

Одесская государственная академия пищевых технологий

На правах рукописи

Альхоган Адель

Кинетика сушки некоторых зернобобовых культур

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты
пищевых производств

Автореферат

диссертации на соискание научной степени
кандидата технических наук

Одесса - 1995

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Одесской государственной академии пищевых технологий

Научный руководитель	- доктор технических наук, профессор Н.В.Остапчук
Научный консультант	- кандидат технических наук, доцент Г.Н.Станкевич
Официальные оппоненты	- доктор технических наук, профессор И.Р.Дударев - кандидат технических наук, А.Б.Шашкин
Ведущая организация	- Одесское производственное объединение "Одессаэлеваторзернопром"

Защита состоится "14" декабря 1995 г. в 13 час. на заседании специализированного ученого совета Д 05.16.01 при Одесской государственной академии пищевых технологий по адресу: 270039, г.Одесса, ул.Канатная, 112 (ауд.А-234)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесской государственной академии пищевых технологий.

Автореферат разослан "11" декабря 1995 г.

ПЕРЕОБЛІК

20 11 р.

Ученый секретарь
специализированного совета
д.т.н., профессор

Б.В.Егоров

ОНАХТ

02.03.11

Кинетика сушки некот



v017952

Общая характеристика работы

Актуальность. Из зерновых культур, выращиваемых в Сирийской Арабской Республике (САР) наибольший объем занимает пшеница, а также бобовые - нут, чечевица, соя и др. Зернобобовые культуры в арабских странах являются важным продуктом питания и источниками белка.

При сборе урожая в благоприятных погодных условиях влажность зерновых и бобовых в САР не превышает 16...17%, что позволяет их хранить в течение нескольких месяцев без существенных изменений качества. Однако при неблагоприятных условиях влажность зерновых и бобовых превышает 20%, что делает невозможным их дальнейшее хранение.

В связи с этим для достижения кондиционного качества эти культуры подвергаются сушке различными способами. В небольших по объему фермерских хозяйствах этот процесс является очень трудоемким и экономически невыгодным. В крупных государственных и частных хозяйствах сушка и переработка производится на специальных механизированных токах, оснащенных чаще всего малоэффективными барабанными сушилками.

Многообразие и разнотипность конструкций зарубежного оборудования для сушки зернобобовых культур в САР предусматривает использование и различных методов и режимов сушки, характеризующихся температурой и скоростью сушильного агента, характеристикой слоя высушиваемого продукта, предельно допустимой температурой нагрева зерновок и др.

Методы и режимы сушки, применяемые для злаковых культур, становятся неприемлемыми для сушки зернобобовых и других высоколабильных пищевых продуктов в связи с существенными различиями их физико-механических свойств. Известно, что повышение температуры сушильного агента может обеспечить увеличение скорости сушки и некоторое снижение затрат энергии, однако недостаточная точность регулирования процесса приводит к значительному ухудшению качества продукта. Одним из направлений

в решении этих задач может быть использование способа нисходящих режимов сушки, применяемого в основном в шахтных рециркуляционных сушилках. Известные данные по кинетике сушки зерновых культур в нисходящих режимах, полученные в различных условиях на конкретных объектах, не всегда воспроизводимы для других, и не во всех случаях способствуют сохранению качества продукта и снижению затрат энергии.

В связи с недостаточными данными количественной оценки процесса обезвоживания зернобобовых культур, установление эффективных режимов сушки, обеспечивающих достижение нормативных показателей качества, приобретает для республики САР научно-техническую значимость и актуальность.

Цель и задачи исследований. Целью работы является научно-техническое обоснование режимов сушки зернобобовых культур, обеспечивающей сокращение экспозиции процесса и достижения энергоэкономных затрат при нормативных показателях качества готовой продукции.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

определить основные физические и технологические характеристики объекта обработки, каким являются избранные зернобобовые культуры, выращиваемые в САР;

выполнить анализ кинетических закономерностей процессов нагрева и сушки характерных зернобобовых культур;

определить продолжительность процесса и предельно допустимые температуры нагрева представительных образцов зерна;

установить кинетику и режимы сушки зернобобовых применительно к распространенным в САР способам и конструкциям сушильных установок;

установить пределы изменения управляющих воздействий, обеспечивающих допустимые границы температур нагрева зерна в процессе сушки;

разработать рекомендации по ведению процесса сушки в условиях САР, обеспечивающие снижение расхода теплоносителей при сохранении качества продукта.

Научная новизна работы заключается в обосновании и экспериментальном подтверждении установленных закономерностей сушки высоколабильных зернобобовых культур при нормируемых показателях качества; в составлении математической модели процесса сушки зернобобовых культур и подтверждении ее адекватности результатами экспериментальных исследований.

Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций промышленности САР по высокоэффективной сушке зернобобовых культур.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований переданы Одесскому производственному объединению "Одессаэлеваторзернопром", а также НПО "Пищепроматоматика" для использования при сушке зернобобовых и в разработке систем управления зерносушилками.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на конференциях ОТИПП (1991, 1992, 1993, 1994, 1995 г.) и республиканских конференциях (1992, 1993 гг.) и опубликованы в шести статьях.

