

ЧАСТНАЯ ЗООТЕХНИЯ, КОРМЛЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОРМОВ И ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА

SPECIFIC ANIMAL HUSBANDRY, ANIMAL FEEDING, FEED PRODUCTION TECHNOLOGIES, AND LIVESTOCK PRODUCTION



УДК 631.363.2/.6:621.365.55

Оригинальное эмпирическое исследование

Исследование рабочего процесса технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева

Д.А. Максак

Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград

✉ conf.dstu@gmail.com

Аннотация

Введение. В рамках национального проекта по ускоренному развитию животноводства критически важным становится модернизация кормоприготовительных предприятий. Повышение качества и сбалансированности кормов напрямую увеличивает продуктивность скота и снижает риски для здоровья человека. Однако зерновое, животное и минеральное сырье подвержено сильной микробной порче, где особую опасность представляют плесневые грибы, чьи микотоксины резко снижают питательность. Комбинированная конвективно-СВЧ обработка зернового и минерального сырья обеспечивает интенсивную декстринизацию крахмала, стопроцентное обеззараживание продукта и двукратное снижение энергозатрат. Цель исследования — определить рациональное сочетание параметров конвективного (до 60 °С) и СВЧ-нагрева (до 95–105 °С) в технологическом модуле для обеспечения высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов.

Материалы и методы. Влаготепловая обработка зерна — сложный процесс тепло- и массообмена: влага перемещается внутри материала и с его поверхности в окружающую среду, преимущественно в виде смеси пара и жидкости. При высокоинтенсивной тепловой обработке (например, ИК-нагреве) в зерне интенсивно испаряется влага — давление пара растёт, возникает избыточное давление, разрушающее структуру зерна, вызывающее его размягчение и вспучивание. Процесс делят на два периода: 1) нагрев до 95–105 °С (начало парообразования); 2) нагрев выше этой температуры — в нём происходят основные качественные преобразования (в т.ч. уничтожение микрофлоры). Для первого периода предлагают конвективный нагрев (простой и энергоэффективный), для второго — СВЧ-нагрев (обеспечивает быстрый, равномерный нагрев и резкий рост давления пара). Эффективность комбинированной обработки зависит от сочетания режимных параметров процесса.

Результаты исследования. В лабораторных исследованиях изучен конвективный нагрев зерна озимой пшеницы и ракушки. Построены зависимости температуры нагрева неподвижного и подвижного слоёв от продолжительности обработки. Установлено, что с ростом производительности температура материалов на выходе снижается: для зерна (95–105 °С) оптимальна производительность 300–500 кг/ч, для ракушки (60–80 °С) — свыше 650 кг/ч. Выявлена зависимость производительности и удельных энергозатрат от величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем: при увеличении зазора до 4,5 мм энергозатраты снижаются в 2–3,5 раза. Результаты использованы для доработки конструкторской документации технологического модуля комбинированной обработки (конвективный + СВЧ-нагрев) производительностью до 400 кг/ч.

Обсуждение и заключение. В ходе исследований определены зависимости и область конструктивно-технологических параметров предварительного конвективного нагрева для обработки ингредиентов комбикормов. На основе результатов доработана конструкторская документация модуля комбинированной (конвективной и СВЧ-) обработки производительностью до 400 кг/ч.

Ключевые слова: комбикорма, комбинированный нагрев СВЧ обработка, технологический модуль, декстринизация крахмала, обеззараживание кормов, удельные энергозатраты, динамика нагрева слоя, микотоксины

Для цитирования. Максак Д.А. Исследование рабочего процесса технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):58–72.

Original Empirical Research

Investigation of the Operating Process of a Technological Module for High-Intensity Combined Thermal Treatment of Compound Feed Ingredients Using Convective and Microwave Heating

Dmitry A. Maksak

Agricultural Research Center "Donskoy", Zernograd, Russian Federation

✉ conf.dstu@gmail.com

Introduction. Within the framework of the national project for accelerated livestock development, the modernization of feed preparation enterprises is becoming critically important. Improving feed quality and nutritional balance directly increases livestock productivity and mitigates human health risks. However, grain, animal, and mineral raw materials are highly susceptible to severe microbial spoilage, with molds posing a particular hazard due to their mycotoxins, which drastically reduce nutritional value. Combined convective-microwave treatment of grain and mineral raw materials ensures intensive starch dextrinization, 100% product decontamination, and a two-fold reduction in energy consumption. The objective of this study is to determine the rational combination of convective (up to 60 °C) and microwave heating (up to 95–105 °C) parameters within a technological module to ensure high-intensity thermal treatment of compound feed ingredients.

Materials and Methods. Hydrothermal treatment of grain is a complex heat and mass transfer process, wherein moisture migrates both within the material and from its surface into the environment, predominantly as a vapor-liquid mixture. During high-intensity thermal processing (e.g., infrared heating), rapid moisture evaporation occurs inside the grain, leading to a rise in vapor pressure and the generation of overpressure that disrupts the grain structure, causing its softening and puffing. This process is divided into two distinct periods: 1) heating up to 95–105 °C (the onset of vaporization); 2) heating above this temperature range, during which the primary qualitative transformations occur, including the elimination of microflora. For the first period, convective heating is proposed due to its simplicity and energy efficiency; for the second period, microwave heating is implemented to provide rapid, uniform heating and a sharp increase in vapor pressure. The overall efficiency of the combined treatment depends heavily on the integration of the process operating parameters.

Research Results. In laboratory studies, the convective heating of winter wheat grain and seashell flour was investigated. The temperature profiles of both stationary and moving beds were plotted as a function of processing duration. It was established that as the throughput increases, the discharge temperature of the materials decreases: for the grain (95–105 °C), the optimal throughput is 300–500 kg/h, whereas for the seashell flour (60–80 °C), it exceeds 650 kg/h. Furthermore, a correlation was identified between the throughput, specific energy consumption, and the clearance gap between the metering roller and the cutoff plate. Increasing this gap up to 4.5 mm reduces energy consumption by a factor of 2.0 to 3.5. These findings were subsequently applied to refine the engineering design documentation of the combined treatment technological module (convective + microwave heating) with a capacity of up to 400 kg/h.

Discussion and Conclusion. In the course of this research, the functional dependencies and the boundaries of design and technological parameters for preliminary convective heating during the processing of compound feed ingredients were determined. Based on these findings, the engineering design documentation was refined for the combined (convective and microwave) treatment module with a capacity of up to 400 kg/h.

Keywords: compound feed, combined heating, microwave treatment, technological module, starch dextrinization, feed decontamination, specific energy consumption, bed heating dynamics, mycotoxins

For citation. Maksak DA. Investigation of the Operating Process of a Technological Module for High-Intensity Combined Thermal Treatment of Compound Feed Ingredients Using Convective and Microwave Heating. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):58–72.

Введение. Реализация приоритетного национального проекта «Развитие АПК» по направлению «Ускоренное развитие животноводства» [5] предусматривает совершенствование и создание новых кормоприготовительных предприятий различного типажа. Основой его успешного развития является укрепление кормовой базы, что подразумевает создание сбалансированного качественного корма.

Улучшение качества кормов позволяет решать две основные задачи. Во-первых, повысить показатели продуктивности животноводства. Во-вторых, уменьшить количество вредных веществ, поступающих по пищевой цепочке человеку.

В реализации генетического потенциала продуктивности животных и птицы ведущую роль играет степень биобезопасности используемых комбикормов, основу которых составляют зерновые корма. Они являются и основным источником поступления в организм животных и птицы токсичных веществ – микотоксинов, что снижает питательность корма. Наряду с зерновыми кормами большой микробной порче подвержены и корма животного и минерального происхождения (мясокостная, кровяная, рыбная мука, ракушечник и др.), что также приводит к порче и снижению их питательности.

