно объяснить тем, что в балансе тепла, затраченного на испарение влаги и поступившего от агента сушки, вследствие интенсивной влагоотдачи в начальный период сушки, превышает расходная статья. Для компенсации недостающего тепла расходуется внутренняя тепловая энергия материала и зерно охлаждается. После удаления влаги, сконцентрированной на поверхности зерна, углубляется зона испарения и интенсивность сушки определяется, прежде всего, сопротивлением внутренней диффузии влаги материала, что сопровождается падением скорости сушки и повышением температуры зерна.

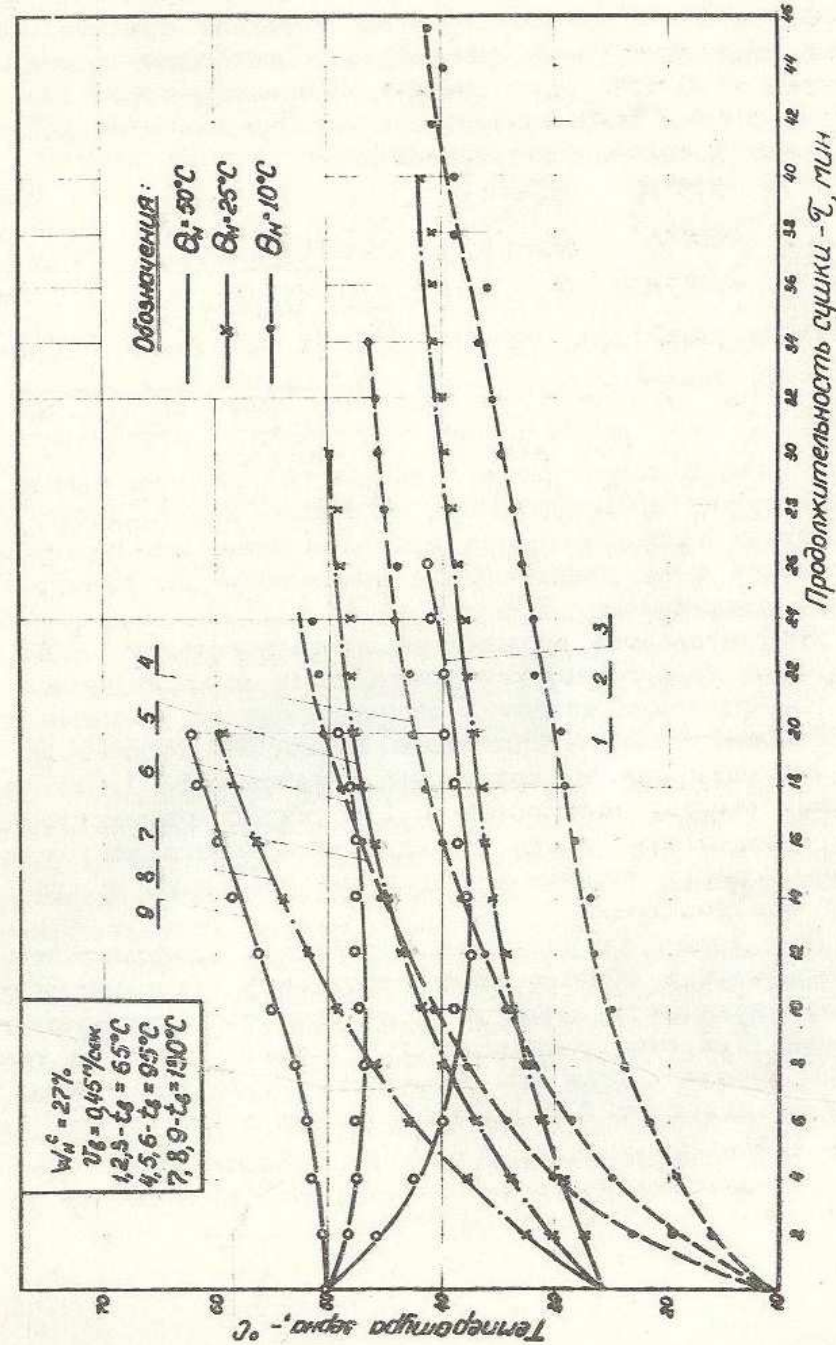


Рис.3.

