

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Ульяновский государственный аграрный  
университет имени П.А. Столыпина»

Утверждаю	Утверждаю
 Декан инженерного факультета	 Первый проректор – проректор по научной работе
 Павлушин А.А.	 Исайчев В.А.
«15» января 2019 г.	» января 2019 г.

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ УСТАНОВОК КОНТАКТНОГО ТИПА  
ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

Методические рекомендации

Ульяновск 2019

В методических рекомендациях определены перспективы практического использования полученных математических моделей процессов тепловой обработки зерна при разработке новых энергосберегающих средств механизации процессов тепловой обработки зерна, реализующих контактный нагрев обрабатываемого продукта; условия численной реализации математических моделей процессов тепловой обработки зерна; пределы использования теории тепло-, массо- и влагопереноса при обосновании оптимальных режимов процессов тепловой обработки зерна в установках контактного типа.

**Исследования проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект: «Научное обоснование теоретических основ моделирования тепло- массообменных процессов при создании энерго- ресурсосберегающих, экологически безопасных технических систем», регистрационный номер 18-48-730039.**

Авторы:

- Павлушин Андрей Александрович;
- Курдюмов Владимир Иванович;
- Карпенко Галина Владимировна;
- Сутягин Сергей Алексеевич;
- Агеев Пётр Сергеевич.

Рецензент: Зыкин Евгений Сергеевич, директор технологического института – филиала ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ, доктор технических наук, профессор

## **1 Основы моделирования процессов тепловой обработки зерна**

Научное обоснование, разработка и внедрение новых технологий тепловой обработки зерна заключается в решении комплекса взаимосвязанных задач, к которым относят исследование и учёт свойств зерна, выбор способа подвода теплоты и обоснование оптимального режима теплового воздействия, расчёты тепло- и влагопереноса и тепло- и влагообмена, конструктивное оформление тепловых установок, оснащение их современными контрольно-измерительной аппаратурой, а также системами автоматического регулирования и управления и т. п.

На начальном этапе создания энергоэффективных средств механизации тепловой обработки зерна указанные задачи решают, используя моделирование. Это позволяет обосновать не только оптимальные режимы теплового воздействия и конструктивные параметры разрабатываемых средств механизации, но и выбрать наиболее целесообразный (рациональный) способ управления этими процессами в производственных условиях.

Моделирование процессов теплового воздействия на зерно, как и средств механизации реализующих эти процессы, основывается на изучении динамических систем и процессов, происходящих при тепловой обработке. При этом используют различные виды моделирования, среди которых - физическое, информационное, математическое и др.

Физическое моделирование осуществляют различными способами. Принципиальной особенностью такого моделирования является полное или частичное сохранение физической природы изучаемого процесса. Так, физические модели процессов тепловой обработки зерна представляют в виде систем уравнений, описывающих характер изменения режимных и конструктивных параметров (системы уравнений, характеризующие особенности перемещения зерна в установках для тепловой обработки зерна (УТОЗ) транспортирующим рабочим органом, системы уравнений, характеризующие механизм тепло-, влагообмена и тепло-, влагопередачи при

тепловом воздействии на зерно и т. д.), а также в виде функциональных схем, раскрывающих механизм теплового воздействия на зерно.

Физические модели разрабатываемых средств механизации, реализующих процессы теплового воздействия на зерно, могут быть представлены в виде опытных установок, позволяющих получить идентичные копии реальных динамических систем и процессов, протекающих при воздействии на зерно теплотой. При этом некоторые элементы системы воссоздаются моделями, обладающими и отличительной физической природой.

Следует отметить, что физическое моделирование УТОЗ начало применяться значительно раньше, чем математическое моделирование. Это объясняется тем, что аналитические методы расчёта тепловых установок и протекающих в них процессов теплового воздействия на зерно очень сложны.

Тепловую обработку зерна в установках с контактным способом передачи теплоты можно представить в виде функциональной физической модели параметрических зависимостей (рисунок 1).

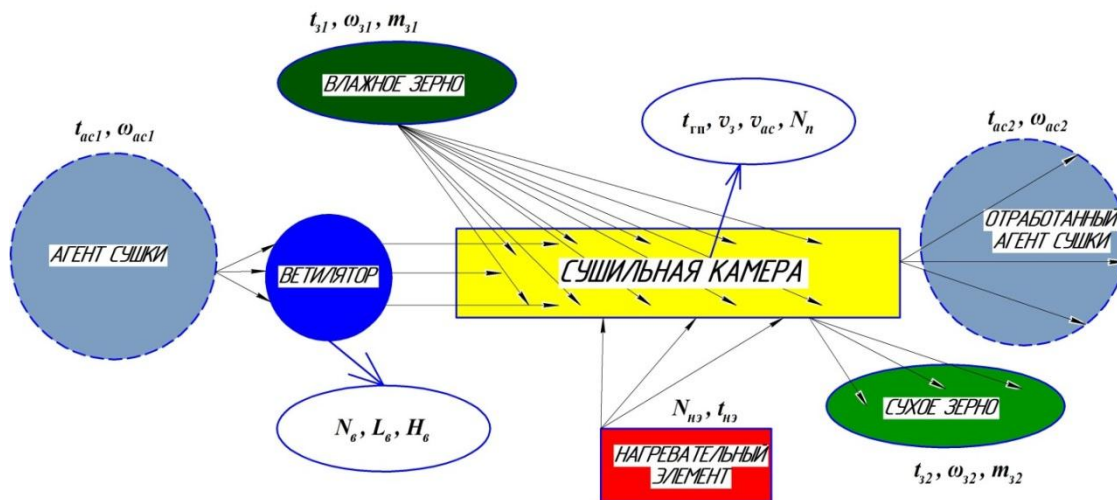


Рисунок 1 – Функциональная физическая модель теплового воздействия на зерно в установке контактного типа:

$t_{ac}$  – температура агента сушки, °С;  $\omega_{ac}$  – влажность агента сушки, %;  $t_з$  – температура зерна, °С;  $\omega_з$  – влажность зерна, %;  $m_з$  – масса зерна, кг;  $t_{гп}$  – температура греющей поверхности, °С;  $v_з$  – скорость движения зерна, м/с;  $v_{ac}$

– скорость движения агента сушки, м/с;  $N_{\text{п}}$  – мощность, требуемая на привод транспортирующего рабочего органа, кВт;  $N_{\text{нэ}}$  – мощность, потребляемая нагревательным элементом, кВт;  $t_{\text{нэ}}$  – температура нагревательного элемента, °С;  $N_{\text{в}}$  – мощность, потребляемая вентилятором, кВт;  $L_{\text{в}}$  – производительность (подача) вентилятора, м<sup>3</sup>/ч;  $H_{\text{в}}$  – давление (напор), создаваемое вентилятором, Па

В рассматриваемом случае на зерно, находящееся в сушильной (тепловой) камере, воздействуют воздушный поток, создаваемый вентилятором и теплота, передающаяся от нагревательных элементов. В конечном итоге эта модель характеризуется такими параметрическими факторами, как пропускная способность устройства для тепловой обработки зерна  $Q$ , кг/ч, и суммарные удельные энергозатраты на процесс испарения влаги из зерна  $q$ , МДж/кг.

Информационную модель технологического процесса теплового воздействия на зерно в установке с контактным способом подвода теплоты можно представить в следующем виде (рисунок 2).

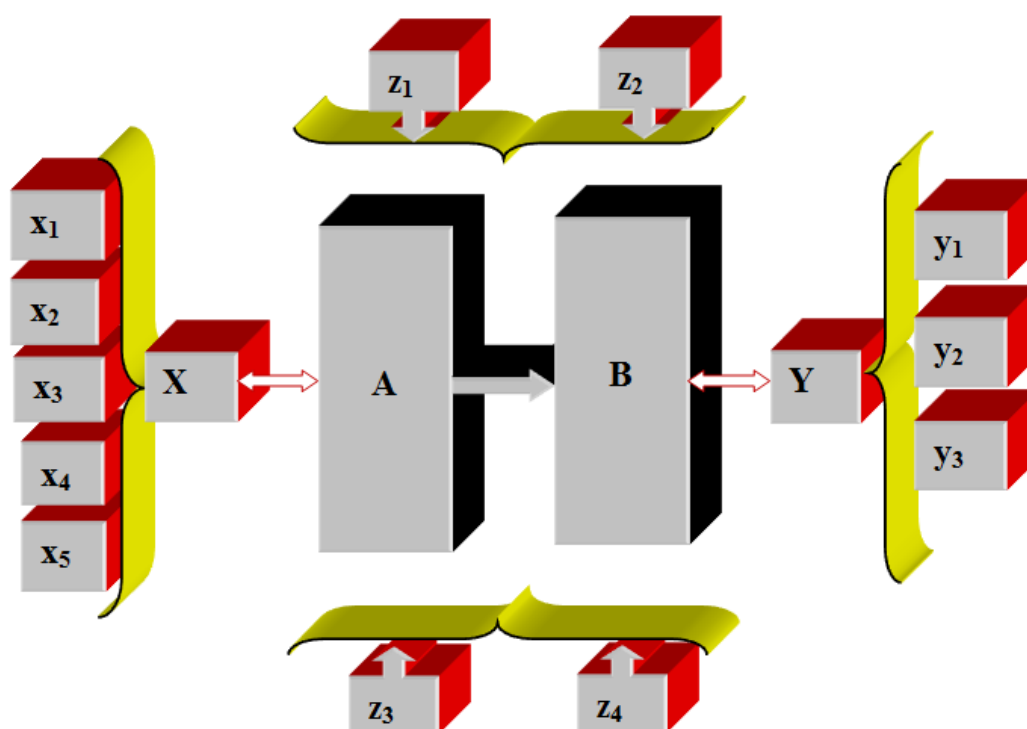


Рисунок 2 – Информационная модель теплового воздействия на зерно в установке контактного типа

В этой модели, построенной по типу «вход-выход», примем, что

процесс теплового воздействия на зерно - это система мероприятий и средств, направленная на преобразование исходного состояния зерна (массив А) в продукцию различного назначения: продовольственное, фуражное и семенное зерно (массив В).