На защиту выносятся научные положения, полученные лично автором: новые данные о кинетике нагрева и предельно допустимым температурам нагрева зернобобовых в процессе сушки при сохранении их пищевых достоинств;

рекомендации по режимам сушки зернобобовых применительно к условиям САР;

рекомендации по выбору переходных процессов при сушке зернобобовых, обеспечивающих соблюдение нормативных показателей качества.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов и рекомендаций, списка использованной литературы и при-

ложений. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок, 20 таблиц и 5 приложений. Список литературы включает 106 наименований, в том числе 11 иностранных.

Содержание работы

В первой главе показано, что при температурах сушильного агента, равных или значительно превышающих предельно допустимую температуру нагрева зерна, величина времени нагрева в кипящем и падающем слое исчисляется секундами и в плотном слое - минутами (см. табл.1).

Таблица 1

Характеристики режимов сушки зерновых культур

№	Характеристика процесса	Плотный слой	Виброкипящий слой	Падающий (взвешенный) слой
1.	Время нагрева до предельно допустимой температуры $\theta_{\text{дп}} = 50-60^{\circ}\text{C}$	20-50 мин.	0,8-1,0 мин	2 - 6 с
2.	Общее снижение влажности при достижении $\theta_{\text{дп}} = 50-60^{\circ}\text{C}$	4-6 %	1,5-2,0 %	0,5-1,0 %
3.	Скорость нагрева до $\theta_{\text{дп}} = 50-60^{\circ}\text{C}$	1,5-2,0 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$	20-40 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$	20-4 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$
4.	Скорость удаления влаги при нагреве до $\theta_{\text{дп}} = 50-60^{\circ}\text{C}$	0,15-0,2 $\%/ \text{мин}$	1,5-2,0 $\%/ \text{мин}$	10-15 $\%/ \text{мин}$

В течение этого промежутка времени возможно удаление только незначительного количества влаги. Время переходного процесса для достижения предельно допустимых температур зерна зависит от типа сушилки и способа сушки. Например, в кипящем слое переходный процесс в 10...15 раз

короче по сравнению с сушкой в плотном слое. Возможности повышения интенсивности сушки в кипящем, падающем, взвешенном и др. слоях ограничены весьма малым промежутком времени достижения предельно допустимых температур нагрева зерна.

Анализ зернобобовых культур как объектов сушки показал, что они изучены недостаточно. В литературе не обнаружено данных по некоторым механическим, теплофизическим и гигроскопическим свойствам. Режимы сушки не дифференцированы по типам и сортам зерна, математические описания кинетики нагрева и сушки зернобобовых не установлены, что позволило обосновать актуальность работы.

Во второй главе описаны объект исследований, программа и план экспериментальных исследований, методика экспериментальных исследований, лабораторные установки для определения кинетических закономерностей исследуемых характеристик, приборы контроля и их характеристики.

Приведена методика получения кинетических закономерностей, статических характеристик процесса сушки, а также методика математической обработки экспериментальных данных и определения погрешностей измерений. Описана методика получения промежуточных данных при определении кинетических закономерностей и статических характеристик.

В качестве лабораторной базы использовали лабораторные установки кафедры технологии элеваторной промышленности, позволяющие определить кинетику сушки и нагрева зерна в плотном и кипящем слоях при различных температурах и скоростях сушильного агента.

В третьей главе приведены результаты исследований по определению кинетических закономерностей нагрева и сушки зернобобовых культур и пшеницы, а также определены статические характеристики, необходимые для установления пределов изменения управляющих воздействий, обеспечивающих заданные границы предельно допустимых температур нагрева зерна.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены кинетические закономерности сушки и нагрева нута в плотном и кипящем слоях, полученные при двух значениях исходной влажности зерна 16,0 и 23,5% и трех значениях температуры сушильного агента - 80, 70 и 60°C.

Постоянными параметрами приняли высоту слоя зерна в кассете $h=50$ мм, скорость сушильного агента $v_c=0,5$ м/с.

Предельная конечная температура нагрева в зависимости от назначения нута может быть $\theta_{д1}=35^\circ\text{C}$ и $\theta_{д2}=40^\circ\text{C}$. Поскольку в соответствии с правилами конечная нормативная влажность нута составляет $W_k=(14\pm 0,5)\%$, то анализ графиков проводили до достижения указанных значений температур нагрева и влажности зерна.

Анализируя полученные экспериментальные данные, сделаны следующие выводы. Время нагрева нута до предельно допустимой температуры при $W_n=16\%$ в плотном слое составляет 6, 5, 8 и 10 мин. при температурах сушильного агента 80, 70 и 60°C соответственно. Влажность нута за это время снизилась на 2,5% и достигает заданной, т.е. 14%. При начальной же влажности 23,5% влажность исходного образца хотя и снижается на 10, 9 и 8%, однако до заданного конечного значения 14% не достигает, что свидетельствует о том, что в течение одного цикла процесс сушки осуществить не удастся.

При сушке в кипящем слое для достижения $\theta=40^\circ\text{C}$ при $t_{ca}=80^\circ\text{C}$ необходимо 1,2 мин., а при $t_{ca}=60^\circ\text{C}$ - 2,5 мин. при исходной влажности $W_0=16,9\%$. При начальной влажности $W_0=23,5\%$ время нагрева до 40°C увеличивается, соответственно, до 2,2, и 2,6, 3,3 и 5,7 мин. Если принять температуру сушильного агента соответствующей предельно допустимой температуре нагрева зерна, т.е. $t_{ca}=\theta_{доп}=40^\circ\text{C}$, то время нагрева значительно увеличивается.