При сушке зерна с предварительным подогревом его конечная температура (соответствующая  $W_n^c = 16-17\%$ ) зависит от температуры агента сушки, а при  $T_e = 338$  и  $368^\circ\text{K}$  является также линейной функцией начальной влажности зерна. В пределах изменения влажности зерна — 21-38% для конечной температуры его нагрева при сушке с предварительным подогревом установлены следующие эмпирические зависимости:

$$\text{при } T_e = 338^\circ\text{K} \quad \theta_k = 314^\circ\text{K} \quad (16)$$

$$\text{при } T_e = 368^\circ\text{K} \quad \theta_k = 320 + 0,46(W_n^c - 21)^\circ\text{K} \quad (17)$$

$$\text{при } T_e = 403^\circ\text{K} \quad \theta_k = 330 + 0,45(W_n^c - 21)^\circ\text{K} \quad (18)$$

Отклонения расчетных значений  $\theta_k$  от опытных не превышает 9%.

При сушке без подогрева зерно непрерывно нагревается с самого начала процесса и поэтому его конечная температура в большинстве случаев выше, чем при сушке предварительно нагретого зерна. Этому способствует также меньшая продолжительность процесса сушки зерна с предварительным подогревом до принятой конечной влажности.

Эффективность применения предварительного подогрева зерна характеризуется введенными коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$ , значения которых, рассчитанные по опытным данным во всем принятом диапазоне изменения параметров зерна и агента сушки, приведены в таблице № 1. По физическому смыслу коэффициенты „К” характеризуют увеличение производительности сушильного аппарата за счет предварительного подогрева зерна, по сравнению с его сушкой без подогрева.

Как видно из приведенной таблицы, коэффициенты „К” находятся в обратно пропорциональной зависимости от начальной влажности зерна во всем принятом диапазоне ее изменений. Так, коэффициенты „К” в зависимости от температуры агента сушки при влажности зерна 18% изменяются в пределах от 210 до 400%, а при — 38% — всего от 106 до 122%.

Начальная влажность зерна $W_n^c$ %	Конечная влажность зерна $W_k^c$ %	Температура агента сушки $T_e$ °K	Продолжительность сушки — $\tau$ мин при начальной температуре зерна — $\theta_n$			$K_1$ %	$K_2$ %
			283°K	298°K	323°K		
18	16	338	16	10,5	5	320	210
		368	9,2	6,3	2,8	330	227
		403	7,2	4,8	1,8	400	271
21	17	338	20	14,8	8	250	181
		368	14	11,5	6,2	225	185
		403	9	7,1	4,3	208	184
27	17	338	48	32	24,5	188	159
		368	34	28,4	19,6	173	163
		403	22,8	19,1	13,2	173	141
33	17	338	76,2	68,6	58	139	120
		368	50,6	49	38	141	118
		403	37,7	29,3	26,5	141	112
38	17	338	107	98	88	122	111
		368	68	58	54	122	108
		403	46	41,3	38	121	106

Зависимость коэффициентов „К” от температуры агента сушки выражена гораздо слабее и при влажности зерна 18-21% имеет сложный характер, а в пределах ее изменений — 21-38% коэффициенты „К” увеличиваются с уменьшением температуры агента сушки.

Отмеченный характер изменения коэффициентов „К” может быть объяснен тем, что, как отмечалось выше, резкое превышение интенсивности влагоудаления при сушке предварительно нагретого зерна, по сравнению с неопределенным, имеет место в начале процесса в течение 4-6 минут. Следовательно, так как с уменьшением начальной влажности зерна сокращается общая продолжительность сушки до заданной конечной влажности и при этом большая доля от

всего времени сушки приходится на начальный период, коэффициенты „К“ увеличиваются. С ростом начальной влажности зерна возрастает общая продолжительность сушки до конечной влажности и сокращается доля начального периода интенсивного снижения влажности предварительно нагретого зерна, что сопровождается уменьшением значений коэффициентов „К“.

В интервале изменения начальной влажности зерна 21-38% зависимость от нее коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  с некоторой погрешностью можно усреднить для трех значений температуры агента сушки и принять линейной. При этих условиях для коэффициентов „К“ установлены эмпирические зависимости:

$$K_1 = 228 - 6,4 (W_n^c - 21) \quad (19)$$

$$K_2 = 177 - 4,3 (W_n^c - 21) \quad (20)$$

Отклонения расчетных значений коэффициентов „К“ от опытных не превышают 10%.