При этом массив А (вход модели) характеризует вектор-функция внешних факторов (возмущений):

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, \quad (1)$$

где  $x_1$  – исходная влажность зерна;  $x_2$  – исходная температура зерна;  $x_3$  – вид зерновой культуры;  $x_4$  – температура окружающего воздуха;  $x_5$  – влажность окружающего воздуха.

В качестве выходной переменной (массив В) принимаем вектор-функцию качественных показателей процесса теплового воздействия:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3\}, \quad (2)$$

где  $y_1$  – конечная влажность зерна;  $y_2$  – температура зерна на выходе из тепловой камеры;  $y_3$  – травмируемость зерна.

Управляющими воздействиями в рассматриваемой модели являются: скорость движения зерна в УТОЗ  $z_1$ , средняя температура греющей поверхности  $z_2$ , скорость движения воздушного потока в тепловой камере  $z_3$ , направление движения воздушного потока в тепловой камере по отношению к направлению движения обрабатываемого зерна (противоток, прямоток и т. д.)  $z_4$ .

Математическое моделирование процессов теплового воздействия в УТОЗ характеризуется системами уравнений, связывающих выходные переменные с входными воздействиями, или взаимосвязью параметра (критерия) оптимизации процесса теплового воздействия на зерно с независимыми действующими факторами.

Этапы математического моделирования при планировании эксперимента по определению оптимальных режимных параметров процесса теплового воздействия на зерно в установках с контактным способом подвода теплоты можно представить в виде следующей схемы (рисунок 3).

Параметр оптимизации процесса теплового воздействия на зерно должен быть: эффективным с точки зрения достижения цели, универсальным, статистически эффективным, имеющим физический смысл, легко вычисляемым. Так, для характеристики процесса сушки зерна таким параметром служит показатель суммарных удельных затрат энергии на 1 кг испарённой влаги  $q$ , кДж/кг, представляющий собой отношение расходуемой на сушку теплоты  $Q$ , кДж, к количеству испарённой влаги  $M$ , кг.

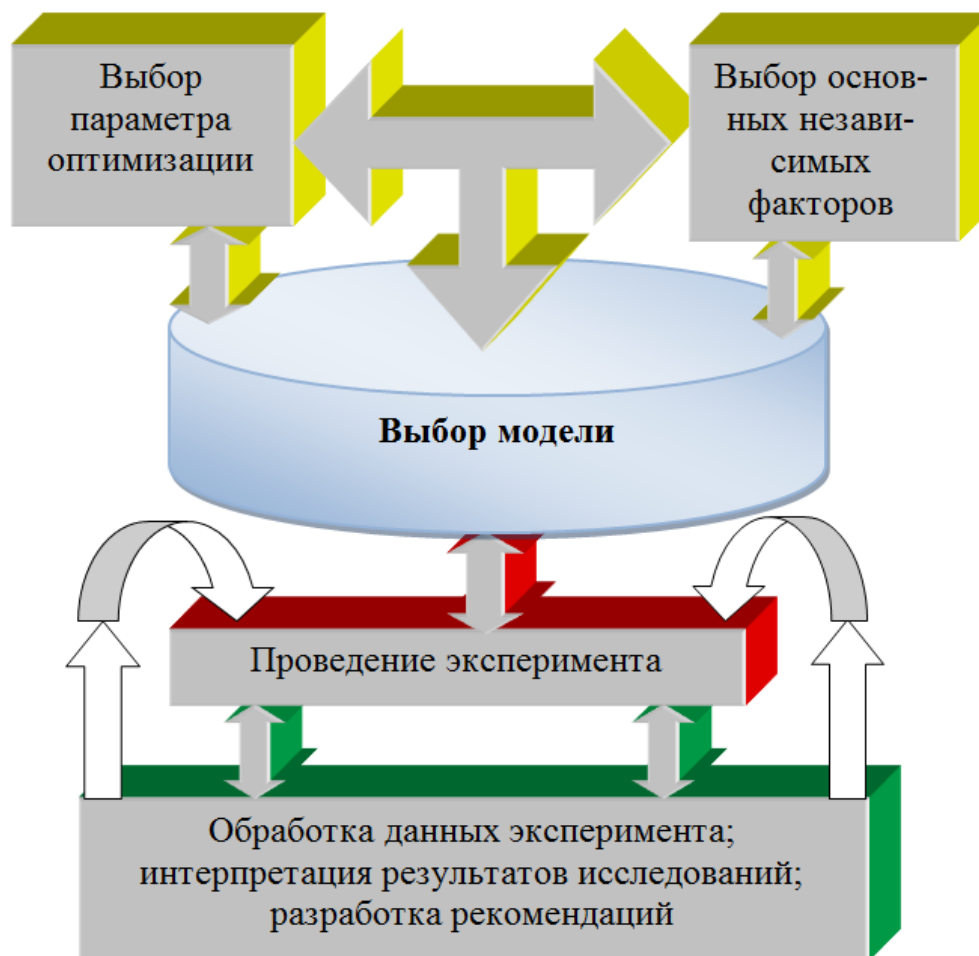


Рисунок 3 – Этапы математического моделирования при планировании экспериментов по исследованию теплового воздействия на зерно

Выбранные независимые факторы (количественные и качественные), характеризующие процесс теплового воздействия на зерно, должны непосредственно воздействовать на объект исследования. В совокупности действующие факторы должны обладать совместимостью и отсутствием линейной корреляции.

После выбора параметра оптимизации и действующих факторов

переходят к выбору математической модели исследуемого процесса теплового воздействия, под которой понимают вид функции отклика. Основное требование к модели - это способность предсказывать с требуемой точностью направление дальнейших опытов (адекватность модели).

Важным требованием при проведении эксперимента является уменьшение случайных и систематических ошибок опыта. Особое внимание при этом уделяют проверке однородности дисперсий, так как это одна из предпосылок, лежащих в основе корреляционно-регрессионного анализа. Для проверки однородности дисперсий используют критерии Кохрена или Бартлета.

Обработку полученных результатов эксперимента осуществляют различными статистическими методами – методом наименьших квадратов, корреляционно-регрессионным анализом. При этом необходимо проверить адекватность полученной модели по критерию Фишера и значимость коэффициентов полученных регрессий по критерию Стьюдента.

Комплексное использование принципов математического моделирования и математической теории больших систем, а также достижений современной вычислительной техники позволяет перейти от сложной реальной модели процесса теплового воздействия на зерно, как нестационарного и обратимого процесса, к его формализованной математической модели.

В этом случае на вход формализованной физико-химической системы поступают потоки сплошной среды, характеризующиеся вектором входных переменных (составом и параметрами состояния отдельных фаз), которые в процессе обработки под действием технологических факторов преобразуются в вектор выходных переменных. При этом реальная зависимость заменяется её математической моделью, в которой отображают зависимость вектора выходных переменных от входных переменных и переменных состояния объекта тепловой обработки во времени. В явном виде модель является замкнутой системой аналитического описания



процесса в виде уравнений регрессии, дифференциальных, интегральных и дифференциально-интегральных уравнений с соответствующими краевыми условиями и эмпирическими соотношениями.

## **2 Основы разработки установок для тепловой обработки зерна**

При разработке установок для тепловой обработки зерна учитывают физические законы и физико-химические соотношения, которым подчиняются технологические процессы теплового воздействия на зерно, а также общие методы проведения исследований разрабатываемых средств механизации и их расчётов. Процессы тепловой обработки зерна являются нестационарными и, в ряде случаев, обратимыми процессами (например, сушка зерна), протекающими в основном с переменной (убывающей) скоростью, и поэтому расчёт кинетики процессов представляет значительные трудности. В результате этого расчёта должна быть определена продолжительность теплового воздействия (экспозиция), которая при заданных пропускной способности УТОЗ и режимных показателях процесса определяет габариты тепловой камеры (пространства, в котором непосредственно происходят процессы теплового воздействия на зерно). В ряде случаев практический интерес представляет также решение обратной задачи, т. е. расчётное определение оптимальных режимных параметров, обеспечивающих заданную пропускную способность УТОЗ и соответствующие технологические требования (температуру нагрева зерна на выходе из тепловой камеры, разовый влагосъём, конечную влажность зерна после теплового воздействия и т. д.).