Из всех видов микроорганизмов, развивающихся в кормах, особую опасность представляют плесневые грибы, микотоксины которых приводят к следующим негативным последствиям [6]:

- снижают продуктивность животных и птицы и их воспроизводительную способность;
- уменьшают эффективность усвоения кормов и их использования на производство продукции;
- повышают восприимчивость животных и птицы к заболеваниям;
- увеличивают материальные затраты на лечение и профилактические мероприятия;
- ухудшают качество получаемой продукции, а в случае превышения допустимых концентраций микотоксинов — к полной непригодности к использованию;
- угрожают здоровью человека при появлении микотоксинов в мясе, яйцах, молоке и других продуктах животноводства.

Особенно сильно при микотоксикозах страдает иммунная система. В результате её поражения возрастает вероятность появления вирусной или бактериальной инфекции. Из сельскохозяйственных животных наиболее чувствительны к микотоксикозам свиньи и птица вследствие особенностей строения пищеварительного тракта и типа кормления.

В настоящее время, по данным [6], более 70 % всех исследованных в южных регионах страны образцов зерна и зерносодержащих комбикормов поражены разными видами токсинообразующих грибов, из которых 65 % исследованных проб содержали два и более микотоксина. Преимущество в контаминации, как цельного зерна, так и готовых кормов, принадлежит четырем родам микромицетов: *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicilium* и *Mucor*, которые являются мощными биодеструкторами и полибиотрофами, что свидетельствует не только об опасном загрязнении кормов, но и о неблагоприятии почв (техногенное загрязнение почв).

Поэтому, одной из основных задач роста производства животноводческой продукции, увеличения продуктивности животных и птицы является повышение кормовой ценности фуражного зерна, являющегося основным компонентом комбикормов, за счёт улучшения качества его предварительной обработки. А также в связи с повышенной в последние годы зараженностью основных ингредиентов комбикормов (зерновых кормов и кормов животного и минерального происхождения) патогенными микроорганизмами и продуктами их жизнедеятельности и угрозой возникновения массовых опасных заболеваний животных и птицы, в том числе в результате их передачи через зараженное при хранении грызунами и дикой птицей зерно, требует включения в состав технологических линий кормоприготовительных предприятий оборудования для его обеззараживания и стерилизации. Более существенную роль это приобретает в современных условиях, когда снижение издержек на подготовку кормов существенно отразится на рентабельности производства продукции животноводства.

В настоящее время предложено много способов, позволяющих значительно повысить питательные свойства и снизить в зерновых и кормах животного и минерального происхождения уровень патогенных микроорганизмов, из которых качественные показатели достигаются при тепловых способах обработки. Тепловая обработка способствует разрыхлению структуры зерна, увеличению его удельного объема и гигроскопичности, уменьшению гладкости поверхности и стеклянного блеска. Нативный крахмал зерна превращается в модифицированный. Содержание сахаров и декстринов увеличивается в 2–3 раза, степень клейстеризации (декстринизации) достигает 35 % и выше. Вследствие гидролитического расщепления крахмала его доступность для организма животных повышается в 2–5 раз и увеличивается в 1,5–2 раза переваримость корма. Уровень клетчатки снижается на 23 %. При тепловой обработке зерновых кормов и кормов животного и минерального происхождения содержание грибной флоры снижается на 95,5 %, бактериальной – на 99,9 % [7, 8]. Однако эффективность большинства существующих тепловых способов остаётся все ещё незначительной (высокая энергоёмкость и материалоемкость оборудования).

Сущность тепловой обработки заключается в перемещении влаги в виде жидкости (или пара) внутри влажного тела к его поверхности и далее в газообразную среду или на поверхность другого тела. При этом под действием температуры и давления в присутствии некоторого количества влаги в обрабатываемом материале происходят сложные биохимические преобразования.

Проведенными исследованиями [9, 10] установлено, что обработка зерна СВЧ энергией, а также применение комбинированного (совмещающего конвективный и СВЧ-нагрев) способа обработки позволяет увеличить степень декстринизации крахмала зерна до 60 %, обеспечить снижение общего уровня содержания грибной и бактериальной обсеменённости продукта до 100 %, в 1,5–2,0 раза снизить общий удельный расход энергии по сравнению с ИК-обработкой. При этом за счет СВЧ-обработки происходит интенсивный нагрев обрабатываемого материала до температуры свыше 105°C и практически мгновенное преобразование капиллярной воды в пар, что приводит к разрушению структуры материала и соответствующим биохимическим преобразованиям.

В этой связи представляется целесообразным высокоинтенсивную тепловую обработку зерновых кормов и кормов минерального происхождения проводить с использованием рационального сочетания параметров конвективного и последующего СВЧ-нагрева реализованных в технологическом модуле. Согласно основным зоотехническим и технологическим требованиям температура зернового материала и ракушки после конвективного нагрева должна превышать 60°C и составлять 95–105°C.

Материалы и методы. Влаготепловая обработка зернового материала представляет собой сложный теплофизический и физико-химический процесс, состоящий из переноса теплоты и влаги внутри материала (внутренний тепло- и массообмен) и тепло- и влагообмен от поверхности материала в окружающую среду (внешний тепло- и массообмен). При этом влага в зерне, подвергаемом тепловой обработке, переносится в виде смеси пара и жидкости.

Переносом связанного вещества (влаги) в обрабатываемом материале преследуют различные цели, но требования к качеству продукта определяют круг вопросов, которые необходимо решить при его технологической обработке. Отличительной особенностью технологических процессов, в результате которых производят продукт с определенными, заранее заданными потребительскими свойствами, является воздействие отдельных факторов (температура, давление, влагосодержание и др.) или их совокупности, вызывающие изменения в продукте.

В процессе высокоинтенсивной тепловой обработки, традиционно осуществляемой при помощи ИК-нагрева, внутри зерна происходит интенсивное испарение влаги. В зависимости от интенсивности нагрева и парообразования, а также скорости истечения парогазовой смеси давление пара внутри зерна резко возрастает и приводит к вытеснению парогазовой смеси из внутренних слоев зерна к наружным. Возникающее давление внутри зерна за счет нагревания и испарения жидкости релаксируется не мгновенно, а с течением определенного времени. В результате, скорость нарастания давления пара значительно больше скорости его релаксации и в определенный момент времени внутри капилляров зерна возникает избыточное давление, приводящее к разрушению структуры зерна, его размягчению и вспучиванию.

Таким образом, наиболее важным моментом в процессе высокоинтенсивной тепловой обработки является фазовый переход влаги внутри зерна в пар, который должен осуществляться с достаточно высокой интенсивностью.

Следовательно, весь процесс высокоинтенсивной тепловой обработки условно можно разделить на два периода, связанные с фазовым переходом жидкости в пар внутри капилляров зерна. Первый период процесса характеризуется нагревом зерна до температуры начала парообразования внутри капилляров (95–105°C), второй — нагревом выше этой температуры. При этом основные качественные преобразования будут происходить во втором периоде обработки, определяющем не только качество структурных преобразований и уничтожения микрофлоры ингредиентов комбикормов, но и энергетику всего процесса.

С учётом этого и результатов исследований [9, 10] первый период предлагается осуществлять с использованием конвективного нагрева, поскольку он прост в реализации и характеризуется сравнительно небольшими затратами энергии на процесс. Для второго (основного) периода обработки представляется целесообразным применение СВЧ-нагрева, обеспечивающего быстрый и равномерный нагрев, высокую интенсивность тепломассопереноса, резкий рост давления пара внутри капилляров, приводящего к разрушению структуры материалов и уничтожению патогенных микроорганизмов.