#### РЕЖИМЫ СУШКИ ЗЕРНА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ

При выбранных постоянных значениях скорости агента сушки  $V_c = 0,45$  м/сек и толщины продуваемого слоя  $h = 0,1$  м для построения режимов сушки зерна с предварительным подогревом, применительно к шахтным зерносушилкам, экспериментально обосновывались значения начальной температуры зерна и температуры агента сушки.

В разрабатываемых режимах предварительный подогрев зерна принят до допустимой температуры, установленной для продовольственной пшеницы при ее сушке в шахтных зерносушилках в зависимости от исходного качества клейковины, т.е. в пределах 318-333°K. Экспериментально установлено, что при изменении начальной температуры зерна в пределах 313-331°K отмеченные в главе III характерные особенности изменения влажности и температуры зерна при его сушке с предварительным подогревом сохраняются.

В опытах по определению влияния температуры агента сушки последняя изменялась в пределах от 305°K (наружный воздух) до 403°K и при этом установлен одинаковый характер интенсивной влагоотдачи предварительно нагретого зерна в начале продувки слоя. С уменьшением температуры агента сушки увеличивается скорость снижения интенсивности влагоотдачи в процессе сушки. Особенно резкое уменьшение скорости сушки наблюдается при продувке зернового слоя неподогретым воздухом, когда за первые 4 минуты процесса испарилось влаги вдвое больше чем за последующие 14 минут (при  $W_n^c = 27\%$ ). В этот период резко снижается температура зернового слоя, которая быстро достигает температуры воздуха, а в последующем снижается до более низкой температуры. При продувке слоя агентом сушки  $T_c = 338$  и 368°K температура зерна не превышала начальную, а изменение влажности за рассматриваемый период сушки значительно больше, чем при продувке наружным воздухом. Применение агента сушки при температуре 403°K к моменту достижения зерном конечной влажности приводит к его нагреву свыше начальной температуры.

Как предусмотрено методикой исследования, для построения режимов сушки зерна с предварительным подогревом принято постоянство его температуры на уровне начальной на протяжении всего процесса сушки. В серии опытов, проведенных в принятом диапазоне влажности зерна (18-38%), установлены такие 2-х и 3-х ступенчатые изменения температуры агента сушки при снижении влажности предварительно нагретого зерна (323°K) до 14-17%, при которых его температура остается практически постоянной до конца процесса. Соответствующие значения температуры агента сушки приведены в таблице 2.

В опытах установлено, что при сушке зерна с предварительным подогревом его конечная температура находится на уровне начальной также при постоянной температуре агента сушки, (безступенчатый режим)-табл.2, но при этом средняя скорость сушки меньше соответствующей скорости при ступенчатых режимах от 0 до 28% (большие значения соответствуют большей влажности зерна).

Режимы сушки зерна пшеницы с предварительным подогревом (с нормальной исходной клейковиной)

Таблица 2

Начальная влажность зерна, $W_n^c$ %	Начальная температура зерна, $\theta_n$ °K	Температура агента сушки в °K и продолжительность продувки слоя в минутах						Безступенчатый режим $T_6$
		1-ая ступень		2-я ступень		3-я ступень		
		$T_6$	$\tau$	$T_6$	$\tau$	$T_6$	$\tau$	
до 21	323	383	4	368	4-6	-	-	378
до 27	323	393	6	383	6	358	8	368
до 38	323	403	8-10	383	6-8	358	18-28	358

При сравнении расчетных значений температуры агента сушки, полученных из уравнения (13), с опытными, расхождения не превышали 14%. Проверка содержания и удельной растяжимости клейковины после предварительного подогрева зерна до 323°K и сушки его по рекомендованным в таблице 2-режимам — без превышения зерном начальной температуры — подтвердила неизменность его исходных качественных показателей.

### ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА НАГРЕВА ЗЕРНА ПЕРЕД СУШКОЙ

В настоящее время в нашей стране и за рубежом общепризнанным является способ предварительного нагрева зерна перед сушкой в условиях, затрудняющих испарение влаги, осуществление которого является дорогим и сложным. Применительно к распространенным в СССР конструкциям и условиям работы шахтных зерносушилок наиболее приемлемым является способ подогрева зерна путем непосредственной продувки газовой воздушной смесью.