Анализируя процессы тепловой обработки зерна в общем виде, можно выделить пять уровней иерархий физико-химических явлений, протекающих при этом. Эти уровни в свою очередь соответствуют пяти уровням исследований явлений протекающих при тепловом воздействии на зерно (рисунок 4).

В настоящее время расчёт процессов тепловой обработки и средств механизации, реализующих эти процессы, ведут в основном на

макроскопическом уровне, что соответствует III и IV уровням иерархии системного анализа, однако уже имеются определённые данные и перспективы более глубокого проникновения в механизм процессов тепловой обработки на атомарно-молекулярном уровне, т. е. на I уровне иерархии.



Рисунок 4 – Уровни исследований теплового воздействия на зерно

До недавнего времени процесс теплового воздействия в основном изучали как макропроцесс, а объект тепловой обработки (зерно) рассматривали как непрерывную модель, в которой отдельные фазы представлены в виде сплошной среды, равномерно распределённой в объёме зернового материала, подвергающегося тепловому воздействию. В настоящее время, в связи с широким использованием новых физических эффектов в условиях воздействия внешних полей целесообразно более глубоко проникнуть в сущность микропроцессов и рассматривать объект тепловой обработки как корпускулярную модель, физические свойства которой обусловлены молекулярной структурой зерна и силами взаимодействия между образующими его молекулами, атомами и ионами.

Такой подход к изучению процессов тепловой обработки зерна уже даёт положительные результаты при анализе явлений, развивающихся внутри зернового материала при взаимодействии влаги с зерном, подвергаемым тепловому воздействию. Так, выявлены причины образования различных

форм связи влаги, а также вскрыты специфические особенности влияния различных способов подвода теплоты к обрабатываемому зерну на удаление из него влаги.

В связи с этим на современном этапе тепловое воздействие на зерно следует рассматривать как процесс разделения фаз в гетерогенных системах в условиях взаимодействия внешних и внутренних полей, причем определяющее влияние имеет начальная стадия этого взаимодействия – импульс.

При этом целесообразно использовать понятие «импульс силы», или импульс начального теплового воздействия на зерно. Эта величина учитывает как начальную действующую силу процесса тепловой обработки зерна, так и продолжительность её приложения (экспозицию).

В соответствии с универсальным физическим принципом Ле-Шателье-Брауна, чем сильнее внешнее воздействие на объект теплового воздействия в начальный момент, тем интенсивнее протекают внутренние процессы, стремящиеся вернуть систему в состояние равновесия. К примеру, все методы обобщения кривых сушки и расчёта продолжительности процесса теплового воздействия базируются на использовании скорости сушки в первый период (или скорости сушки в начале второго периода, если первый период отсутствует), которая является количественной мерой начального импульса.

Таким образом, при разработке УТОЗ необходимо создать условия, обеспечивающие эффективное протекание как внешнего тепло- и массообмена в тепловой камере, так и тепло- и массопереноса внутри объекта теплового воздействия (зерна).

При разработке современных энергоэффективных УТОЗ учитывают ряд требований, которые можно разбить на следующие группы (рисунок 5):

1. Технологические - обеспечение высокой эффективности и равномерности тепловой обработки при получении однородного высококачественного продукта во всем объёме тепловой камеры, с

заданными свойствами (конечные влажность и температура); комбинированность процессов теплового воздействия (возможность использования УТОЗ при различных тепловых воздействиях на зерно – сушка, обжаривание, термическое обеззараживание и т. д.).

2. Конструктивные - минимальная металлоёмкость, компактность, унифицированность (максимально возможное использование стандартных деталей и узлов), удобство монтажа и т. д.



Рисунок 5 – Требования к разработке УТОЗ

3. Эксплуатационные - безопасность, соответствие санитарным нормам, нормам пожарной безопасности, непрерывность процессов тепловой обработки, возможность включения УТОЗ в существующие технологические линии послеуборочной обработки зерна, удобство обслуживания и ремонта, эргономичность и т. д.

4. Кибернетические - соответствие требованиям автоматизации контроля, регулирования и управления процессами тепловой обработки и работой УТОЗ.

5. Техничко-экономические, которые, по существу, являются итогом

реализации перечисленных выше требований, к ним относят целый ряд показателей, причём некоторые из них желательно в определённых пределах максимизировать (MAX), а другие, наоборот, минимизировать (MIN) (рисунок 6).

В целом, максимально улучшая технико-экономические показатели УТОЗ, можно достичь минимума удельных приведённых затрат на испарение влаги (руб./кг).

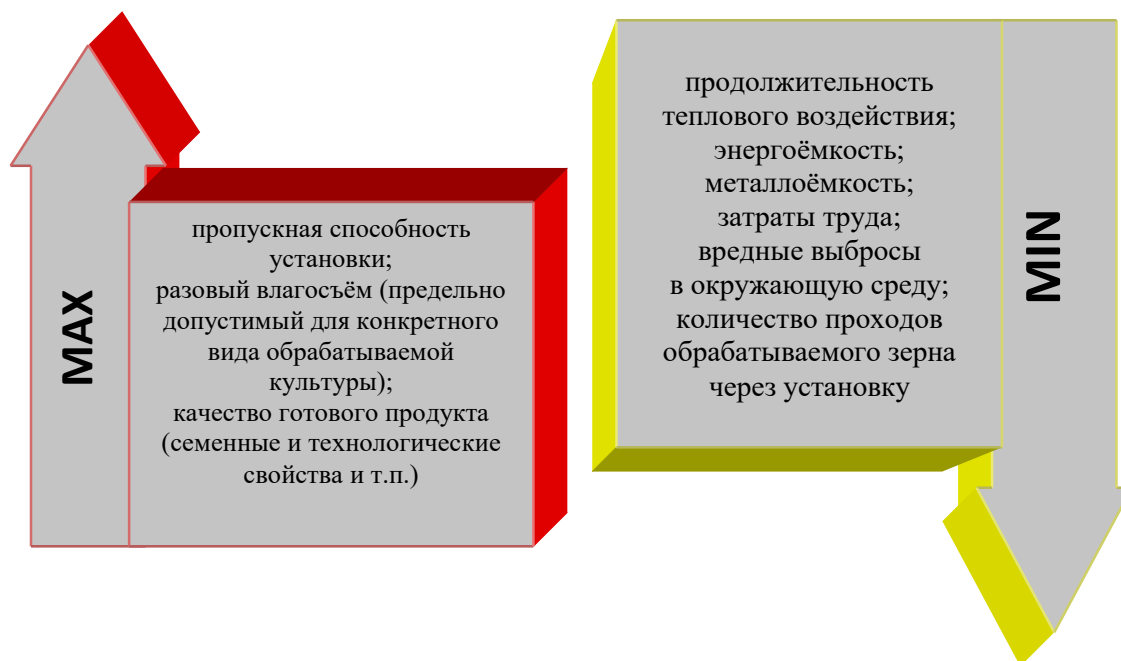


Рисунок 6 – Технико-экономические показатели УТОЗ

Разработку УТОЗ осуществляют поэтапно, в следующей последовательности (рисунок 7).



Рисунок 7 – Этапы разработки УТОЗ

Расчётный этап при разработке УТОЗ является наиболее

ответственным. При этом особенности расчёта УТОЗ с контактным способом подвода теплоты состоят в следующем.

Установки рассчитывают на основании условий, которые обычно содержат такие исходные данные как:

а) *по установке в целом*: 1) требуемая пропускная способность; 2) способ нагревания контактной поверхности (электронагрев, пар и т.п.); 3) способ загрузки и выгрузки зерна, наличие и тип транспортирующего рабочего органа;

б) *по обрабатываемому зерну*: 1) начальная и конечная влажность; 2) начальная и максимально-допустимая температура нагрева (предельная); 3) размерно-массовые характеристики; 4) теплофизические свойства; 5) допустимый разовый влагосъём;

в) *по режиму теплового воздействия*: 1) с обдувом или без обдува агентом сушки; 2) температура и влажность подаваемого агента сушки; 3) скорость движения агента сушки в тепловой камере; 4) направление движение агента сушки в тепловой камере (противоток, прямоток и т. д.).

Продолжительность тепловой обработки зерна в УТОЗ может быть задана или её следует вначале рассчитать по уравнениям кинетики процесса.

Примерная схема основных расчётов УТОЗ с контактным способом подвода теплоты включает в себя следующее.