Очевидно, что результаты комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов могут быть достигнуты при определенном сочетании режимных параметров технологического процесса, определяющих его выходные показатели.

Такую связь между входными и выходными параметрами процесса можно представить координатной матрицей технологического процесса высокоинтенсивной тепловой обработки фуражного зерна с использованием конвективного и СВЧ-нагрева [11].

Из общей схемы технологического процесса высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с помощью координатной матрицы были определены основные параметры, влияющие на протекание процесса конвективного нагрева.

Входные параметры технологического процесса включают в себя управляющие воздействия – зоотехнические требования (качество получаемого продукта K_{mp} , температура обработки T_{mp} , влажность продукта W_{mp}), энергетические (затраты мощности N_3), производственные (необходимое количество получаемого продукта G_{mp}), конструктивные (аэродинамическое сопротивление H_k , температура конструктивных элементов $T_{кэ}$) и возмущающие воздействия – природно-климатические (температура $T_{ви}$, влажность $\phi_{ви}$, давление $P_{ви}$, скорость $v_{ви}$, и удельный расход $l_{ви}$ окружающего воздуха), внутренние параметры обрабатываемого материала (коэффициенты тепло- и массообмена α и α_m , диффузии тепла и влаги a и a_m , порозность слоя обрабатываемого материала Π , термоградиентный коэффициент δ , коэффициенты теплоемкости c и теплопроводности λ , коэффициент диэлектрической проницаемости ϵ , общий коэффициент теплопередачи k , исходные температура $T_{зи}$, влажность $W_{зи}$ и качество $K_{зи}$ обрабатываемого материала).

Базовыми процессами при комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработке ингредиентов комбикормов являются конвективный нагрев и последующая СВЧ-обработка. Дозирование и транспортирование являются необходимыми связующими звеньями, но они не изменяют физико-механических и технологических свойств обрабатываемого материала. Рабочими элементами для выполнения базовых процессов являются, соответственно, центробежный вентилятор с ТЭНами и магнетрон с источником питания.

Входными параметрами конвективного нагрева являются: начальная влажность $W_{зи}$, температура $T_{зи}$, и качество обрабатываемого материала $K_{зи}$; температура $T_в$, относительная влажность $\phi_в$, давление $P_в$, скорость $v_в$ и удельный расход $l_в$ теплоносителя; толщина слоя обрабатываемого материала h_3 , расход материала G_3^k , продолжительность конвективного нагрева t_2 , величина зазора h и частота вращения n_2 дозирующей катушки.

К выходным параметрам относятся: конечная влажность W_3^k , температура T_3^k зернового материала; конечная температура $T_в^k$, относительная влажность $\phi_в^k$, давление $P_в^k$, скорость $v_в^k$ и удельный расход $l_в^k$ отработавшего теплоносителя; удельные энергозатраты $E_{y\partial 2}$.

Кроме входных и выходных параметров, процесс конвективного нагрева характеризуется внутренними параметрами слоя обрабатываемого материала, к основным из которых относятся качественные характеристики физических, механических, химических, теплофизических и термодинамических свойств: коэффициенты тепло- и массообмена α и α_m , диффузии тепла и влаги a и a_m , порозность слоя зерна Π , термоградиентный коэффициент δ , коэффициенты теплоемкости c и теплопроводности λ , общий коэффициент теплопередачи k и др.

Все внутренние параметры процесса конвективного нагрева, так же, как и входные, определяют её результаты. Большинство из них определяется из литературных источников и, таким образом, выступают в роли исходных данных.

Большое количество входных параметров создает значительные трудности при проведении исследований. Поэтому часть входных параметров, такие как исходная влажность, температура и качество ингредиентов комбикормов; относительная влажность, температура, давление, скорость и удельный расход окружающего воздуха и отработавшего теплоносителя, приняли возмущающими и учитывали их статистически. Остальные входные параметры отнесли к управляющим.

Особенность конвективного способа нагрева состоит в том, что для подвода тепла к обрабатываемому материалу и удаления испарившейся из него влаги применяется газообразный теплоноситель – нагретый воздух. При этом происходит целый ряд взаимосвязанных явлений, основными из которых являются следующие:

- передача тепла от нагретого теплоносителя к поверхности материала;
- распространение тепла от поверхности материала к его внутренним слоям;
- перемещение влаги внутри материала от центра к поверхности;
- испарение влаги;
- диффузия паров влаги с поверхности обрабатываемого материала в окружающую среду.

Математическая модель для нахождения оптимальных значений управляющих параметров технологического процесса конвективной обработки ингредиентов комбикормов представляет собой следующую зависимость [12]:

$$W_3^k - W_p^k = (W_u - W_p^k) \cdot e^{-\theta \tau_k^n}, \quad (1)$$

где W_3^k — влажность зерна в текущий момент времени конвективного нагрева, %; W_u — исходная влажность зерна, %; W_p^k — равновесная влажность зерна, %; θ — коэффициент, являющийся функцией максимальной

скорости удаления влаги $N_{\max}$; n — коэффициент, зависящий от свойств материала, которая с достаточной степенью точности отображает характер изменения параметров при конвективном нагреве обрабатываемого материала.

При этом удельный расход энергии в единицу времени на конвективный нагрев может быть определен по формуле:

$$E_k = \frac{gl(I - I_0)}{\rho_n V_{cl}^k \tau_k \eta_k}, \quad (2)$$

где g — количество испаренной влаги, кг; l — удельный расход теплоносителя, кг/кг_{исп. вл.}; I — энтальпия теплоносителя (подогретого воздуха), Дж/кг; I_0 — энтальпия атмосферного воздуха, Дж/кг; ρ_n — насыпная плотность зерна, кг/м³; V_{cl}^k — объем слоя зерна при конвективном нагреве, м³; $\eta_k = 0,35-0,40$ — коэффициент полезного действия, учитывающий потери энергии при нагреве теплоносителя.

Таким образом, анализ выражений (1) и (2) показывает, что основными параметрами конвективного нагрева являются: исходная влажность, температура и качество обрабатываемого материала; параметры теплоносителя (исходные и конечные): относительная влажность, температура, давление, скорость и расход теплоносителя, теплофизические параметры воздуха и пара (энтальпия, теплоемкость и др.); продолжительность конвективного нагрева, толщина продуваемого слоя, порозность, состояние и площадь поверхности нагрева обрабатываемого материала.

Производительность блока конвективного нагрева определяется производительностью установленного в нижней части дозирующего устройства, включающего катушечный (барабанный) и шнековый дозатор.

Массовый расход катушечного (барабанного) дозатора определяют по формуле:

$$G_k = S_{жк} \cdot a \cdot z \cdot n_c \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (3)$$

где $S_{жк}$ — площадь поперечного сечения одного желобка, м²; a — длина рабочей части желобка, м; z — число желобков; n_c — частота вращения катушки (барабана), с⁻¹; ρ — плотность зернового материала, кг/м³; φ — коэффициент наполнения желобков ($\varphi = 0,8-0,9$).

Мощность, расходуемая на привод катушечного (барабанного) дозатора, определяется в основном трением материала, захватываемого катушкой (барабаном), о вышележащие слои:

$$N_{\pi} = \frac{P_{тр} \cdot v \cdot k_1}{1000} = \frac{f \cdot p \cdot F_{\delta} \cdot v \cdot k_1}{1000}, \quad (4)$$

где $P_{тр}$ — сила трения зерна, захватываемого катушкой (барабаном), Н; f — коэффициент трения обрабатываемого материала; p — давление материала на поверхность катушки (барабана), Па; F_{δ} — площадь поперечного сечения горловины над катушкой, м²; v — окружная скорость катушки (барабана), м/с; k_1 — коэффициент, учитывающий затраты энергии на возможное измельчение продукта при захватывании его желобком (для порошкообразных $k_1 = 1$; для кусковых $k_1 = 2$).