В результате проведенных опытов установлено, что после кратковременного и равномерного конвективного подогрева зерна в разреженном состоянии (в кипящем слое) интенсивность влагоотдачи в некоторой степени зависит от продолжительности отлежки перед сушкой.

Средняя скорость сушки зерна, предварительно нагретого в кипящем слое, возрастает с увеличением продолжительности отлежки особенно в интервале от 1 до 5-10 минут (меньшим значениям соответствует большая влажность зерна). Влияние отлежки можно объяснить тем, что после пролувки слоя происходит перемещение влаги к поверхности зерна вследствие ее частичного удаления во время нагрева, а также расширение влагопроводящих пор и капилляров, которые имеют место при нагревании зерна без испарения влаги.

В сравнительных опытах, проведенных в аналогичных условиях при сушке зерна, нагретого до 323°K без испарения влаги и в кипящем слое с последующей отлежкой продолжительностью 5 минут, было установлено, что интенсивность влагоотдачи на 9-12% выше для зерна, нагретого без испарения влаги. Однако, в результате удаления влаги из зерна во время конвективного подогрева, как видно из графика кривых сушки (рис.4), значения его текущей и конечной влажности в процессе сушки всегда меньше, чем после нагрева без испарения влаги.

После нагрева зерна в кипящем слое с отлежкой свыше 5 минут характер изменения его температуры в процессе сушки такой же, как и после нагрева зерна без испарения влаги, установленный в главе III.

Содержание и удельная растяжимость клейковины зерна, предварительно нагретого в кипящем слое до 323°K с последующей отлежкой от 1 до 60 минут, после его сушки до 16-17%, практически не изменились.

### ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА СУШКИ ЗЕРНА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ

С целью промышленной проверки полученных экспериментальных данных в 1967 г. осуществлено внедрение метода сушки зерна с предварительным подогревом на двухступенчатой шахтной зерносушилке ВТИ-8 Муртазовского элеватора Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов.

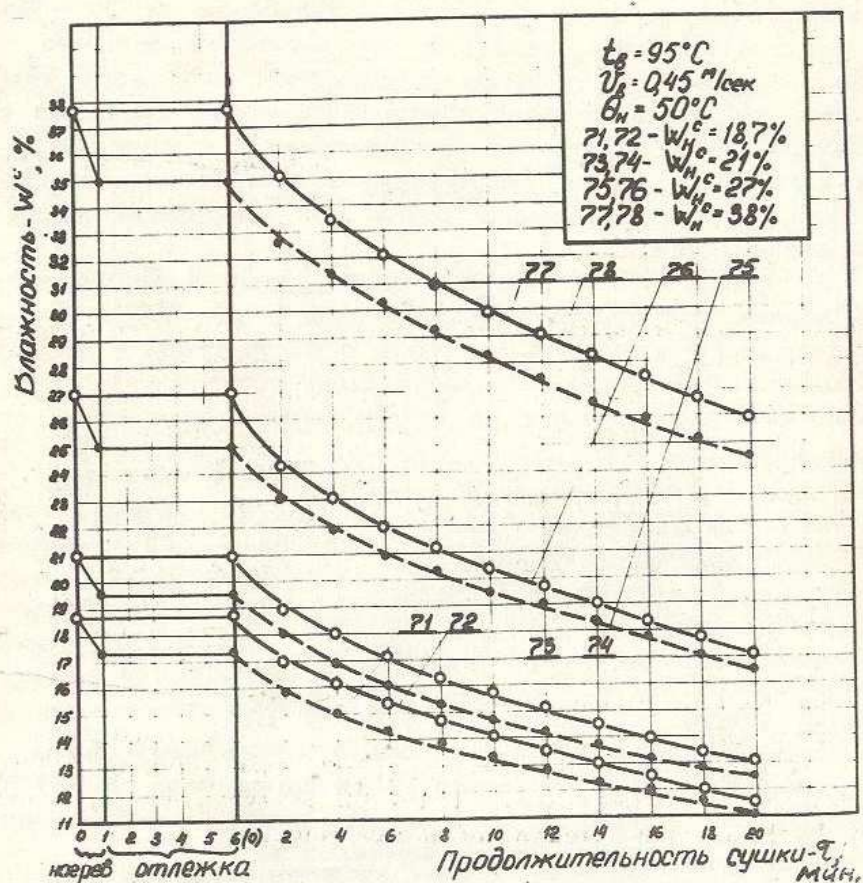


Рис. 4.