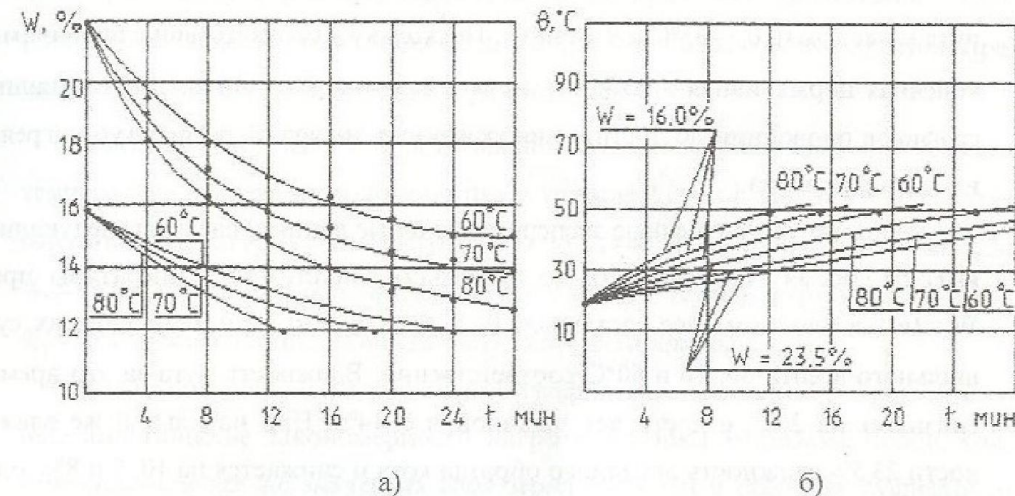


Рис.1 Кинетические закономерности сушки (а) и нагрева (б) нута в плотном слое при температурах сушильного агента $t = 60, 70, 80^\circ\text{C}$ и двух начальных влажностях нута $W=16.0$ и 23.5%

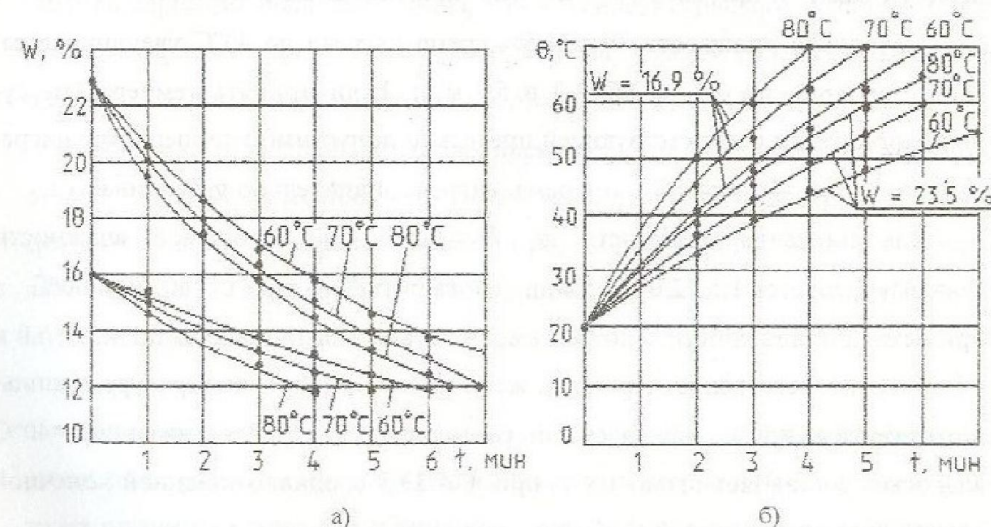


Рис.2 Кинетические закономерности сушки (а) и нагрева (б) нута во взвешенном слое при температурах сушильного агента $t = 60, 70, 80^\circ\text{C}$ и двух начальных влажностях нута $W = 16.0$ и 23.5%

Предельная конечная температура нагрева в зависимости от назначения нута может быть $\theta_{д1}=35^{\circ}\text{C}$ и $\theta_{д2}=40^{\circ}\text{C}$. Поскольку в соответствии с правилами конечная нормативная влажность нута составляет $W_k=(14\pm 0,5)\%$, то анализ графиков проводили до достижения указанных значений температур нагрева и влажности зерна.

Анализируя полученные экспериментальные данные, сделаны следующие выводы. Время нагрева нута до предельно допустимой температуры при $W_n=16\%$ в плотном слое составляет 6, 5, 8 и 10 мин. при температурах сушильного агента 80, 70 и 60°C соответственно. Влажность нута за это время снизилась на 2,5% и достигает заданной, т.е. 14%. При начальной же влажности 23,5% влажность исходного образца хотя и снижается на 10, 9 и 8%, однако до заданного конечного значения 14% не достигает, что свидетельствует о том, что в течение одного цикла процесс сушки осуществить не удастся.

При сушке в кипящем слое для достижения $\theta=40^{\circ}\text{C}$ при $t_{ca}=80^{\circ}\text{C}$ необходимо 1,2 мин., а при $t_{ca}=60^{\circ}\text{C}$ - 2,5 мин. при исходной влажности $W_o=16,9\%$. При начальной влажности $W_o=23,5\%$ время нагрева до 40°C увеличивается, соответственно, до 2,2, и 2,6, 3,3 и 5,7 мин. Если принять температуру сушильного агента соответствующей предельно допустимой температуре нагрева зерна, т.е. $t_{ca}=\theta_{доп}=40^{\circ}\text{C}$, то время нагрева значительно увеличивается.