Массовый расход шнекового питателя определяют по формуле:

$$G_{ш} = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot (D^2 - d^2) \cdot s \cdot \omega \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (5)$$

где D и d — диаметры шнека и вала шнека, м; $s = (0,8-1,0)$; D — шаг винта, м; ρ — плотность зерна, кг/м³; φ — коэффициент заполнения ($\varphi = 0,8-1,0$) ω — угловая скорость, рад/с.

Мощность, необходимая для привода шнека, равна:

$$N = 10^4 \cdot G_{ш} \cdot (Lk' + H) \cdot k'' / \eta, \quad (6)$$

где L — горизонтальная проекция пути обрабатываемого материала, м; H — высота подъема материала ($H=0$), м; k' — коэффициент, учитывающий сопротивление перемещению материала в корпусе шнека ($k' = 1,2-2,5$); k'' — коэффициент, учитывающий потери на трение в подшипниках ($k'' = 1,1-1,2$); η — КПД привода.

Анализ приведенных выражений (3)–(6) позволяет определить главные факторы, которые оказывают основное влияние на изменение производительности и потребляемой мощности дозирующего устройства. К ним относятся геометрические размеры и скорость вращения. Варьируемыми (управляемыми) факторами будет величина зазора в катушечном (барабанном) дозаторе. Значение производительности и мощность шнекового питателя будет определяться производительностью катушечного (барабанного) дозатора.

Для проведения исследований ВНИПТИМЭСХ был разработан и изготовлен совместно с НПП «МАГРАТЕП» (г. Фрязино) технологический модуль для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева, представленный на рис. 1.

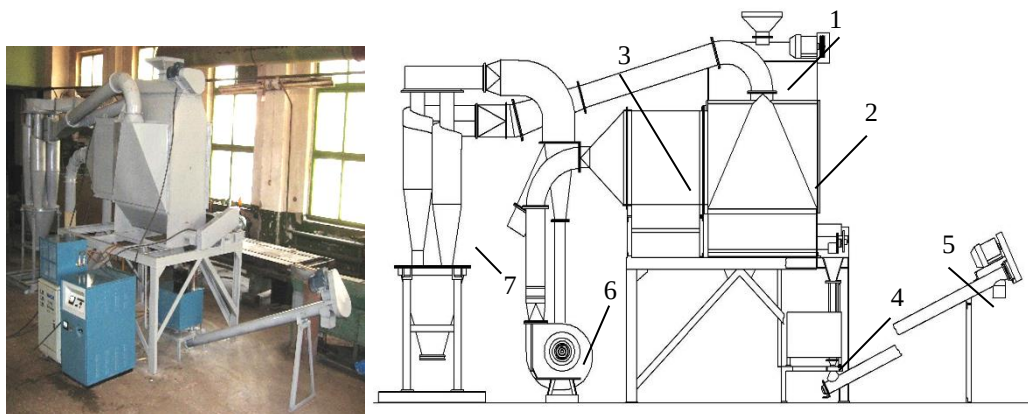


Рис. 1. Технологический модуль для комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработки фуражного зерна: 1 — блок дозирования фуражного зерна; 2 — блок конвективного нагрева; 3 — блок ТЭН; 4 — блок СВЧ-обработки; 5 — блок выгрузки готовой продукции; 6 — вентилятор; 7 — циклон

Исследование рабочего процесса комбинированной высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов на данном этапе предусматривали изучение области существования конструктивно-технологических параметров конвективного нагрева технологического модуля, обеспечивающего предварительный нагрев ингредиентов комбикормов до 95–105 °С.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии со специально разработанной методикой, предусматривающей проведение многофакторного эксперимента с определением динамики конвективного нагрева, определение изменения производительности блока конвективного нагрева и удельных затрат энергии, с привлечением аппарата дисперсионного анализа для обработки экспериментальных данных.

Входными параметрами блока конвективного нагрева являются размер отверстий продуваемых решет, параметры теплоносителя (температура, давление, влажность, расход), параметры обрабатываемого материала (температура, влажность, качество), величина зазора между дозирующей катушкой и отсекателем, продолжительность конвективного нагрева.

Параметрами, характеризующими процесс конвективного нагрева ингредиентов комбикормов, являются производительность и удельный расход энергии.

При оценке технологического процесса конвективного нагрева ингредиентов комбикормов за критерий оптимизации принят показатель энергоемкости – удельный расход энергии, который рассчитывают по формуле:

$$\mathfrak{E} = \frac{N_{изм}}{Q}, \quad (7)$$

где $N_{изм}$ — мощность, расходуемая на конвективный нагрев (за вычетом мощности холостого хода), кВт; Q — производительность блока конвективного нагрева, кг/ч.

При проведении экспериментальных исследований измерение необходимых параметров осуществлялось приборами, точность которых позволяет объективно судить об измеряемых величинах. Мощность, потребляемая на привод рабочих органов, регистрировалась трехфазным измерительным комплексом К-505. Контроль температуры теплоносителя обрабатываемого материала осуществляли в 15 точках с помощью термопар, подключенных к универсальному вольтметру В7–16А, и ртутного термометра. Расход воздуха (или теплоносителя) находили, измеряя скорость анемометром и площадь сечения измеряемого участка.

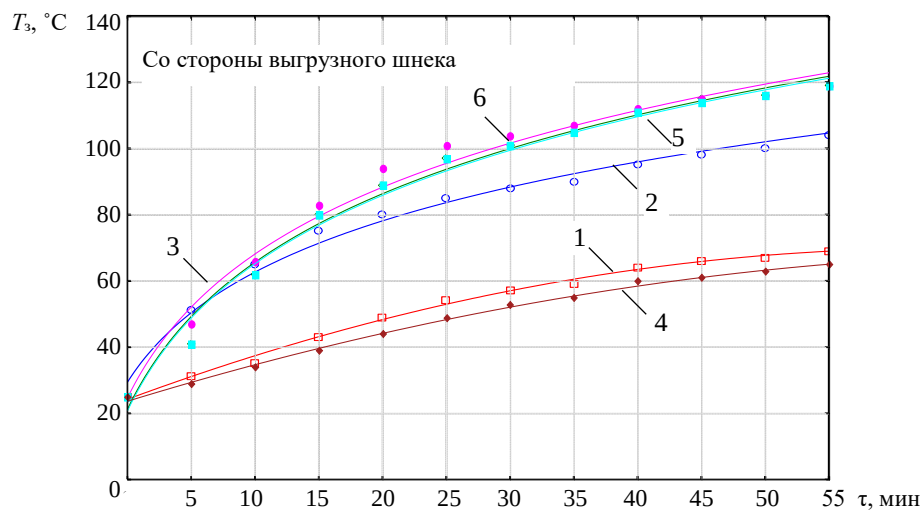
Для определения барометрического давления использовали барометр-анероид, установленный в помещении, где располагается технологический модуль. Его показания записывали через каждые 3 часа. Показания психрометра, расположенного снаружи и внутри помещения и предназначенного для измерений относительной влажности атмосферного воздуха, записывали через каждый час.

Влажность отработавшего теплоносителя определяли как средние значения с использованием психрометра, устанавливаемого в отводящем трубопроводе.