*Расчёт тепловой камеры*: 1) расчёт массы испарённой влаги; 2) расчёт расхода электроэнергии; 3) расчёт габаритов тепловой камеры; 4) расчёт потерь теплоты в окружающую среду; 5) расчёт остальных потерь теплоты в тепловой камере; 6) расчёт общего расхода теплоты.

*Расчёт привода транспортирующего рабочего органа*: 1) выбор типа электродвигателя; 2) выбор и расчёт передающих элементов (вариатора, муфты и т. д.).

*Расчёт нагревательного элемента*: 1) выбор типа (огневой, электрический, паровой и т. д.) и вида (керамический, плёночный, трубчатый и т. д.) нагревательного элемента; 2) расчёт требуемой мощности

нагревательного элемента; 3) определение коэффициента теплопередачи; 4) определение площади поверхности нагрева.

*Расчёт системы вентиляции:* 1) разработка схемы воздуховода; 2) расчёт аэродинамических сопротивлений в УТОЗ; 3) определение расхода воздуха; 4) выбор вентилятора и расчёт мощности электродвигателя.

*Расчёт теплоизоляции:* 1) обоснование расчётной температуры наружной поверхности теплоизоляционного слоя; 2) выбор типа теплоизолирующего материала; 3) расчёт толщины теплоизолирующего слоя.

*Расчёт технико-экономических показателей УТОЗ.* На основании расчётных данных составляют таблицу указанных выше основных технико-экономических показателей установки (рисунок 2.2) для сравнения с показателями лучших, серийно выпускаемых установок. При этом апробируют выбранные на предварительном этапе разработки тип установки, способ подвода теплоты, параметры режима тепловой обработки и т. п. Предпочтение отдают наиболее рациональному экономическому варианту.

В частности, при тепловой обработке зерна в установках с контактным способом подвода теплоты значительного экономического эффекта можно добиться, обеспечивая единичный слой движения зернового материала в установке при электронагреве контактирующей с зерном поверхности с хорошей теплоизоляцией кожуха установки.

Интенсификации внешнего тепло- и влагообмена при контактном способе подвода теплоты достигают за счёт увеличения движущей силы обмена, т. е. градиента (разности) температуры греющей поверхности и обрабатываемого зерна. Этот градиент в большей мере зависит от режима теплового воздействия, в частности, от скорости движения зерна в установке, скорости движения агента сушки (в случае обработки зерна с обдувом нагретым воздухом) и площади поверхности их контакта.

Все вышеназванные особенности разработки УТОЗ можно представить в виде обобщённой схемы (рисунок 8).



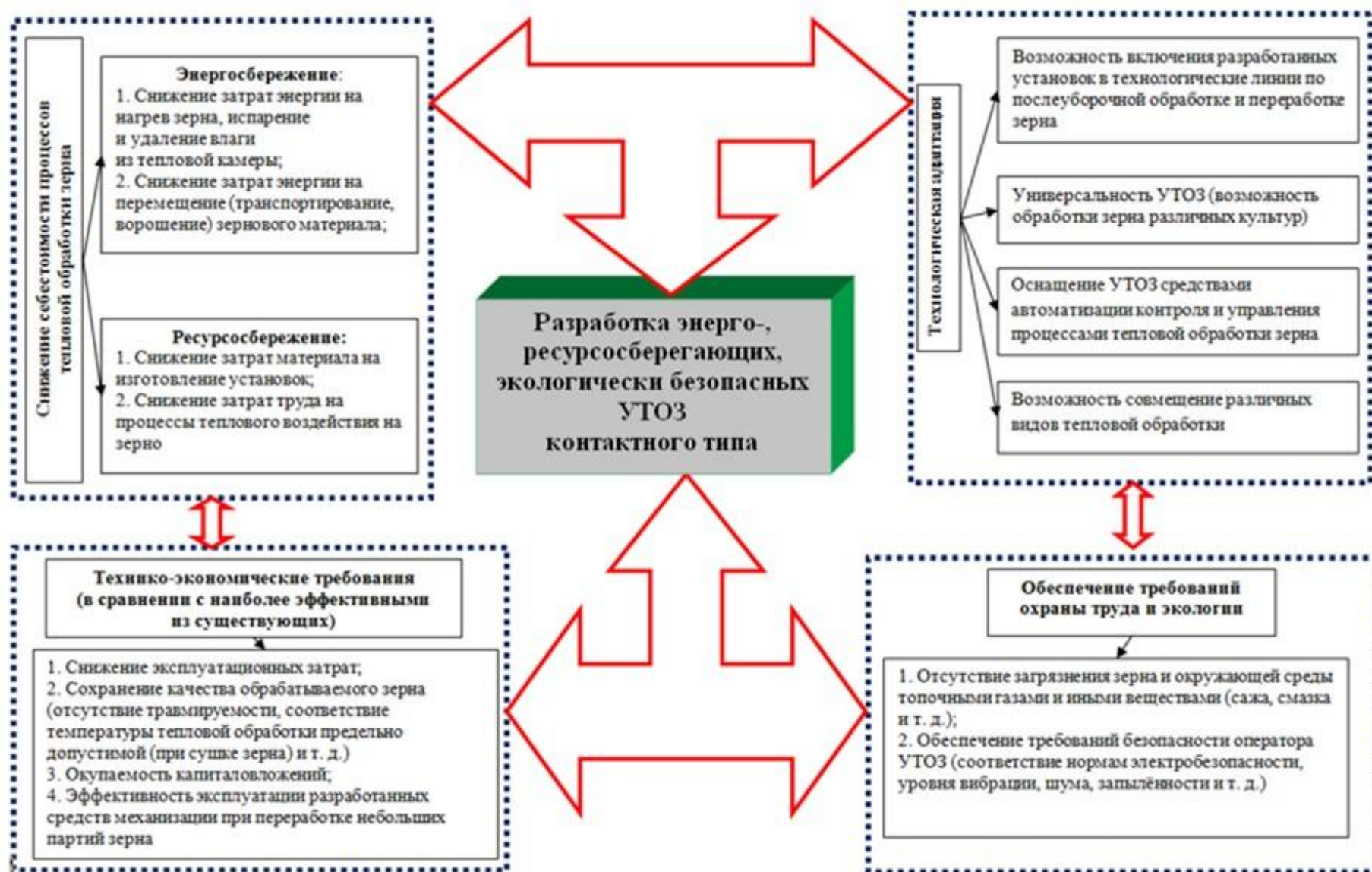


Рисунок 8 – Схема разработки УТОЗ



Каждый их блоков этой схемы включает технико-экономические, энерго,- ресурсосберегающие, экологические аспекты, а также требования технологической адаптации. Реализация указанных условий при разработке УТОЗ позволит создать энергоэффективные средства механизации. При этом необходимо учитывать влияние на процесс тепловой обработки зерна как каждого из блоков по отдельности, так и их взаимосвязи.

Следует отметить, что тепловая обработка зерна - это сложный технологический процесс, поэтому при разработке соответствующих установок основываются на законах, которые можно разбить на три группы.

1. Законы, устанавливающие количественные соотношения – фундаментальные законы сохранения массы и энергии. На основании этих законов составляют материальные и энергетические балансы разрабатываемых УТОЗ. Например, для тепловой камеры уравнение материального баланса имеет вид:

$$m_{з1} = m_{з2} + m_{вл}, \quad (3)$$

где  $m_{з1}$ ,  $m_{з2}$  - масса сырого и высушенного зерна соответственно, кг;  $m_{вл}$  - масса испарённой влаги, кг.

Уравнение энергетического баланса тепловой камеры УТОЗ контактного типа можно представить в виде:

$$A_{вх} = A_{ух} = \text{const}, \quad (4)$$

где  $A_{вх}$ ,  $A_{ух}$  - соответственно энергия, внесённая в тепловую камеру зерном, греющей поверхностью и воздухом, и энергия, уходящая из тепловой камеры, кДж.

Так как

$$A_{ух} = A_{пол} + A_{пот}, \quad (5)$$

где  $A_{пол}$  - полезно использованная энергия, кДж;  $A_{пот}$  - потери энергии, кДж, то в общем виде энергетический коэффициент полезного действия (КПД) установки

$$\eta_{эн} = A_{пол}/(A_{пол} + A_{пот}). \quad (6)$$

По существу, полезным расходом теплоты в УТОЗ являются затраты

энергии на испарение влаги. Тогда приближённо можно принять, что

$$\eta_{\text{эн}} \approx (q + q_{\text{св}})/q_{\text{общ}}, \quad (7)$$

где  $q$  – удельные затраты энергии на испарение, кДж/(кг·влаги);  $q_{\text{св}}$  – удельные затраты энергии на разрыв связи влаги с материалом, кДж/(кг·влаги);  $q_{\text{общ}}$  – общий расход энергии, кДж/(кг·влаги).

## 2. Законы, устанавливающие равновесные соотношения.

Влажность зерна, соответствующая состоянию равновесия, является равновесной влажностью  $\omega_p$ . Равновесное состояние обрабатываемого зерна (прекращение испарения влаги с его зерна) может быть достигнуто путём поглощения водяного пара из окружающего воздуха (сорбции) или же путём испарения влаги из зерна (десорбции).