Для снижения влажности до $W_k=14,0\%$ при начальной влажности $W_o=16\%$ требуется 1,5, 2,0 и 2,5 мин., соответственно, при $t_{ca}=80, 70$ и 60°C , а при исходной влажности $W_o=23,5\%$ время сушки увеличивается до 4,3, 5,0 и 6,0 мин., соответственно. При этих же условиях, но при температуре сушильного агента $t_{ca}=50^{\circ}\text{C}$ время сушки увеличивается. При достижении $\theta=40^{\circ}\text{C}$ влажностью составляет около 1,8 % при $W_n=23,5\%$, однако заданной конечной влажности не достигает.

Из приведенного анализа сделан вывод о том, что для сокращения времени сушки целесообразно в начальном периоде при возможно большей тем-

пературе сушильного агента нагревать нут до предельно допустимой температуры $\theta_{доп}$, а затем сушить при температуре сушильного агента, равной предельно допустимой температуре зерна, т.е. $t_{ca}=\theta_d$.

Например, при $t_{ca}=70^{\circ}\text{C}$ и начальной влажности $W_o=23,5\%$ допустимая температура нагрева нута достигается в течение 2,6 мин. После этого следует снизить температуру сушильного агента до $t_{ca}=40^{\circ}\text{C}$ и продолжить сушку до $W_k=14,0\%$. Если принять предельно допустимую температуру нагрева зерна $\theta_{np}=35^{\circ}\text{C}$ режимы сушки должны быть скорректированы.

В работе приведены табличные и графические зависимости, определяющие кинетические закономерности нагрева и сушки кормовых бобов, сои, чечевицы при тех же значениях слоя зерна $h=50$ мм и скорости сушильного агента $v_{ca}=0,5$ м/с в плотном слое при различных температурах сушильного агента $t_{ca}=80, 70$ и 60°C и двух значениях начальной влажности исходного продукта. Приведенные зависимости позволяют определить время быстрого нагрева зерна до предельно допустимой температуры при различных параметрах сушки, т.е. время безопасного нагрева, и затем перейти к совершенно безопасному значению температуры сушильного агента $t_{ca}=\theta_{доп}$.

Исходя из приведенных данных время переходных процессов должно соответствовать достижению допустимых температур нагрева зерна, т.е. в зависимости от условий ведения процесса сушки. Так, в кипящем слое это составляет 1,2 - 1,6, 3,3 мин., а в плотном слое можно достигнуть конечной влажности продукта при некоторых условиях в течение одного цикла, не прибегая к дополнительным управляющим воздействиям.

В соответствии с планом экспериментальных исследований для уточнения сравнительных кинетических закономерностей нагрева и сушки зерна пшеницы в плотном и кипящем слоях при различных температурах сушильного агента провели первую серию опытов, которую выполняли при изменении температур сушильного агента $t=50...160^{\circ}\text{C}$; начальной влажности

продукта $W_0=16...30\%$; толщины слоя $h=50...200$ мм; скорости сушильного агента $V=0,5...3,0$ м/с и времени отлежки $t_0=1...30$ мин. Высушивали зерно до предусмотренной Инструкцией и допустимой для товарного зерна температуре нагрева и влажности. При изменении температуры сушильного агента от 50 до 140°C в результате опытов уточнили время, необходимое для нагрева зерна до допустимой температуры $\theta_d=50^\circ\text{C}$ (или 60°C). При начальной влажности $W_0=24\%$ и температуре сушильного агента $t=60^\circ\text{C}$ время нагрева зерна в плотном слое в различных его высотах разное, то есть при высоте $h=30$ мм составляет $\tau=10$ с; при $h=60$ мм оно достигает $\tau=240$ с, а при $h=100$ мм - 540 с. При повышении температуры сушильного агента до $t=100^\circ\text{C}$, время нагрева зерна уменьшается и составляет при $h=30$ мм - $\tau=15$ с; $h=50$ мм - $\tau=130$ с и при высоте $h=100$ мм - время нагрева $\tau=250$ с.

С повышением температуры сушильного агента от 60 до 100°C время нагрева зерна уменьшается, однако величина снижения влажности также уменьшится, так как резко сокращается время, в течение которого зерно нагревается до предельно допустимой температуры. Было установлено, что интенсивность нагрева зерна с повышением начальной влажности снижается. Например, с повышением начальной влажности зерна до 35% интенсивность нагрева зерна снижается, а скорость сушки в начальный период увеличивается. Влияние начальной влажности зерна на кинетику сушки также значительное.

Из анализа приведенных кинетических закономерностей нагрева и сушки зерна в плотном слое можно заключить, что с увеличением температуры сушильного агента, уменьшением влажности зерна, уменьшением толщины слоя (расстояние в слое от входа сушильного агента) время нагрева зерна до предельно допустимой температуры, а следовательно и допустимое время удаления влаги при данных условиях сушки сокращается. Несмотря на значительные увеличения интенсивности сушки, полученные кинетические

закономерности не охватывают всех необходимых диапазонов получения промежуточных данных и данных за пределами границ экспериментов. В этих случаях весьма эффективными являются методы многофакторного планирования экспериментов, постановка которых при сушке в плотном слое позволила установить, что наиболее существенное влияние на скорость сушки оказывает температура t , скорость v агента сушки и толщина продуваемого слоя зерна h . Качественный характер зависимости скорости сушки и нагрева зерна от указанных отдельных факторов известен, однако совместное влияние, а также количественная оценка степени этого взаимовлияния отсутствует. В связи с этим нами поставлены опыты по установлению этого влияния применительно к зерну пшеницы.