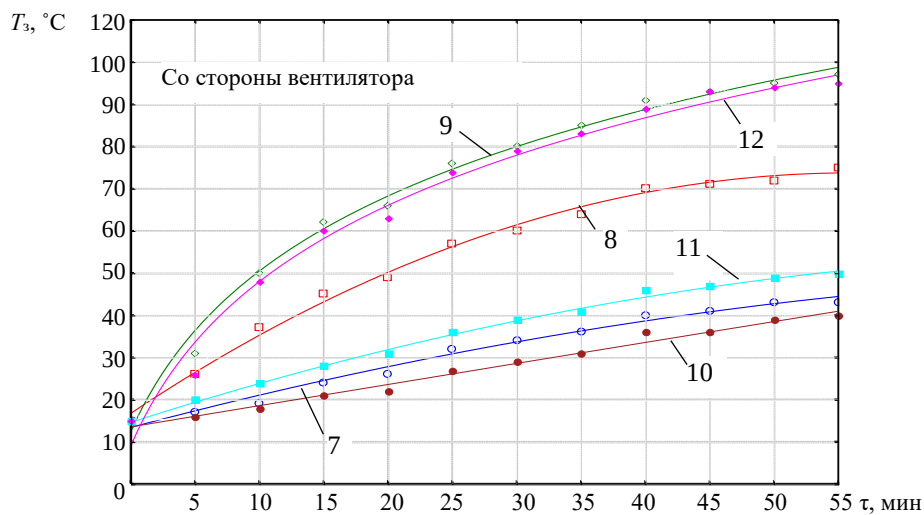
Результаты экспериментов систематизировались и обрабатывались по прикладным статистическим программам на ПЭВМ.

Результаты исследования. Лабораторные исследования процесса конвективного нагрева ингредиентов комбикормов выполнены на зерне озимой пшеницы и ракушке. По результатам исследований построены экспериментальные зависимости изменения температуры нагрева неподвижного и подвижного слоя обрабатываемых образцов при конвективном нагреве.

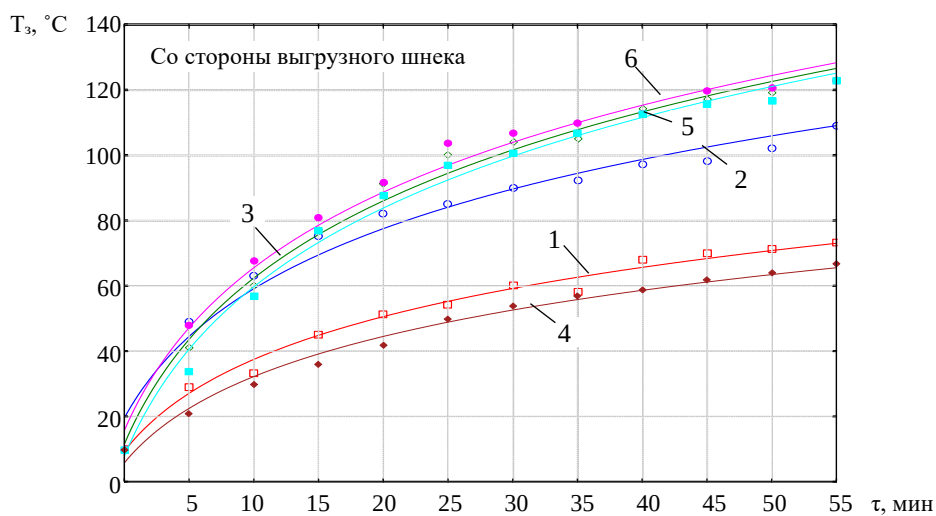
Результаты исследований процесса конвективного нагрева неподвижного слоя зерна пшеницы и ракушки представлены в виде кривых роста средней температуры слоя обрабатываемого материала от продолжительности нагрева на рис. 2.



а)



б)



в)

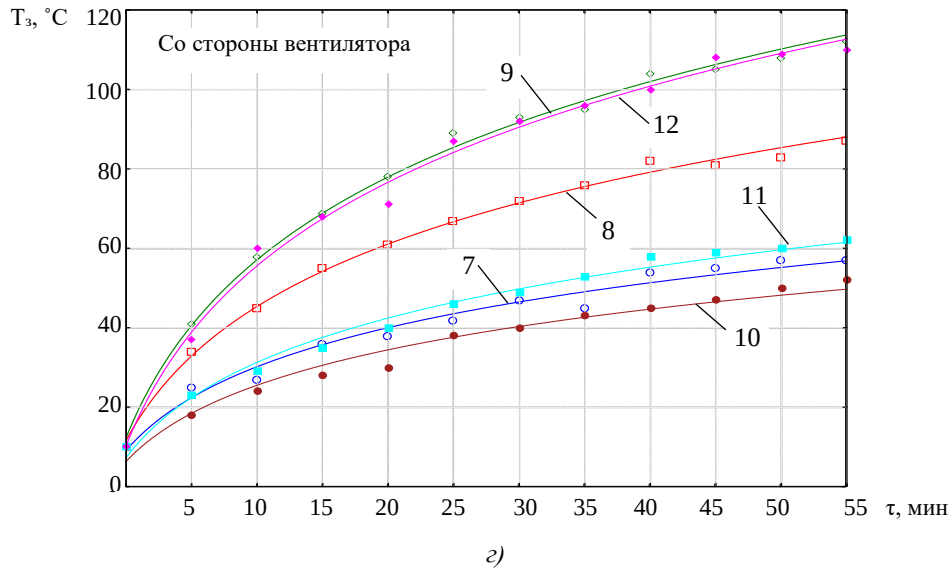


Рис. 2. Изменение температуры нагрева неподвижного слоя зерна пшеницы (а, б) и ракушки (в, г) при конвективном способе в четырех зонах измерения (3, 6, 9, 12 — на высоте 16,5 см от основания блока; 2, 5, 8, 11 — 43 см; 1, 4, 7, 10 — 80 см)

В результате обработки опытных данных конвективного нагрева неподвижного слоя обрабатываемых материалов были получены функциональные зависимости изменения температуры нагрева зерна пшеницы и ракушки в двух камерах блока конвективного нагрева при указанных выше параметрах теплоносителя от продолжительности обработки.

Со стороны выгрузного шнека
зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_1^п &= 16,70 + 7,69 \cdot \tau - 0,29 \cdot \tau^2 \\ T_2^п &= 29,18 + 69,79 \cdot \lg(\tau) \\ T_3^п &= 20,91 + 93,33 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} T_4^п &= 64,44 - 12,61 \cdot \lg(\tau) \\ T_5^п &= 119,47 - 20,02 \cdot \lg(\tau) \\ T_6^п &= 116,05 - 13,88 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Со стороны вентилятора
зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_7^п &= 50,65 - 14,23 \cdot \lg(\tau) \\ T_8^п &= 78,80 - 21,68 \cdot \lg(\tau) \\ T_9^п &= 99,76 - 28,73 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{10}^п &= 43,24 - 14,82 \cdot \lg(\tau) \\ T_{11}^п &= 61,59 - 15,33 \cdot \lg(\tau) \\ T_{12}^п &= 97,79 - 28,91 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ракушка

$$\left. \begin{aligned} T_7^р &= 54,65 - 14,23 \cdot \lg(\tau) \\ T_8^р &= 85,33 - 15,08 \cdot \lg(\tau) \\ T_9^р &= 101,40 - 19,93 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{10}^р &= 45,24 - 14,82 \cdot \lg(\tau) \\ T_{11}^р &= 63,59 - 15,33 \cdot \lg(\tau) \\ T_{12}^р &= 102,79 - 28,91 \cdot \lg(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Неравномерность нагрева подвижного слоя обрабатываемого материала по длине обеих камер блока конвективной обработки в среднем составила на высоте 16,5 см — 2–3 °C, 43 см — 6–22 °C, 80 см — 7,5–10 °C.