Равновесная влажность,  $\omega_p$  высушиваемого зерна зависит от парциального давления пара в воздухе  $p_p$ , а, следовательно, и от его относительной влажности  $\varphi$ , так как

$$\varphi = p_p/p_n,$$

где  $p_n$  – давление насыщенного пара при данной температуре, Па.

Подобные зависимости для зерна графически можно представить в виде кривых -образной формы: изотермой сорбции при увлажнении зерна и изотермой десорбции при испарении влаги из зерна. Указанные изотермы частично не совпадают (при  $\varphi = \text{const}$  значение равновесной влажности высушиваемого зерна сорбции меньше, чем значение аналогичного показателя десорбции) – явление сорбционного гистерезиса.

На рисунке 9 представлена изотерма десорбции (кривая равновесной влажности). Каждая точка этой кривой соответствует равновесному состоянию обрабатываемого зерна при определённой влажности воздуха (агента сушки) в тепловой камере УТОЗ. При изменении влажности воздуха равновесие нарушается. Так, например, при относительной влажности воздуха  $\varphi_1$  высушиваемое зерно имеет равновесную влажность  $\omega_1$ .

Если же влажность воздуха увеличится до  $\varphi_2$ , то равновесное

состояние нарушится, влажность обрабатываемого зерна начнет возрастать за счет сорбции влаги из воздуха. Равновесие восстановится лишь при равновесной влажности зерна  $\omega_2$ , соответствующей влажности воздуха  $\varphi_2$ .

Зерно может поглощать влагу путём сорбции из окружающего воздуха лишь до гигроскопической влажности  $\omega_r$ , под которой понимают равновесную влажность зерна при полном насыщении воздуха ( $\varphi = 100\%$ ). Дальнейшее увлажнение зерна происходит лишь при непосредственном его контакте с влагой.

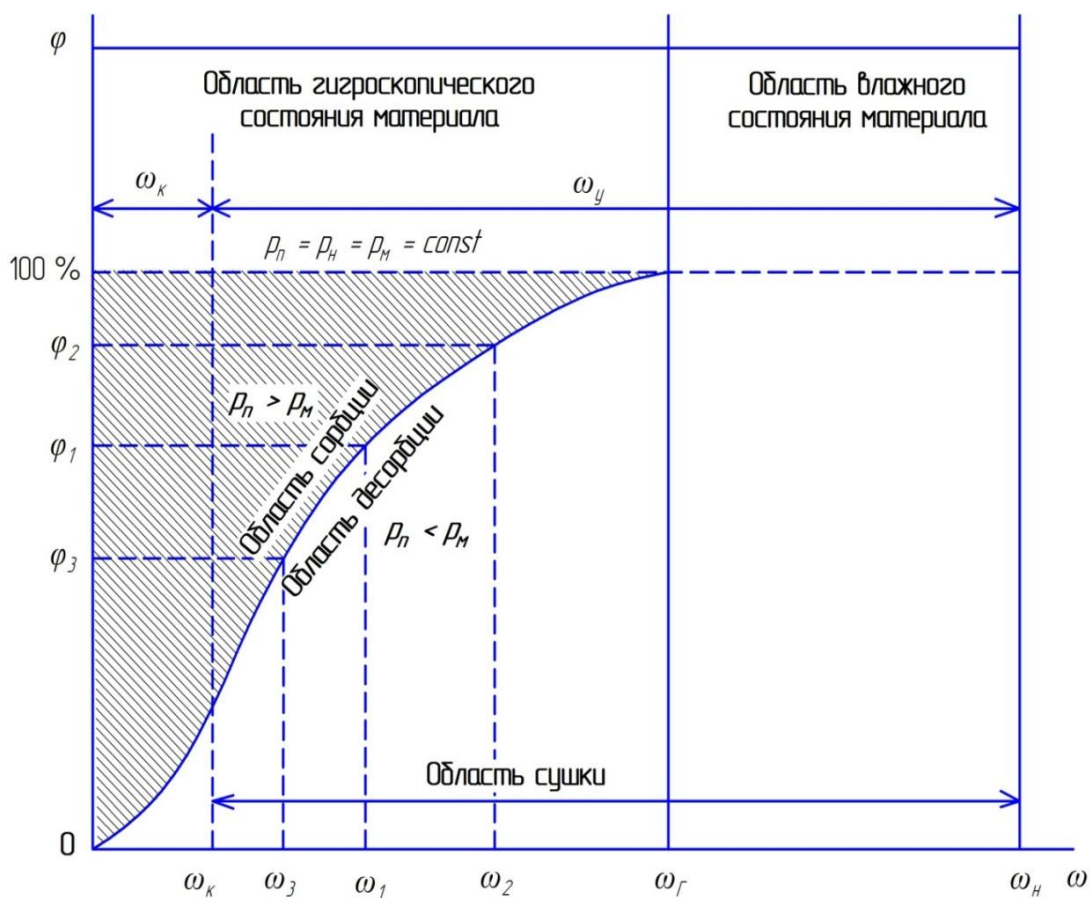


Рисунок 9 – Изотерма десорбции:

$\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;  $\omega_n, \omega_r, \omega_k$  – начальная, гигроскопическая и критическая (конечная) влажности высушиваемого зерна соответственно, %;  $\omega_y$  – удаляемая влага, %;  $p_n$  и  $p_m$  – парциальное давление пара в окружающем воздухе и у поверхности зерна соответственно, Па;  $p_n$  – давление насыщенного пара, Па

При понижении влажности агента сушки до  $\varphi_3$  влажность зерна, подвергаемого тепловому воздействию, уменьшится до  $\omega_3$  вследствие

десорбции влаги из зерна. Обезвоживание зерна путем десорбции влаги происходит до тех пор, пока не удалится вся свободная влага. Критическая влажность зерна  $\omega_k$  (конечное значение равновесной влажности) соответствует наличию в зерне лишь связанной влаги, которую нельзя удалить путём десорбции. В основном это химически связанная влага.

Кривая равновесной влажности (изотерма десорбции) разделяет площадь графика на две части: верхнюю, расположенную между кривой, осью ординат и прямой  $\varphi = 100\%$  - область сорбции; и нижнюю, ограниченную кривой, осью абсцисс и прямыми  $\omega = \omega_r$  и  $\omega = \omega_k$  - область десорбции.

Характерна на этом графике гигроскопическая точка ( $\omega = \omega_r$ ,  $\varphi = 100\%$ ): слева от неё располагается область гигроскопического, справа - область влажного состояния обрабатываемого зерна.

Область от  $\omega_n$  до  $\omega_k$  (ниже изотермы десорбции) является областью сушки. Так как при тепловом воздействии на зерно при определённых режимных параметрах (скорость подаваемого воздуха, температура греющей поверхности, экспозиция теплового воздействия и т.д.) можно удалить не всю влагу, а только довести влажность обрабатываемого зерна до равновесной  $\omega_p$ . При этом максимальное количество удаляемой влаги можно определить из выражения:

$$\omega_y^{\max} = \omega_n - \omega_k.$$

При проведении практических исследований процесса теплового воздействия на зерно широко используют следующие соотношения парциальных давлений пара над поверхностью обрабатываемого зерна  $p_3$  и в окружающем воздухе  $p_n$ :

если  $p_3 > p_n$ , протекает процесс десорбции (удаление влаги из зерна);  
движущая сила процесса  $p_3 - p_n$ ;

при  $p_3 < p_n$  протекает процесс сорбции (поглощение влаги зерном);

при  $p_3 = p_n$  наступает динамическое равновесие – процесс влагообмена прекращается.

Знание указанных соотношений необходимо для оценки гигроскопических свойств и теплофизических характеристик обрабатываемого зерна, что важно для выбора оптимальных режимов теплового воздействия, а также условий последующего хранения зерна.

В связи с тем, что влага в зерне находится в различных формах связи с его сухим скелетом, аналитическое получение общего уравнения изотерм затруднительно. Поэтому в инженерной практике для расчёта равновесной влажности используют эмпирические формулы, полученные путём обработки опытных данных.

Для расчёта удельных затрат энергии на разрыв связи влаги с обрабатываемым зерном ( $q_{св}$ ) применяют термодинамические методы, используя при этом зависимость между равновесной влажностью зернового материала и влажностью воздуха.

Наибольшее практическое применение имеет метод академика П.А. Ребиндера, который определил энергию связи  $q_{св}$  или работу отрыва единицы массы влаги от обрабатываемого зерна  $A$ , кДж, как уменьшение свободной энергии –  $\Delta A$ , кДж, при температуре  $t$ , °С, так как в результате связывания влаги с зерновым материалом снижается давление пара над его поверхностью, и свободная энергия соответственно снижается:

$$q_{св} = A = -\Delta A = R t \ln(p_n/p_u) = -R t \ln A_v, \quad (8)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·°С);  $p_n$  – давление насыщенного пара свободной влаги, Па;  $p_u$  – парциальное давление равновесного пара над зерновым материалом с влажностью  $u$ , Па;  $A_v$  – активность влаги,  $A_v = p_n/p_u$ .