Эксперименты проводили по плану ПФЭ-2³. В исследованиях были приняты близкие к условиям сушки в шахтных зерносушилках значения изучаемых факторов. Переход от натуральных к кодированным значениям факторов осуществляли по соотношениям

$$x_1 = (t - 120)/30; \quad x_2 = (v - 0,55)/0,25; \quad x_3 = (h - 150)/50, \quad (1)$$

где t , v и h - значения факторов, выраженные соответственно в °C, м/с и мм.

Количественную оценку влияния факторов t , v и h на кинетику процесса проводили по средним скоростям сушки и нагрева

$$N_w = \frac{W_H - W_k}{\tau}; \quad N_{w1} = \frac{W_H - W_1}{\tau_1}; \quad N_{w2} = \frac{W_1 - W_k}{\tau_2}; \quad N_0 = \frac{\theta_k - \theta_H}{\tau}; \quad (2)$$

где W_H , W_1 и W_k - значения влагосодержания зерна соответственно в начале, в конце первого периода и в конце сушки, проценты на абсолютную сухую массу ($W_H = 30,15\%$; $W_1 = 21,40\%$; $W_k = 16,00\%$);

τ_1 , τ_2 , τ - продолжительность сушки и нагрева, соответствующая влаговсему в первом и во втором периодах и общая, в мин.

$$N_w = 0,6191 + 0,2414x_1 + 0,1084x_2 - 0,2376x_3 + 0,0516x_1x_2 - 0,1259x_1x_3 \quad (3)$$

$$N_{w1} = 0,7237 + 0,2467x_1 + 0,1015x_2 - 0,2840x_3 - 0,1045x_2x_3 \quad (4)$$

$$N_{w2} = 0.5053 + 0.2230x_1 + 0.1102x_2 - 0.1903x_3 + 0.0675x_1x_2 - 0.0133x_1x_3 \quad (5)$$

$$N_0 = 3.0522 - 0.2950x_1 + 0.7325x_1x_2 - 0.3075x_1x_3 \quad (6)$$

Полученные уравнения с 95% -ной надежностью адекватно описывают экспериментальные данные.

Наличие значимых эффектов взаимодействия b_{ij} в уравнениях регрессии свидетельствуют о противоречивом характере взаимовлияния факторов на процесс сушки. Анализ этого влияния можно проследить по квазиоднофакторным моделям вида

$$z_i = \left(b_i + \sum_{j=1}^k b_{ij} x_j \right) x_i \quad (7)$$

полученным из уравнения для каждого i -того фактора. Анализ этих моделей показывает, что эффект взаимодействия b_{ij} изменяет значение линейного эффекта b_i . Следовательно, скорость изменения y зависит от уровней $(k-1)$ факторов x_i и не является стабильной характеристикой влияния фактора x_i . Для числовой оценки влияния x_i на критерий y определим уровни стабильности остальных $(k-1)$ факторов.

Запишем квазиоднофакторные модели на основе уравнения (3)

$$z_1 = (0.2414 + 0.0516x_2 - 0.1256x_3)x_1; \quad (8)$$

$$z_2 = (0.1084 + 0.0515x_1)x_2; \quad (9)$$

$$z_3 = (-0.2376 - 0.1259x_1)x_3; \quad (10)$$

Как видно из приведенных квазиоднофакторных моделей, влияние каждого в отдельности фактора t , v и h на среднюю скорость сушки зерна с $W_{H1} = 30,15\%$ до $W_{H2} = 16\%$ зависит от того, какие значения принимают остальные факторы. Так, влияние температуры агента сушки t на N_w зависит от того, какие значения принимают при этом факторы v и h . Например, если скорость агента сушки $v = 0,8$ м/с и толщина слоя зерна $h = 100$ мм, то влияние температуры агента сушки t наибольшее. При этом суммарный коэффициент b_1 определяемый по уравнению (8) равен 0,4189. Наоборот, наименьшее влияние температуры агента сушки t оказывает на N_w при скорости агента сушки

$v = 0,3$ м/с и толщине слоя зерна $h = 200$ мм. Суммарный коэффициент $b_1 = 0,0639$, т.е. влияние t оказывается в этом случае в 6,6 раза меньше. Из уравнения (8) видно, что влияние скорости агента сушки на N_w зависит также и от его температуры - при возрастании температуры агента сушки с 90 до 150°C влияние фактора v увеличивается в 2,8 раза. Из уравнения (12) следует, что влияние толщины слоя зерна также зависит от температуры агента сушки, но в другом направлении влияние h снижается в 3,3 раза при увеличении температуры агента сушки с 90 до 160°C.