При конвективном нагреве подвижного слоя обрабатываемых материалов характер изменения температуры зерна пшеницы и ракушки в блоке конвективной обработки от параметров процесса может быть представлен графически следующей поверхностью рис. (3а, 4а) и адекватно описан полиномом 2-й степени:

Со стороны выгрузного шнека

зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_2^n &= 113,16 - 0,83 \cdot \tau + 0,24 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot \tau \cdot H - 0,01 \cdot H^2 \\ T_2^n &= 99,91 - 0,84 \cdot \tau + 1,14 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,0002 \cdot \tau \cdot H - 0,02 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

ракушка

$$\left. \begin{aligned} T_2^n &= 115,73 - 0,83 \cdot \tau + 0,34 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,003 \cdot \tau \cdot H - 0,01 \cdot H^2 \\ T_2^n &= 103,05 - 0,84 \cdot \tau + 1,20 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,0002 \cdot \tau \cdot H - 0,02 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

Со стороны вентилятора

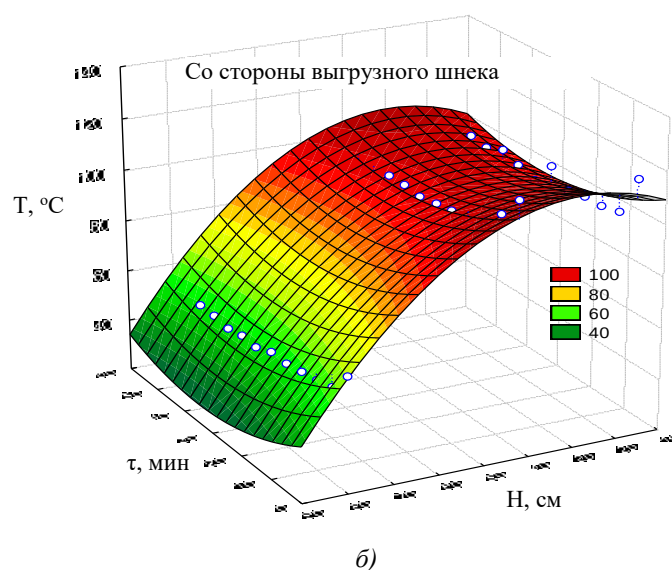
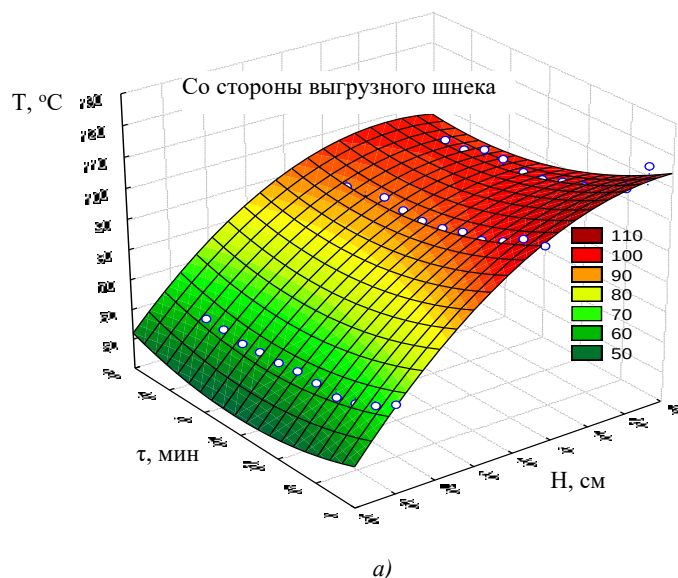
зерно пшеницы

$$\left. \begin{aligned} T_1^n &= 108,75 - 1,33 \cdot \tau - 0,68 \cdot H + 0,02 \cdot \tau^2 + 0,003 \cdot \tau \cdot H - 0,0002 \cdot H^2 \\ T_1^n &= 118,25 - 1,23 \cdot \tau - 1,59 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot \tau \cdot H + 0,01 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

ракушка

$$\left. \begin{aligned} T_1^n &= 104,62 - 1,11 \cdot \tau - 0,17 \cdot H + 0,02 \cdot \tau^2 + 0,00008 \cdot \tau \cdot H - 0,01 \cdot H^2 \\ T_1^n &= 126,39 - 1,23 \cdot \tau - 1,81 \cdot H + 0,01 \cdot \tau^2 + 0,004 \cdot \tau \cdot H + 0,01 \cdot H^2 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Примечательно, что вид этой поверхности сохраняется для материала всех четырех зон области измерения (рис. 3б–г, 4б–г).



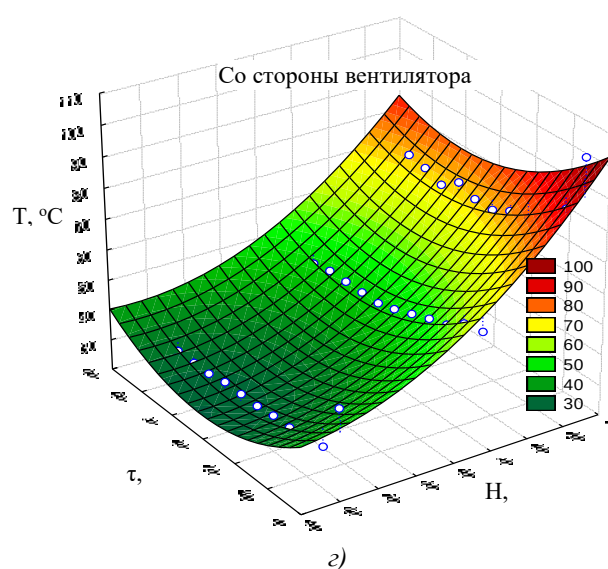
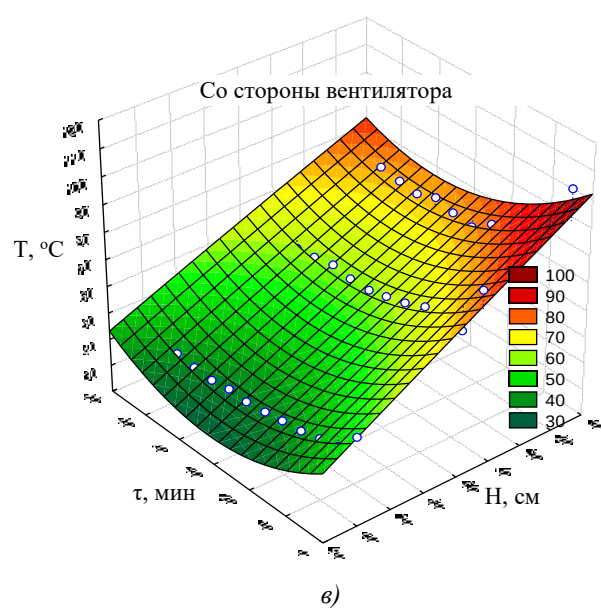
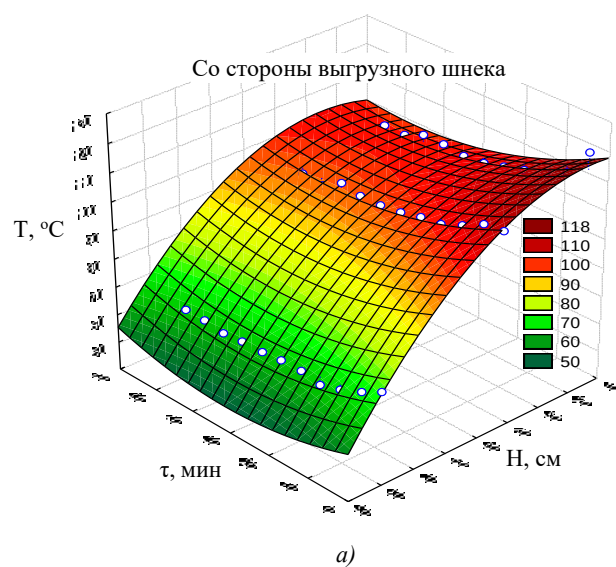