Чем прочнее влага связана с зерновым материалом, тем меньше  $p_u$ , и наоборот, для свободной влаги  $p_u = p_n$ ,  $A_v = 1$ ,  $q_{св} = 0$ . В процессе теплового воздействия (сушки) на зерно по мере уменьшения его влагосодержания энергия связи увеличивается, так как повышается доля влаги, более прочно связанной с зерном (влага микрокапилляров и адсорбционно связанная влага).

3. Законы, определяющие скорость процессов тепловой обработки - их кинетику. К этой группе относят законы нестационарного тепловлагообмена и тепловлагопереноса. Например, такой вид теплового воздействия на зерно как его сушка, после первой критической влажности протекает с убывающей скоростью: чем ближе текущая влажность зернового материала к равновесной, тем меньше скорость процесса теплового воздействия. Поэтому в расчёте УТОЗ учёт кинетики процесса теплового воздействия имеет решающее значение.

В конце процесса тепловой обработки зерна обычно удаляется влага, прочно связанная с его сухим скелетом, что обуславливает не только уменьшение скорости тепловой обработки, но и требует подвода дополнительной энергии, которая затрачивается на преодоление энергии связи.

В общем виде уравнение внешнего влагообмена при тепловом воздействии на зерно может быть представлено следующим образом:

$$i_m = a_{mp}(p_m - p_n) B_{\text{норм}}/B, \quad (9)$$

или

$$i_m = a_{mi}\rho_0(u_n - u_p), \quad (10)$$

где  $i_m$  - интенсивность испарения влаги, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $a_{mp}$ ,  $a_{mi}$  - коэффициенты внешнего влагообмена, отнесенные к разности парциальных давлений пара, или к разности влагосодержаний соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $B_{\text{норм}}$ ,  $B$  - нормальное барометрическое давление и фактическое общее давление в сушильной камере соответственно, Па;  $\rho_0$  - плотность абсолютно сухого зернового материала, кг/м<sup>3</sup>;  $u_n$ ,  $u_p$  - соответственно влагосодержание на поверхности зерна и равновесное, кг влаги/(кг сух. вещества).

Следует учесть, что в связи со сложной зависимостью коэффициентов влагообмена от текущей влажности обрабатываемого зернового материала, а также из-за интенсивного углубления поверхности (зоны) испарения внутрь зерна во второй период сушки эти коэффициенты изменяются, и поэтому

использование формул (7), (8) в инженерных расчётах УТОЗов ограничено. Лучшее приближение к реальности даёт расчёт кинетики процесса теплового воздействия по зонам, при этом влагокоэффициенты считают постоянными только в пределах определённой зоны.

Вышеуказанные условия относят к первому классу прямых способов расчёта.

В практических расчётах тепловых установок с контактным способом передачи теплоты важное значение имеет второй класс, к которому относят обратные задачи расчёта. В этом случае при ограничивающих условиях (обусловленных технологическими требованиями, такими как максимально допустимая температура нагрева, поверхностный градиент влажности и т. п.) определяют параметры оптимального режима процесса тепловой обработки зерна, обеспечивающие наибольшую эффективность процесса в соответствии с принятым критерием оптимизации.

В соответствии с изложенным выше общие методы расчёта УТОЗ можно разделить на три группы.

1. Приближенные инженерные расчёты - выбор типового оборудования осуществляют по действующим нормативным документам или эмпирическим зависимостям. Например, при расчёте барабанных или распылительных зерносушилок объем сушильной камеры определяют по нормативному коэффициенту - напряжению по влаге  $A_v$  [кг вл./( $m^3 \cdot ч$ )].

2. Статические инженерные расчёты используют при обосновании периода постоянной (средней) скорости сушки зерна  $U$ , кг вл./ч. Обычно эти расчеты проводят на основании балансовых уравнений с использованием  $I-d$  – диаграммы (где  $I$  – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг сухого воздуха;  $d$  – влагосодержание влажного воздуха, кг/кг сухого воздуха), что правомерно при протекании процесса тепловой обработки зерна в первый период или с определённым приближением при незначительном изменении скорости процесса во втором периоде. Следует также учесть, что  $I-d$  -диаграмма построена для влажного воздуха, и она не учитывает свойства зерна, как

объекта теплового воздействия и тем более кинетику процесса. В связи с этим ценное практическое значение имеют проведённые исследования по развитию  $I-d$  -диаграммы и нанесению на неё линий, характеризующих гигроскопические свойства зерновой культуры, подвергаемой тепловому воздействию, а также создание  $I_M-d$  -диаграмм влажного зерна и комбинированной  $I-u-d$  – диаграммы (где  $I_M$  и  $u$  – соответственно энтальпия влажного зернового материала, кДж/кг сухого зерна и влагосодержание влажного зерна, кг влаги/кг сухого вещества).

3. Динамические расчёты, основанные на системах дифференциальных уравнений, описывающих изменение температуры и влагосодержания в локальных точках процесса тепловой обработки зерна. Эти расчёты отражают кинетику процесса тепловой обработки зерна в реальных условиях переменного режима в тепловой камере УТОЗ.

Статические и динамические методы расчёта УТОЗ дают возможность аналитически определить продолжительность теплового воздействия и уточнить габариты разрабатываемого средства механизации.

### **3 Особенности исследования процессов тепловой обработки зерна**

Исследование процессов тепловой обработки зерна проводят с целью экспериментального обоснования их оптимальных режимов. Методы исследования процессов тепловой обработки зерна можно разбить на три основные группы: аналитические, экспериментальные и синтетические.

Аналитическое исследование процессов тепловой обработки зерна осуществляется в следующей последовательности: а) математическое описание задачи; б) формулировка краевых условий; в) решение задачи. Необходимость формулировки краевых условий вызвана тем, что уравнения кинетики тепло- массопереноса в частных производных второго порядка описывают целый класс явлений и имеют бесчисленное множество решений. Для однозначного решения этих уравнений необходимо сформулировать начальное и граничные условия, отражающие конкретную обстановку протекания того или иного процесса теплового воздействия.



По характеру реализации аналитические исследования могут быть представлены в виде информационных и имитационных моделей. По степени влияния случайных величин на полученный результат эти модели классифицируют на детерминированные (при которых для данной совокупности входных значений на выходе системы может быть получен единственный результат) и стохастические (условия функционирования и характеристики состояния моделируемого объекта представлены случайными величинами и связаны стохастическими (т. е. случайными, нерегулярными) зависимостями).

При построении информационных моделей рассматривают распределение вероятностей исследуемых факторов в новом состоянии при известном начальном состоянии. Однако для вывода и обоснования таких уравнений в случае сложных процессов необходим не только достаточно высокий уровень развития теоретических представлений о процессе теплового воздействия, но и большой объем достоверной эмпирической информации о состоянии элементов системы.

При обосновании процессов тепловой обработки зерна, о характере протекания которых отсутствует достаточно полная информация, для построения функциональной зависимости используют имитационные модели. В этих моделях моделирующий алгоритм приближённо воспроизводит функционирование процесса теплового воздействия во времени, причём имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания. Моделирующий алгоритм позволяет по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии процесса (входная информация) и его параметрах, получить сведения о состоянии процесса в произвольные моменты времени.

Несмотря на то, что имитационные модели применимы к исследованию процессов тепловой обработки, они обладают существенным недостатком. Так, полученное решение носит частный характер, отвечая фиксированным

значениям параметров системы, входной информации и начальных условий.

Информационные и имитационные модели бывают преимущественно стохастическими. Поэтому обоснование процесса теплового воздействия с помощью моделей этого типа принято называть стохастическим моделированием.

Методы интерпретации результатов аналитических исследований можно разделить на следующие группы (рисунок 10).

Аналитическое решение возможно получить лишь для сравнительно простых систем. Если же рассматриваемая система сложна, то аналитическое решение выполнить невозможно. В этом случае исходную модель решают путём разбивки её на несколько более простых моделей (частных случаев) и получают частные зависимости, позволяющие изучить некоторые свойства системы. Дальнейшая же интеграция и интерпретация полученных частных решений позволяет получить общее решение исходной модели.