- 71, 73, 75, 77 — кривые сушки зерна нагретого конвективно;  
 72, 74, 76, 78 — кривые сушки зерна нагретого без испарения влаги.

Для предварительного нагрева зерна был разработан конвективный подогреватель, в котором падающий лентой зерновой слой многократно пронизывается теплоносителем, движущимся противоточно и перекрестно. Схемой реконструкции зерносушилки (рис.5) предусмотрена установка подогревателя в линии подачи зерна в сушилку параллельно действующей, без ее нарушения. Подогреватель был установлен на стене здания сушилки, что позволило упростить реконструкцию, так как все оборудование в помещении сушилки и строительные конструкции оставлены без изменения. Теплоноситель нагнетался в подогреватель вентилятором ВЦП-6 из существующей топки ВТИ-8. Вследствие интенсивного выделения легковесных отходов в подогревателе после его выхлопного патрубка установлен сборный бункер. Для подачи зерна в подогреватель и из него в надсушильный бункер использовалось существующее оборудование. Перед сушкой зерно проходило отлежку в надсушильном бункере в течение 20-30 минут. При сушке зерна продовольственного назначения температура агента сушки принималась в соответствии с установленными режимами в пределах  $368-403^\circ\text{K}$ . Зерно перед сушкой нагревалось до  $319-323^\circ\text{K}$ .

Испытания зерносушилки, переведенной на метод сушки с предварительным подогревом зерна, проведены в заготовительный период в 1967, 1968, 1969 гг. при сушке семян подсолнечника и зерна пшеницы продовольственного и семенного назначения. В результате испытаний установлено:

- в подогревателе достигается нагрев зерна пшеницы и семян подсолнечника до  $313-323^\circ\text{K}$  при температуре теплоносителя  $373-453^\circ\text{K}$ , изменяющейся в зависимости от заданного нагрева материала, культуры и влажности;
- одновременно с нагревом в подогревателе снижается влажность зерна примерно на 1% и происходит интенсивная очистка от легковесных примесей (удаляется свыше 50%);
- при сушке зерна продовольственной пшеницы влажностью 22,7-28,2% производительностью зерносушилки составляла 14,2-17,8 пл.т./час/ (в зависимости от влажности зерна), что превышает паспортную на 36-71%;