Анализ квазиоднофакторных моделей, полученных из уравнения (6) и (7) показывает, что характер взаимовлияния факторов t , v и h на N_{w1} и N_{w2} (для обоих периодов сушки) в основном аналогичен описанному для N_w . Более сложный характер взаимовлияния факторов наблюдается в зависимости средней скорости нагрева зерна N_0 . Поверхности отклика для зависимостей N_0 от v и t при $h = 150$ мм и N_0 от h и t при $v = 0,55$ мм/с имеют вид "седла", что обуславливает изменение не только силы, но и направления влияния факторов. Это наглядно показывает анализ квазиоднофакторных моделей, которые для N_0 имеют вид

$$z_1 = (0.2959 + 0.7325x_2)x_1; \quad (11)$$

$$z_2 = (0.7325x_1)x_2; \quad (12)$$

$$z_3 = (0.2950 - 0.3075x_1)x_3 \quad (13)$$

Из этих уравнений видно, что при изменении скорости агента сушки с 0,3 до 0,8 м/с в уравнении (11) или при изменении температуры агента сушки с 90 до 150°C в уравнениях (12) и (13) знак суммарных коэффициентов b_1 , b_2 и b_3 , рассчитанных по уравнениям (11)-(13), изменяется на противоположный, что говорит о качественном изменении их влияния (изменяется направление влияния факторов).

Таким образом, влияние каждого из рассмотренных факторов на кинетику сушки и нагрева зерна пшеницы зависит от уровней остальных. Это не по-

зволяет дать однозначный ответ на вопрос о их влиянии, что отражает противоречия реальных сушильных процессов.

Нами были исследованы закономерности кинетики сушки нута, кормовых бобов, сои и чечевицы и получено их математическое описание в виде уравнений М.В.Лыкова

$$W = W_p + (W_H - W_p) \exp(-k\tau), \quad \tau = [\ln(W_H - W_p)/(W - W_p)]/K \quad (14)$$

С целью определения продолжительности сушки бобовых при переменном многоступенчатом режиме, характерном для наиболее применяемых шахтных зерносушильных агрегатов, коэффициент сушки K в уравнениях кинетики сушки (14) был предоставлен в виде функциональной зависимости от начальных и режимных параметров сушки

$$K = f(W_0, t) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 = b_0 + b_1W_0 + b_2t + b_{12}W_0t, \quad (15)$$

где b_i - коэффициенты регрессии, определяемые методом наименьших квадратов.

Значение толщины слоя зерна было принято $h = 0.1$ м, а скорость агента сушки $v = 0.3$ м/с, что соответствует условиям сушки в шахтных зерносушилках с диагональным расположением коробов. Диапазоны изменения факторов W_0 и t выбраны из реальных условий.

Поскольку определение зависимости (15) проводят на основе экспериментальных данных, то в целях сокращения количества опытов, повышения достоверности получаемых результатов опыты были проведены по плану ПЭФ-2². Для оценки значимости влияния квадратичных эффектов в каждой серии опытов (для каждой культуры) был намечен дополнительный опыт в центре эксперимента, трехкратное дублирование которого обеспечило также оценку дисперсии ошибки опыта S_y .

После реализации опытов была проведена их многоэтапная обработка и обобщение и получены уравнения регрессии для K в кодированных и натуральных переменных. Сводные данные по коэффициентам в уравнениях ре-

грессии в кодированных (x_1 и x_2) и натуральных (W_0 и t) переменных приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты b_i для уравнений (15) регрессии $K \cdot 10^3 = f(W_0, t)$

Коэффициенты		нут	соя	бобы	чечевица
Для кодированных переменных	b_0	22.0410	28.0581	14.7218	52.0768
	b_1	-7.6960	-4.8535	-2.0250	-3.1305
	b_2	10.7285	11.9662	6.3160	31.6835
	b_{12}	-4.0670	0	0	0
Для натуральных переменных	b_0	-23.5134	22.8097	0	-25.7560
	b_1	0.6088	-1.3297	-0.2713	-0.7826
	b_2	0.7599	0.3989	0.2279	1.0561
	b_{12}	-0.0183	0	0	0

Статистическая оценка и анализ полученных данных показывает, что уравнения адекватно описывают экспериментальные данные. При сушке всех изучаемых культур незначимы квадратичные эффекты, поскольку

$$|b_0 - K_s| < S_y \cdot t_{кр}.$$

Характер влияния факторов W_0 и t на K для всех культур в центре эксперимента одинаков - с уменьшением W_0 и увеличением t коэффициент сушки возрастает (а время сушки соответственно уменьшается). Во всех случаях влияния температуры агента сушки на K выше, чем влияние на него начальной влажности зерна W_0 . Влияние W_0 и t на K линейное и лишь для нута оказался значимым коэффициент парного взаимодействия $b_{12} = -4.0670 \cdot 10^{-3}$. Однако он изменяет лишь силу влияния факторов W_0 и t на K , но не его характер:

$$b'_1 \cdot 10^3 = (-7.6960 - 4.0670x_2)x_1; \quad b'_2 \cdot 10^3 = (10.7285 - 4.0670x_1)x_2.$$

Кроме кинетики сушки в этих же сериях опытов изучали закономерности нагрева зерна нута, кормовых бобов, сои и чечевицы в процессе их сушки в плотном слое, характерном для шахтных зерносушилок. Для сглаживания полученных экспериментальных данных по нагреву зерна и обобщения закономерностей кинетики была проведена аппроксимация кривых нагрева уравнени-

014952
ОНАХТ

см, аналогичным по виду уравнению Н.Ф.Докучаева и М.С.Смирнова для описания кинетики сушки:

$$\theta = \theta_0 + \tau/(A+B\tau) \quad (16)$$

Принятая форма уравнения кинетики нагрева дала удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Далее были обобщены данные по кинетике нагрева и получены уравнения регрессии в зависимости от коэффициентов А и В от факторов W_0 и t следующего вида

$$A, B = b_0 + b_1 W_0 + b_2 t + b_{12} W_0 t \quad (17)$$

В качестве примера на рис. 3 приведены кривые нагрева и сушки сои, рассчитанные по полученным уравнениям регрессии с учетом обобщенных данных по коэффициентам К, А и В. На этих же кривых нанесены экспериментальные точки во всех опытах.