Рис. 3. Поверхность отклика функции $T=f(H, \tau)$ подвижного слоя зерна четырех зон области измерения:
 а — правая сторона блока конвективной обработки; б — левая сторона блока конвективной обработки;
 в — правая сторона блока конвективной обработки; з — левая сторона блока конвективной обработки



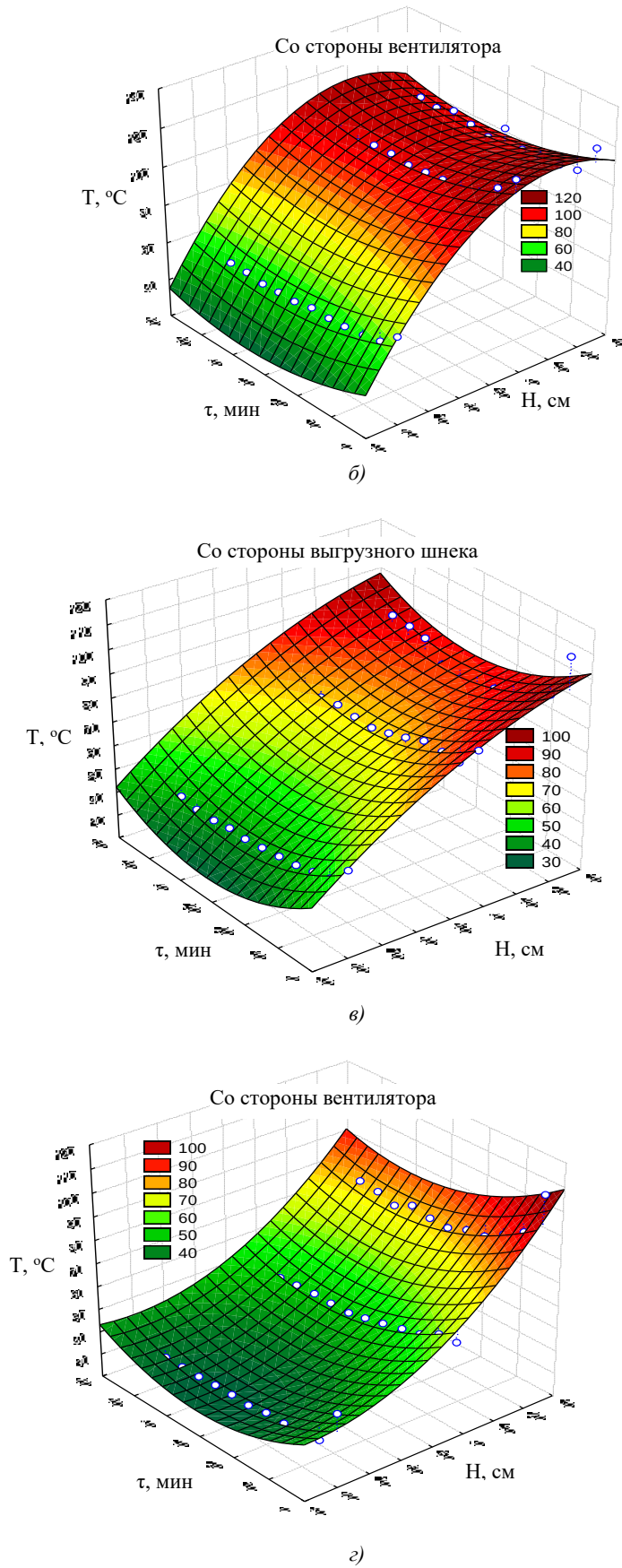


Рис. 4. Поверхность отклика функции $T = f(H, \tau)$ подвижного слоя ракушки четырех зон области измерения: а — правая сторона блока конвективной обработки; б — левая сторона блока конвективной обработки; в — правая сторона блока конвективной обработки; г — левая сторона блока конвективной обработки

С увеличением продолжительности выгрузки τ и высоты подвижного слоя H материала температуры его нагрева по зонам измерения.

В результате экспериментальных исследований процесса конвективного нагрева фуражного зерна и ракушки было установлено, что с увеличением производительности температура зерна пшеницы и ракушки на выходе из блока конвективной обработки снижается (рис. 5) и описывается линейной зависимостью:

$$T_z = 117,7 - 0,05 \cdot Q_z,$$

$$T_p = 109,6 - 0,04 \cdot Q_p,$$

где T_z , T_p — температура зерна и ракушки на выходе из блока конвективной обработки, °C; Q_z , Q_p — производительность по зерну и ракушке, кг/ч.

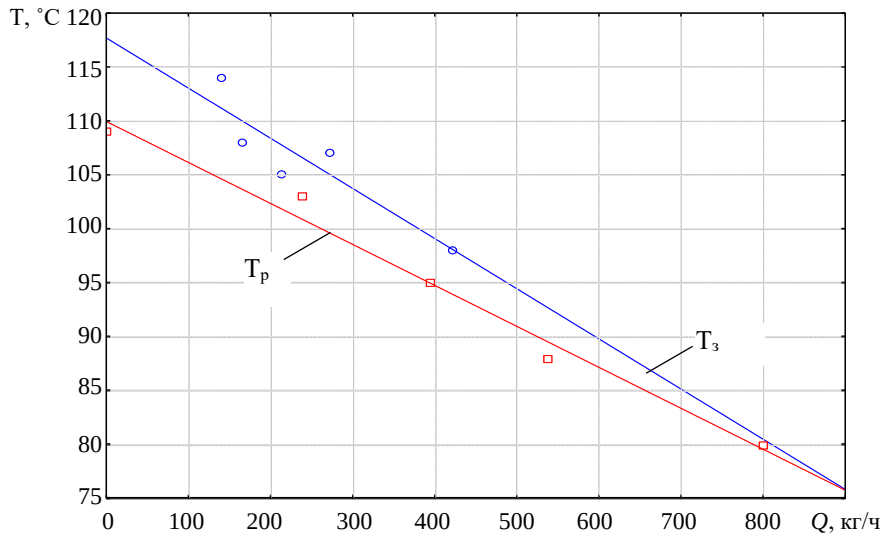


Рис. 5. Изменение температуры нагрева материала на выходе из блока конвективной обработки.

Анализ рис. 5 показывает, что для поддержания требуемой температуры зерна на выходе из блока конвективной обработки в пределах 95–105 °C его производительность должна составлять порядка 300–500 кг/ч. Для поддержания требуемой температуры ракушки (порядка 60–80 °C) производительность блока должна составлять свыше 650 кг/ч.

Результаты исследований влияния величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем на производительность блока конвективной обработки приведены на рис. 6.