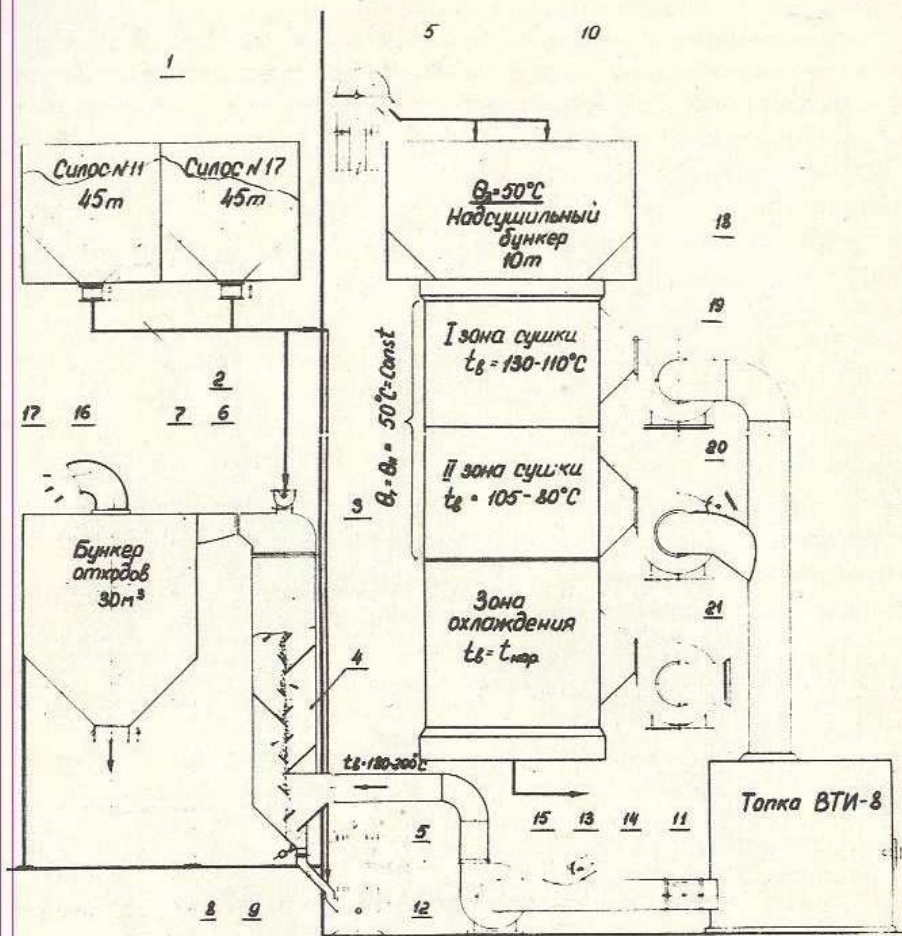


Рис. 5.

Схема шахтной зерносушилки ВТИ-8 с предварительным подогревом зерна

- 1 - силосы свежего зерна; 2 4 подогреватель;  
 6 - шнек-распределитель подогревателя;  
 5 - нория для нагретого зерна;  
 12 - вентилятор ВЦП-6 подогревателя;  
 18 - шахта зерносушилки ВТИ-8.

- по всей высоте шахты температура нагрева зерна не превышала начального значения;  
 - содержание и качество клейковины зерна продовольственного назначения, а для семенного - всхожесть - после предварительного подогрева и в процессе сушки оставались практически на исходном уровне.  
 В таблице 3 приведены технико-экономические показатели при переводе 2-х ступенчатой зерносушилки ВТИ-8 на метод сушки с предварительным подогревом зерна

Таблица 3

Наименование показателей	Един. измер.	Значение показателей		Изменение показателей	
		без предв. подогрев.	с предварительным подогрев.	в натуральных единицах	в %
1	2	3	4	5	6
Производительность	пл.т./час	10,4	14,2-17,8	3,8-7,4	136-171
Удельный расход энергии (с учетом транспортного обслуживания)	кВтч/пл.т.	5,17	4,5	0,67	115
Удельный расход условного топлива	кг/пл.т.	7,12	7,10	-	-
Дополнительные капитальные вложения	тыс.руб.	-	3,0	3,0	-
Капитальные вложения на 1 пл.т./час (без подогрева принято для ДСП-24) и на дополнительную мощность	-/-	3,11	0,8-0,4	2,31-2,71	390-778

	1	2	3	4	5	6
Издержки на сушку 1 пл.т. (с учетом очистки перед сушкой)	руб. пл.т.	1,18	0,95	0,23	-	-124
Просушено зерна за 1967 и 1968 гг.	пл.т.	-	35000	-	-	100
Экономический эффект за 2 года составляет	т.руб.	-	8,05	8,05	-	-
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений	год	-	-	0,75	-	-

С учетом установленных закономерностей тепло- и влагообмена при сушке предварительно нагретого конвективно зерна (с отлежкой перед сушкой) была разработана схема рециркуляционной сушки, которая в 1969 г. внедрена на Муртазовском и Докшукинском элеваторах Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов. Особенность этой схемы состоит в том, что смесь свежего и рециркулирующего зерна (после отлежки) рециркулирует только в подогревателе, в котором средняя температура зерновой смеси достигает допустимой. Нагретое зерно, подлежащее окончательной сушке, направляется в шахту сушилки, в верхней зоне которой продувается агентом сушки при постоянной температуре зерна, а в нижней — охлаждается. Достоинством схемы являются относительно низкие затраты на реконструкцию при повышенной интенсивности влагосъема в связи с отсутствием промежуточного охлаждения зерна.