Исследовали также влияние начальной влажности зерна нуга, кормовых бобов, сои и чечевицы на изменение некоторых (в зависимости от назначения) показателей их качества. Определяли содержание сырого протеина, перевариваемость белка и содержание ингибиторов трипсина. Кроме того, определяли трещиноватость зерна, имеющую важное значение для зерна, предназначенного для длительного хранения. Методики определения указанных показателей были использованы стандартные и общепринятые.

Совместный анализ кривых нагрева бобовых и показатели их качества позволил уточнить предельно допустимые температуры нагрева зерна, идущего на хранение и кормовые цели, температура нагрева зерна не должна превышать 40°C для нуга, сои и чечевицы и 35°C для кормовых бобов. Это может быть обеспечено при температурах агента сушки до 60°C при односторонней продувке.

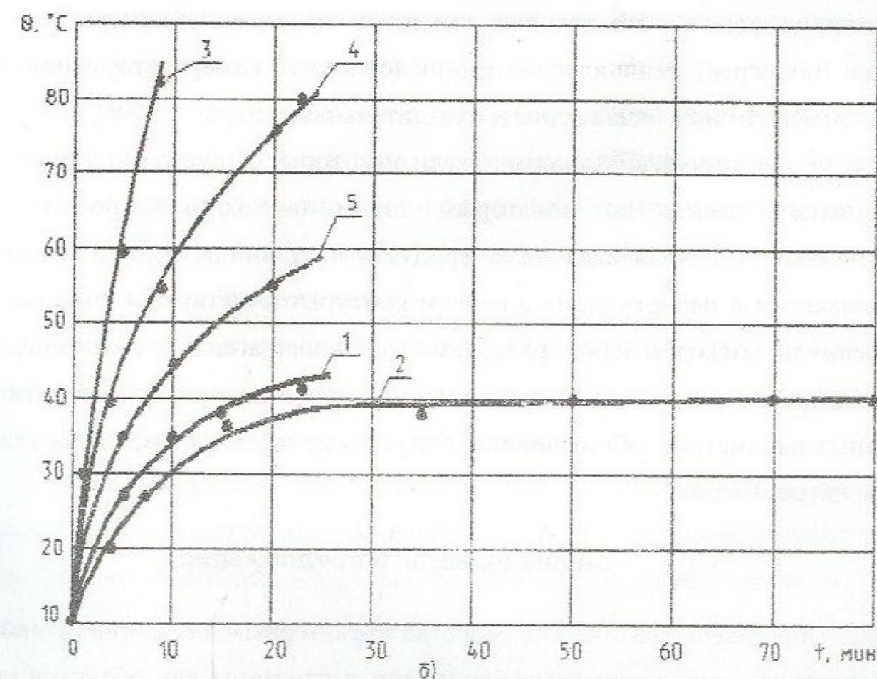
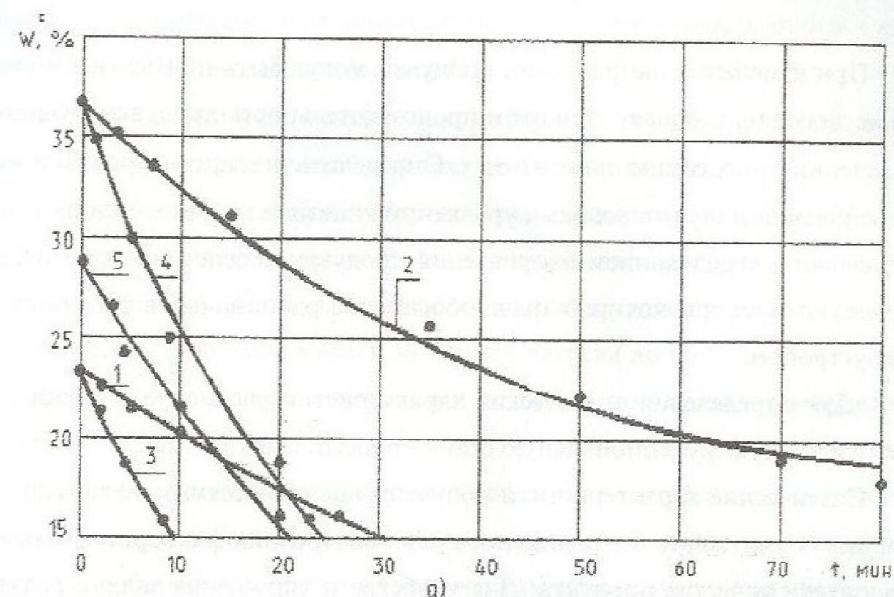


Рис. 3 Кинетические закономерности сушки (а) и нагрева (б) сои в плотном слое ($h=0.1\text{м}$; $V=0.3\text{м/с}$; 1,2 - $t=60^\circ\text{C}$; 3,4 - $t=120^\circ\text{C}$; 5 - $t=90^\circ\text{C}$)

При изменении направления продувки могут быть применены более высокие значения t , однако при этом продолжительность продувки в одном направлении существенно зависит от t . Определить это время продувки можно на основании полученных нами уравнений кинетики нагрева. Указанный способ сушки с чередованием направления продувки обеспечивается в шахтных зерносушилках, для которых была обоснована рациональная работа выпускных устройств.