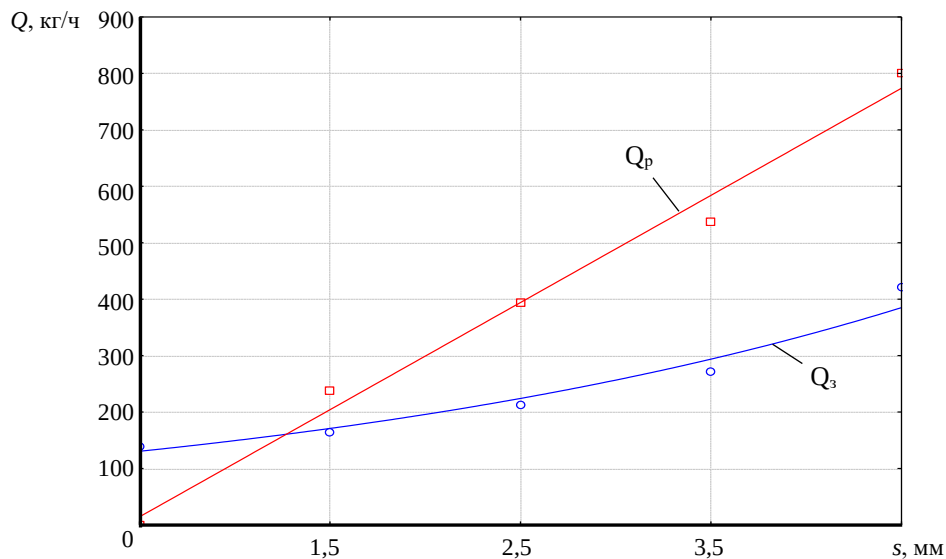


Рис. 6. Изменение производительности блока конвективной обработки от величины зазора

Анализируя их, можно отметить, что с увеличением зазора между дозирующей катушкой и отсекателем до 4,5 мм производительность блока увеличивается для зерна пшеницы до 400 кг/ч, для ракушки до 800 кг/ч. зависимость производительности блока конвективной обработки зерна пшеницы и ракушки определяется следующим выражением:

$$Q_z = 99,5 \cdot e^{0,27 \cdot s},$$

$$Q_p = -175,7 + 189,9 \cdot s,$$

где Q_z , Q_p — производительность блока конвективной обработки по зерну и ракушке, кг/ч; s — величина зазора между дозирующей катушкой и отсекателем, мм.

Исследованиями установлено, что зависимость удельных затрат энергии блока конвективной обработки от величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем (рис. 7) для зерна пшеницы и ракушки аппроксимируется экспоненциальной функцией вида:

$$E_{удз} = 0,34 \cdot e^{(-0,24 \cdot s)},$$

$$E_{удр} = 0,40 \cdot e^{(-0,36 \cdot s)},$$

где $E_{удз}$, $E_{удр}$ — удельные затраты энергии на обработку зерна и ракушки, кВт·ч/кг; s — величина зазора между дозирующей катушкой и отсекателем, мм.

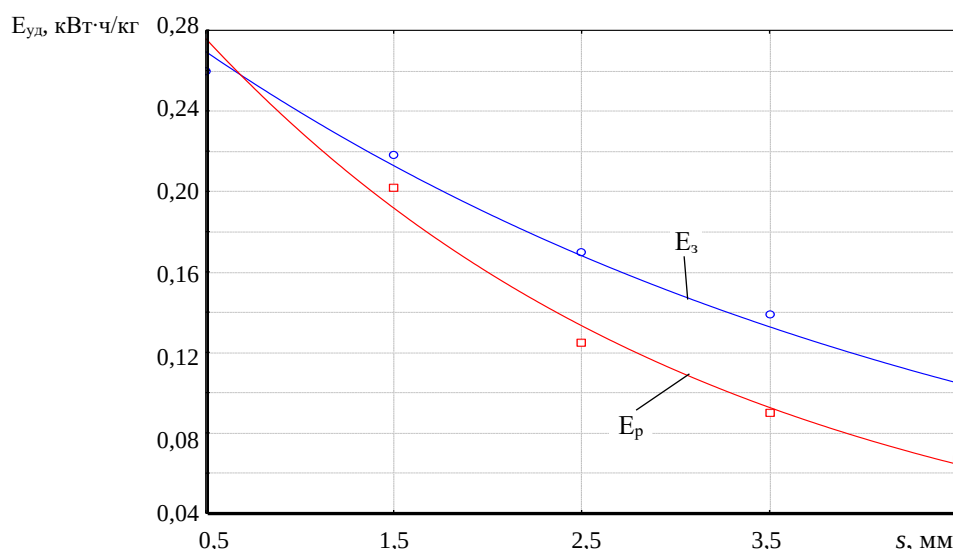


Рис. 7. Изменение удельных затрат энергии блока конвективной обработки от величины зазора

Из графика следует, что с увеличением величины зазора между дозирующей катушкой и отсекателем до 4,5 мм происходит снижение удельных затрат энергии на конвективную обработку зерна в 2,0–2,5 раза, ракушки — в 3,0–3,5 раза.

Так, при производительности блока конвективной обработки по зерну 400 кг/ч, зазор между дозирующей катушкой и отсекателем составляет 4,5 мм, а удельные затраты энергии составляют 0,1 кВт·ч/кг. При требуемой производительности блока по ракушке 650 кг/ч, зазор между дозирующей катушкой и отсекателем составляет 4,0 мм, а удельные затраты энергии — 0,07 кВт·ч/кг.

Проведенный этап исследований позволил определить основные зависимости и установить область существования конструктивно-технологических параметров процесса предварительного конвективного нагрева технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов.

По результатам исследований была доработана конструкторская документация технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева производительностью до 400 кг/ч

Обсуждение и заключение. Проведенный этап исследований позволил определить основные зависимости и установить область существования конструктивно-технологических параметров процесса предварительного конвективного нагрева технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов.

По результатам исследований была доработана конструкторская документация технологического модуля для высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов комбинированным способом с использованием конвективного и СВЧ-нагрева производительностью до 400 кг/ч.

Список литературы/References

1. Коваленко А., Солдатенко Н., Фетисов Л., Сухих Е. Микотоксикологический мониторинг кормов в Северо-Кавказском регионе. *Комбикорма*. 2003;11:98–99. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/3_11/3-11_98-99.pdf (дата обращения: 02.05.2026).
2. Cristóbal Valverde, Margarita-Manuela Rodríguez-García, Esther Rojas, Rocío Bayón. State of the art of the fundamental aspects in the concept of microwave-assisted heating systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024;156:107594 <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107594>
3. Mohammad U.H. Joardder, Abdul Mojid Parvej, Md. Fahim Shahriar, Md. Fahim Faysal, Md. Mostafizur Rahman, Azharul Karim. Enhancing fish drying efficiency and quality: A comparative study of intermittent microwave convective drying (IMCD) and conventional methods. *Future Foods* 2025;12:100717 <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100717>
4. Vasilyev AA, Vasilyev AN, Budnikov D. Using Modeling to Select the Type of Microwave Field Emitter for Dense-Layer Grain Dryers. *Applied Sciences* 2023;13(16):9070. <https://doi.org/10.3390/app13169070>
5. Sining Mao, Yuhan Zhou, Bin Song, Yuzhu Wu, Yu Wang, Yiran Wang, Yanjia Liu, Xiuying Xu, Chengbin Zhao, Jingsheng Liu. Effect of Microwave Intermittent Drying on the Structural and Functional Properties of Zein in Corn Kernels. *Foods*. 2024;13(2):207. <https://doi.org/10.3390/foods13020207>
6. Jalal Dehghannya, Mahdi Habibi-Ghods. Computer simulation of microwave-assisted drying: Coupled influence of microwave power and pulse ratio on product and process characteristics. *Curr Res Food Sci*. 2025;10:101013. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101013>

Об авторе:

Дмитрий Андреевич Максак, инженер Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, д. 14).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Dmitry A. Maksak, Engineer, Agricultural Research Center "Donskoy" (14 Lenina St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russian Federation)

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию/Received 12.05.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 26.05.2026

Принята к публикации/Accepted 10.06.2026