По описанной схеме рециркуляционной сушки в 1969г. проведено испытание зерносушилки ВТИ-8 Муртазовского элеватора при сушке пшеницы семенного назначения влажностью  $W_n^c = 18,3-22\%$ . При температуре агента сушки перед подогревателем  $408^\circ\text{K}$  температура зерновой смеси после него составляла  $313-316^\circ\text{K}$ . Температура агента сушки принята: 1-ая ступень —  $348^\circ\text{K}$ , вторая —  $338^\circ\text{K}$ , температура зерна в шахте не превышала  $315^\circ\text{K}$ . Средняя производительность зерносушилки составила  $10,8$  пл.т./час, т.е. примерно вдвое превысила паспортную при полной сохранности исходной всхожести зерна на уровне  $96-97\%$ .

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Характерной особенностью сушки зерна, предварительно нагретого до  $313-331^\circ\text{K}$  является резкое превышение скорости влагоотдачи в начале процесса (в первые 4-6 минут) над соответствующей скоростью неподогретого зерна ( $283-298^\circ\text{K}$ ) и в этот период влагосъем в нагретом зерне составляет от 20 до 100% (в зависимости от влажности) от общего снижения влажности до  $16-17\%$ , а в неподогретом — не более 25%.

2. При сушке зерна с предварительным подогревом наблюдается снижение его температуры в начале процесса с последующим возрастанием, что приводит в большинстве случаев к меньшим значениям конечной температуры зерна (соответствующей  $W_n^c = 16-17\%$ ), чем при сушке без предварительного подогрева.

3. Установлены эмпирические зависимости для конечной температуры предварительно нагретого зерна (15, 16, 17) и для величины максимального снижения его на начальной температуры в процессе сушки (13, 14).

4. Эффективность применения предварительного нагрева зерна перед сушкой увеличивается с уменьшением его начальной влажности и температуры агента сушки и оценивается введенным коэффициентом „К“, равным процентному отношению средних скоростей сушки зерна с предварительным подогревом и без подогрева (табл.1). В интервале влажности зерна  $21-38\%$  для коэффициентов „К“ установлены эмпирические зависимости (19,20).

5. Определена методика построения режимов сушки зерна с предварительным подогревом, по которой температура его предварительного нагрева принимается равной допустимой, установленной в шахтных зерносушилках с учетом назначения зерна и исходного качества клейковины и эта температура поддерживается неизменной на протяжении всего процесса сушки. Для температуры агента сушки, при которой обеспечивается постоянство температуры предварительно нагретого зерна получено уравнение (13).

6. В соответствии с выбранной методикой для зерна пшеницы с нормальной исходной клейковиной экспериментально установлены ступенчатые и безступенчатые температурные режимы сушки с предварительным подогревом (табл.2), которые оказались более "мягкими", чем действующие. При сравнении расчетных значений агента сушки (по уравнению 13) с опытными расхождения не превышали 14%.

7. Определены условия предварительного подогрева зерна с одновременным испарением влаги. В этом случае после быстрого и равномерного конвективного нагрева зерна в разреженном слое скорость сушки зависит от продолжительности отлежки, которая должна приниматься не менее 5-10 минут.

8. Характер тепло- и влагообмена при сушке зерна после конвективного подогрева до 323°K (с последующей отлежкой) такой же, как после нагрева без испарения влаги, но с уменьшением скорости сушки в начале процесса на 9-12%.

9. После предварительного подогрева зерна с нормальной клейковиной до 323°K без испарения либо с одновременным испарением влаги (с последующей отлежкой до 60 минут) и сушки по рекомендованным режимам исходные продовольственные свойства зерна практически не изменяются.

10. Разработана конструкция и методика подбора основных параметров многоходового конвективного подогревателя для нагрева зерна перед сушкой. В результате производственных испытаний установлено, что в подогревателе достигается заданный нагрев зерна до 313-323°K при температуре агента сушки 373-453°K, снижение влажности около 1% и интенсивная очистка от легковесных примесей (более 50%).

11. Разработана и внедрена схема перевода шахтных зерносушилок на метод сушки с предварительным подогревом, по которой конвективный подогреватель устанавливается в линии подачи зерна в сушилку, параллельно действующей без нарушения последней. В результате производственных испытаний даже при рекомендованных более "мягких" режимах, чем действующие, достигнуто увеличение производительности шахтной сушилки на 36-71%, снижение удельных затрат электроэнергии на 15% и себестоимости послеуборочной обработки зерна - на 24%. Затраты на реконструкцию окупаются менее, чем за один год.