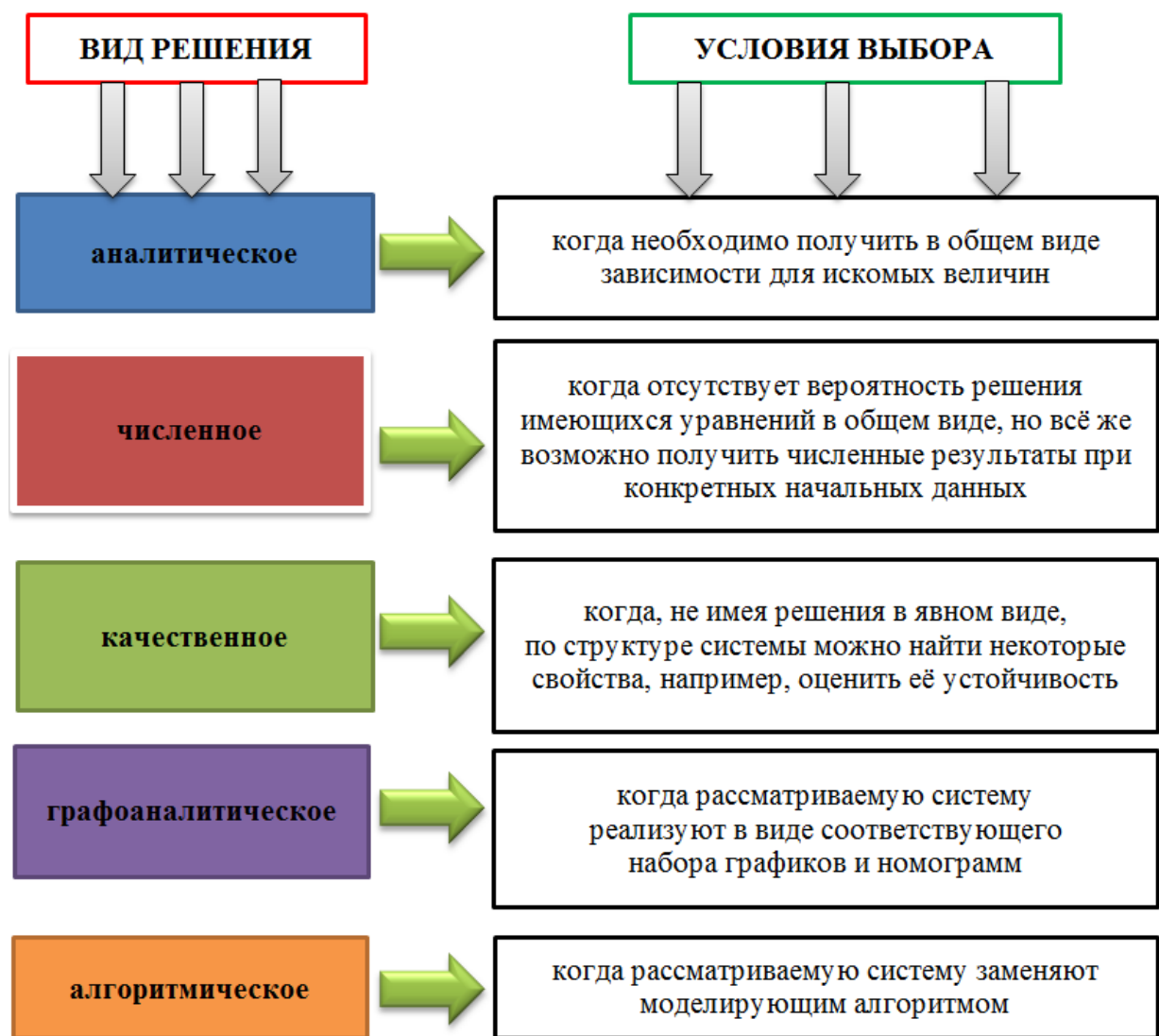


Рисунок 10 – Методы представления результатов аналитических исследований

Численные методы по сравнению с аналитическими практически применимы к значительно более широкому классу функциональных уравнений, однако полученные решения носят частный характер.

Графоаналитические методы являются синтезом аналитических и численных методов реализации аналитических исследований. Они позволяют обойти трудности, связанные с решением трансцендентных уравнений, просты и удобны в практической работе и потому получили наиболее широкое распространение в инженерной практике обоснования процессов теплового воздействия на зерно.

К примеру, широкое применение и развитие диаграммы влажного воздуха (*I-d* - диаграммы) свидетельствует о большом значении, которое она

имеет для расчета параметров влажного воздуха при протекании различных процессов теплового воздействия и, в частности, процесса сушки зерна.

Указанная диаграмма составлена, исходя из предположения, что обрабатываемое зерно отдаёт столько влаги, сколько может поглотить влагопоглотитель (агент сушки) определенных параметров. Между тем процесс теплового воздействия на зерно лимитирован внутренним переносом влаги и вследствие этого протекает с переменной (убывающей) скоростью. Диаграмма влажного воздуха позволяет увязать графоаналитический статический расчет с кинетикой процесса теплового воздействия.

Аналитические методы исследования учитывают основные закономерности процессов, протекающих в моделируемом объекте, качественно более правильно характеризуют его даже при наличии недостаточно точных в количественном отношении параметров модели. Поэтому с их помощью можно разрабатывать общие методы расчета. При возможности их полной реализации, по существу, отпадает необходимость в эксперименте, который в этом случае применяют для определения кинетических констант модели и для проверки адекватности полученных моделей.

В ряде случаев целесообразно использовать принцип суперпозиции, когда задачу со сложными краевыми условиями и переменными физическими характеристиками раскладывают на алгебраическую сумму простых задач, решения которых известны (например, в виде расчётных графиков, номограмм и т. п.). Также хорошие практические результаты даёт зональный расчёт с применением метода кусочно-ступенчатой аппроксимации.

Однако применение аналитических методов исследований не всегда возможно. В частности, когда отсутствует или весьма ограничен объём теоретических сведений об изучаемом процессе теплового воздействия, вследствие чего неизвестен ориентировочный вид соотношений, описывающих этот процесс. Даже если аналитические зависимости

получены, из-за их громоздкости и сложности их часто трудно применять в практических инженерных расчётах при разработке УТОЗ.

В связи с этим доминирующее практическое значение имеет экспериментальный метод исследования (рисунок 11).



Рисунок 11 – Последовательность выполнения экспериментального метода исследования

При проведении экспериментальных исследований процессов тепловой обработки зерна важно:

а) определить минимально необходимое число опытов и правильно поставить эксперимент; для этого широко применяют методы планирования многофакторных экспериментов;

б) оценить погрешность проведения опытов и точность получаемых данных с использованием методов математической статистики;

в) разработать экспериментальные установки, которые должны быть физическими моделями будущих производственных (серийно выпускаемых) установок;

г) обобщить экспериментальные данные с целью получения эмпирических расчётных формул.

В конечном итоге получаемые по результатам экспериментальных исследований зависимости имеют вид корреляционных или регрессионных соотношений между входными и выходными величинами, которые носят частный характер и справедливы для сравнительно узкой области изменения параметров модели.

Ниже приведена примерная схема проведения экспериментального исследования процесса тепловой обработки зерна, в которой сочетаются этапы разработки и результаты проводимых исследований разработанных средств механизации (рисунок 12).

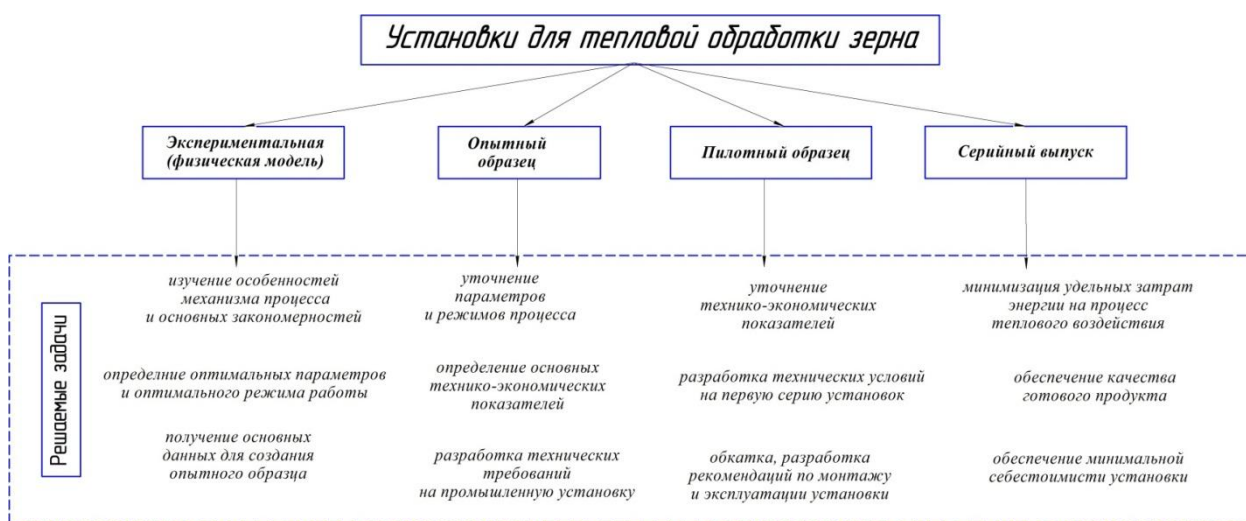


Рисунок 12 – Этапы экспериментального исследования

Приведённую схему применяют при разработке и создании новых оригинальных конструкций установок. Если речь идёт о модернизации действующих установок или разработке новых конструкций установок, реализующих известный способ тепловой обработки, количество этапов экспериментальных работ может быть сокращено.