Для определения статических характеристик рассмотрели обобщенную схему и полную функциональную схему процесса сушки зерна.

Статические характеристики получали аналитическими методами, которые могут учитывать и влияние побочных внутренних факторов на конечные показатели качества продукта. Для удобства и упрощения задачи разделили сушилку условно на 5 отдельных элементов: накопление; камера первичной сушки (подогрев); теплообменник (отлежка); камера вторичной сушки или промежуточное охлаждение и охлаждающая камера.

С целью упрощения анализа ввели некоторые допущения: температуры сушильного агента по некоторым зонам постоянны, процесс сушки устойчивый, конечная влажность продукта постоянная, потери теплоты не учитываются и рециркуляция в первом контуре отсутствует. Основные соотношения по расходам зерна, расходам сушильного агента и его температуры приведены в диссертации. Это позволило установить пределы изменения режимных параметров, обеспечивших допустимые пределы изменения температуры нагрева зерна.

Общие выводы и предложения

1. Определены физические свойства характерных для Сирий зернобобовых культур - нута, кормовых бобов, сои и чечевицы как объектов сушки, установлена их термоустойчивость. Определено, что качество зерна

значительно снижается при температурах нагрева кормовых бобов - свыше 35°C , нута, сои и чечевицы - свыше 40°C .

2. Установлены кинетические закономерности нагрева и сушки зернобобовых культур при различных условиях ведения процесса.

3. Выявлено, что скорость нагрева зернобобовых культур до допустимых температур в кипящем слое в 4...16 раз превышает скорость нагрева их в плотном слое и в 4...6 раз увеличивается скорость удаления влаги, однако общее количество удаляемой влаги за период нагрева до предельно допустимой температуры значительно снижается и не всегда достигает нормированного значения.

4. Для достижения нормированной влажности определены параметры и установлена рациональность применения ступенчато чередующегося приема сушки зернобобовых культур с циклическим понижением температур, организацией прямой и обратной продувки, отлежки и охлаждения при энергоэкономных затратах теплоносителей.

5. Установлено сравнительное влияние толщины слоя h , скорости v и температуры t сушильного агента и начальной влажности продукта W_0 на скорость нагрева и обезвоживания и составлены уравнения регрессии, позволяющие установить количественную оценку влияния факторов на кинетику процессов сушки и обезвоживания.

6. Составлены математические описания кинетики нагрева зернобобовых культур и определены эмпирические коэффициенты для неполных уравнений регрессий второго порядка.

7. Получены статические характеристики процесса сушки зернобобовых культур по основным возможным каналам управления, позволяющие определить пределы изменения управляющих параметров, обеспечивающих заданные допустимые пределы температур нагрева и влажности зерна на выходе.

8. Определены режимы и характеристики переходных процессов, обеспечивающих сохранение качества продукта и снижение затрат энергии на сушку.

9. Разработаны рекомендации и составлены расчетные решения по стабилизации выбранных режимов сушки при снижении затрат и обеспечении заданных показателей качества продукта.

10. Ожидаемая расчетная годовая экономическая эффективность от использования результатов работы составляет около 1 млн. ливр САР.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Альхоган Адель, В.В.Шведов. Выбор каналов управления сушилками/Сб."53-я научная конференция института".-Одесса,ОТИПП,1993.-с.226.
2. Альхоган Адель. Принципы вибору систем управління сушарками/Сб."Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість".-Київ,КТІХП,1993.-с.65.
3. Альхоган Адель, Остапчук Н.В. Зависимость качества продукта от динамических характеристик сушилок/Сб." 53-я научная конференция института".-Одесса,ОТИПП,1993.-с.227.
4. Остапчук Н.В., Альхоган Адель. Вплив динамічних характеристик сушарок на якість продукту/Сб."Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість".Тези доповідей-Київ,КТІХП,1993.-с.65.
5. Расчет режимов активного вентилирования зерна в силосах элеваторов/Олизаровский А.Б., Силиев З.К., Альхоган Адель, Тастанбеков С.Т., Овсянникова Л.К., Информационный сборник,вып.4.-М.:ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1993. с.3-8.
6. Альхоган Адель, АхмедДжозеф. Кинетика сушки пшеницы.Сб."55-я научная конференция ОГАПТ"-Одесса, ОГАПТ, 1995.-с.41.

АНОТАЦІЯ

Альхоган Адель. Кінетика сушіння деяких зернобобових культур.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.18.12 - процеси та апарати харчових виробництв, Одеська державна академія харчових технологій, Одеса, 1995.

Захищається 6 наукових робіт, які містять результати теоретичних та експериментальних досліджень з кінетики сушіння зернобобових культур - пшениці, кормових бобів, сої та сочевиці. На основі експериментальних досліджень кінетики складено її математичний опис та створені алгоритми для визначення режимів сушіння і конструктивних параметрів сушарок. Розроблені рекомендації для використання досліджень у виробництві.

Ключові слова : сушіння, боби, кінетика, режими, математичний опис, алгоритм.