12. Для более полной реализации в шахтных зерносушилках выявленных в работе положительных особенностей тепло- и влагообмена при сушке предварительно нагретого зерна, с целью любого снижения его влажности в потоке и снижения капитальных и эксплуатационных затрат, на реконструкцию, рекомендован метод сушки, при котором рециркуляция зерновой смеси (после отлежки) осуществляется только в подогревателе. Нагретое зерно, подлежащее окончательной досушке, пройдя отлежку, поступает в шахту, в верхней зоне которой продувается нагретым агентом сушки при наименьшей температуре зерна, а в нижней - охлаждается.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$W^c, W_n^c, W_k^c$  - соответственно, средняя по объему слоя влажность зерна (по отношению к сухому весу) - в данный момент, начальная и конечная;  $W$  - количество испаренной влаги, кг;  $\theta, \theta_n, \theta_k, ^\circ K (^^\circ C)$  - средняя температура зернового слоя в данный момент, начальная и конечная;  $\Delta \theta$  - изменение начальной температуры зернового слоя;  $T_B (^^\circ K), t_B (^^\circ C)$  - температура агента сушки;  $U_B$  - скорость агента сушки перед зерновым слоем, м/сек;  $t_{ц}, \tau$  - соответственно, продолжительность цикла односторонней продувки и полное время продувки, сек (мин);  $\rho_m$  - плотность потока влаги, кг/м<sup>2</sup> сек;  $P_m, P_{ср}$  - парциальное давление пара на поверхности зерна и в среде, н/м<sup>2</sup>;  $\beta$  - коэффициент влагообмена, кг/час.н.;  $\alpha_m$  - коэффициент диффузии влаги, кг/час.н.;  $\rho$  - масса абсолютно сухого материала в

единице объема влажного материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\Delta U$  - градиент влагосодержания,  $\text{кг вл}/\text{кг.с.вещ.}$ ;  $\Delta \theta$  - градиент температуры,  $^{\circ}\text{К}/\text{м}$ ;  $G_2, G_6$  - весовой расход зерна и агента сушки,  $\text{кг}/\text{сек}$ ;  $\frac{dU}{dt}$  скорость сушки в данный момент.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Сушка семян подсолнечника с предварительным подогревом. „Мукомольно-элеваторная промышленность” № 3, 1968.
2. О влиянии предварительного подогрева зерна на его сушку. „Известия вузов. Пищевая технология” № 2, 1968.
3. Исследование процесса сушки термолабильных зернистых материалов с их предварительным подогревом. Тезисы докладов Всесоюзной межвузовской научной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1968.
4. Выбор условий и способа нагрева зерна перед сушкой. „Мукомольно-элеваторная промышленность” № 10, 1968.
5. Сушка зерна пшеницы с предварительным подогревом. Сб. „Хранение и переработка зерна” № 1, 1969.
6. Сушка зерна пшеницы с предварительным подогревом. Тезисы докладов на научной конференции по теории и технике сушки зерна. Москва, 1969.
7. „Способ термообработки зернистых материалов”. Решение Госкомитета от 27.06.1969г. о выдаче авторского свидетельства по заявке № 1195378/24-6 от 6 ноября 1967 г.

Результаты работы докладывались автором:

1. На XXVIII научной конференции ОТИ им.М.В.Ломоносова. Одесса, февраль-май, 1966.
2. На XXIX научной конференции ОТИ им.М.В.Ломоносова. Одесса, апрель-июнь, 1967.
3. На Всесоюзной межвузовской научной конференции по новым физическим методам обработки пищевых продуктов. Воронеж, 1968.

4. На XXX научной конференции ОТИ им.М.В.Ломоносова. Одесса, февраль, 1969.
5. На Всесоюзной научной конференции по теории и технике сушки зерна. Москва, апрель, 1969.

---

БР 04378 Подписано к печати 20/У111-69г. Объем 1,75 печ.л.  
Уч.изд.л. 1,6 Заказ № 166 Тираж 200 экз. 1969 год

Лаборатория фотомеханической печати ОТИ  
имени М.В.Ломоносова, г.Одесса, ул.Свердлова,112