Перейти от начального этапа разработки УТОЗ к последующему возможно, используя теорию подобия. Эта теория на основе соответствующих критериев позволяет преобразовать полученные выражения, содержащие дифференциальные операторы, в простейшие алгебраические выражения. При этом происходит замена реальных процессов на простейшие условные схемы, в которых все дифференциальные операторы сохраняют постоянное значение в пространстве и во времени.

Для получения критериев подобия необходимы уравнения математического описания изучаемого процесса, а для выявления функциональной связи между ними - большой объем экспериментальных исследований, хотя бы на пилотной установке. Если математическое описание изучаемого процесса отсутствует, то критерии могут быть получены методом анализа размерностей.

Рассмотрим некоторые критериальные уравнения (уравнения подобия), которые используют в расчётах процесса сушки зерна и зерносушильных установок.

При сушке зерна коэффициент теплообмена (теплоотдачи)  $a_T$  определяют по критерию Нуссельта:

$$Nu = f[Re, Gr, Pr, (u/u_k)], \quad (11)$$

где  $Re$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  - критерии Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля, соответственно;  $u/u_k$  - критерий (симплекс) Лебедева, выражающий отношение среднего влагосодержания материала в любой момент времени к среднему критическому влагосодержанию  $u_k$ .

В первый период сушки, когда  $u > u_k$ , критерий  $Nu$  при постоянном аэродинамическом режиме также можно считать постоянным.

Таким образом, в первый период сушки на коэффициент теплообмена  $a_T$  могут оказать влияние только величины, входящие в выражение для критерия Нуссельта:

$$Nu = a_T l / \lambda, \quad (12)$$

где  $a_T$  - коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $l$  - линейный характерный размер высушиваемого материала, который определяют вдоль направления движения агента сушки, м;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), и, в частности, характерный размер  $l$ , который уменьшается в результате усадки материала при сушке.

Так как  $Nu = \text{const}$ , то при уменьшении  $l$   $a_T$  увеличивается. Действительно, размеры зерна изменяются именно в первый период сушки. Для зерновых продуктов поверхность теплообмена  $S$ , так же как и величина  $l$ ,

уменьшается. Таким образом,  $a_T$  и  $S$  изменяются в противоположных направлениях. Во многих случаях изменение  $a_T$  и  $S$  за первый период сушки незначительно; поэтому с большой степенью приближения можно считать, что при неизменных параметрах агента сушки произведение  $a_T S (t_c - t_{гп})$ , а, следовательно, и скорость сушки остаются постоянными. Здесь  $t_c$  и  $t_{гп}$  соответственно температура воздуха в сушильной установке и температура греющей поверхности, °С.

Период постоянной скорости сушки заканчивается в тот момент, когда влажность на поверхности материала становится равной максимальной. Это приводит к интенсификации углубления зоны испарения внутрь зернового материала. При этом также прекращается охлаждающее действие процесса испарения на поверхность высушиваемого материала, и температура этой поверхности стремится к температуре среды сушильной камеры  $t_c$ . Вместе с тем в связи с уменьшением влагосодержания зерна ( $u/u_k < 1$ ) число  $Nu$ , а следовательно, и  $a_T$  начинают уменьшаться.

Все это приводит к уменьшению количества теплоты, передаваемой от теплоносителя к обрабатываемому зерну.

В самом деле, если зона испарения влаги находится внутри зернового материала, а не на его поверхности, то влага из центральных слоев доходит до зоны испарения в жидком виде, а от зоны испарения до поверхности она уже движется в парообразном состоянии. Находясь в достаточно длительном контакте с греющей поверхностью, пар успевает прогреться до температуры этой поверхности. Другими словами, можно принять, что с поверхности зерна влага в виде пара уходит в среду сушильной камеры при температуре равной температуре греющей поверхности  $t_{гп}$ , которая, в свою очередь, во второй период сушки выше, чем температура испарения влаги ( $t_{исп}$ ).

Таким образом, характерной особенностью процесса теплового воздействия во второй период является убывающая (падающая) скорость. В самом начале этого периода она равна постоянной скорости первого периода; затем по мере углубления зоны испарения внутрь материала и повышения



температуры его поверхности скорость сушки уменьшается, снижаясь до нуля, когда температура на поверхности становится равной температуре среды сушильной камеры. При этом влажность обрабатываемого зерна становится равной равновесной влажности, соответствующей параметрам среды сушильной камеры, и сушка прекращается.

Внутренний влагоперенос в процессах сушки представляют в виде критериальных уравнений, полученных А.В. Лыковым и Ю.А. Михайловым в результате аналитических и экспериментальных исследований. В частности, уравнения для поля температур и поля влагосодержаний внутри зерна в процессе теплового воздействия имеют общий вид:

при граничных условиях третьего рода

$$\frac{[\theta(\xi; \tau) - \theta(\xi; 0)]}{[t_c - \theta(\xi; 0)]} = f(Lu; Bi; Ko; Pn; \varepsilon; Fo; \xi/l); \quad (13)$$

при граничных условиях второго рода

$$\frac{[\theta(\xi; \tau) - \theta(\xi; 0)]}{[t_c - \theta(\xi; 0)]} = f(Lu; Ki; Ko; Pn; \varepsilon; Fo; \xi/l); \quad (14)$$

где  $\theta(\xi; \tau)$  - температура в точке зернового материала с координатой  $\xi$  в момент времени  $\tau$ ;  $\theta(\xi; 0)$  - то же, в начальный момент времени (при  $\tau = 0$ );  $\xi/l$  - безразмерная координата, которая даёт возможность анализировать процессы, протекающие в сходных точках природы и модели;

при граничных условиях третьего рода

$$\frac{[u(\xi; \tau) - u(\xi; 0)]}{[u(\xi; 0) - u_p]} = f(Lu; Bi_m; Ko; Pn; \varepsilon; Fo_m; \xi/l); \quad (15)$$

при граничных условиях второго рода

$$\frac{[u(\xi; \tau) - u(\xi; 0)]}{[u(\xi; 0) - u_p]} = f(Lu; Ki_m; Ko; Pn; \varepsilon; Fo_m; \xi/l); \quad (16)$$

где  $u$ ,  $u_p$  - соответственно влагосодержание и равновесное влагосодержание материала, кг/(кг сух. вещества).

Развернутые формулы для расчета переноса теплоты и влаги в процессе сушки, полученные на основе аналитического решения соответствующих дифференциальных уравнений, также могут быть представлены в критериальной форме:

1) период постоянной скорости сушки:

$$\frac{(t-t_0)}{t_0} = 1 - (1 - \varepsilon)KoLu \left( \frac{Ki_m}{Bi_m} \right) - (1/2)\varepsilon KoLu Ki_m (1 - x^2 + 2/Bi); \quad (17)$$

$$\frac{(u_0-u)}{u_0} = Ki_m [(\Gamma + 1)LuFo - (1/2)(1 + \varepsilon KoPnLu)(l - x^2)], \quad (18)$$

где  $(t - t_0)$  потенциал теплопереноса, °С;  $t$  – температура зерна на выходе из сушильной установки, °С;  $t_0$  – температура зерна на входе в сушильную установку, °С;  $x$  – критерий, характеризующий линейный размер сушильной камеры;  $x = r/l$ ;  $r$  – толщина зернового слоя в сушильной камере, м;  $\Gamma$  – фактор формы.

Для греющей поверхности, выполненной в форме пластины  $\Gamma = 0$ , для греющей поверхности, выполненной в форме цилиндра  $\Gamma = 1$ .

2) период падающей скорости сушки

$$\frac{(t-t_0)}{t_0} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 B_{ki}^q Q_{ki} = f_1(Ki_m; Ki; Pn; Lu; \varepsilon; Fo); \quad (19)$$

$$\frac{(u_0-u)}{u_0} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 B_{ki}^m Q_{ki} = f_2(Ki_m; Ki; Pn; Lu; \varepsilon; Fo); \quad (20)$$

В зависимости от способа и режима процесса теплового воздействия те или иные критерии тепло- и влагопереноса приобретают доминирующее значение.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Непрерывное совершенствование конструкций средств механизации тепловой обработки зерна, интенсификация режимов их работы с одновременным сохранением, а в ряде случаев улучшением качества готового продукта и минимизацией суммарных удельных затрат энергии на процесс в конечном итоге, разработка и внедрение средств автоматического управления существенно усложняют создание и проведение исследований установок для тепловой обработки зерна. Применение методов моделирования даёт возможность существенно снизить сроки и этапы создания установок для тепловой обработки зерна, а также найти решения для повышения эффективности их функционирования.

В конечном итоге, установленные критерии, предъявляемые к разработке УТОЗ, а также применение моделирования процессов тепловой обработки зерна позволят создать инновационные, перспективные конструкции средств механизации тепловой обработки зерна, эффективные с точки зрения получения качественного готового продукта при минимальных затратах энергии и труда.