

# РЕГРЕССИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЭТАПНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ И ОЗОНОВОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

## REGRESSION MATHEMATICAL MODEL OF TWO-STAGE COMBINED ELECTRICAL TECHNOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE CONVECTIVE DRYING AND OZONE-AIR GRAIN PROCESSING

**В.И. ПАХОМОВ**, д.т.н.  
**В.С. ГАЗАЛОВ**, д.т.н.  
**К.Н. БУХАНЦОВ**

СКНИИМЭСХ ФГБНУ «АНЦ «Донской», Зерноград,  
Россия, buhantsov.k@gmail.com

**V.I. PANOMOV**, DSc in Engineering  
**V.S. GAZALOV**, DSc in Engineering  
**K.N. BUHANCOV**

Federal State Budgetary Scientific Institution «Agrarian Center  
«Donskoy», Zernograd, Russia, buhantsov.k@gmail.com

Большие объемы производства в России зерновых колосовых культур в 2014–2018 гг. (100–130 млн. т) подразумевают необходимость сушки 10–30 % ежегодно собираемого в стране урожая для обеспечения его количественной и качественной сохранности. Основным способом снижения избыточной влажности зерна в РФ является высокотемпературная конвективная сушка, но она относится к очень энергоемким технологическим операциям и поэтому весьма дорогостоящая. В условиях постоянного роста цен на энергоносители в российской экономике перед сельхозпроизводителями страны стоит первостепенная задача повышения рентабельности зерновой отрасли, в рамках которой необходимо снижать материальные затраты на всех этапах производства, в том числе за счет создания новых высокоинтенсивных энергосберегающих технологий и технических средств для сушки зернового сырья. Авторы разработали отвечающую этим требованиям двухэтапную технологию высокотемпературной конвективной и озонородушной сушки зерна. В статье на основе анализа параметрической схемы конвективно-озонородушного способа удаления влаги, составленной с учетом условий и возможностей проведения экспериментальных исследований процесса на промышленной сушильной установке «ЭЛЕКТА-1» небольшой производительности, определены параметры оптимизации этого процесса, в качестве которых приняты: уменьшение продолжительности сушки и суммарное снижение энергозатрат на нее, кроме того выделены основные варьируемые в опытах факторы: начальная влажность зерна, величина подачи озона на 1 м<sup>3</sup> зерна и затраты времени на удаление влаги. Разработаны регрессионные математические модели второго порядка для процесса конвективно-озонородушной сушки зерна ячменя с разной начальной влажностью (30, 25 и 20 %), и проведена оценка их статистической значимости. Анализ экспериментальных данных исследованных вариантов комбинированной сушки при 6%-м влагосъеме за один цикл обработки зернового материала выявил следующие параметры эффективности способов конвективно-озонородушного удаления влаги: при сушке зерна с начальной влажностью 30 % снижение продолжительности процесса произошло на 28 %, а уменьшение суммарных энергозатрат составило 33–43 %; при сушке зерна с влажностью 25 % снижение продолжительности процесса – на 19 %, энергозатрат – на 24–35 %; а при сушке зерна влажностью 20 % снижение продолжительности процесса – на 30–35 %, энергозатрат – на 35–40 %.

**Ключевые слова:** конвективный нагрев, озонородушная сушка, регрессионная математическая модель, подача озона, продолжительность сушки, экспериментальные исследования, влажность зерна, энергозатраты.

Large production of cereal crops in Russia in 2014–2018 (100–130 million tons) imply the need to dry 10–30 % of the crop collected annually in the country to ensure its quantitative and qualitative preservation. The main way to reduce the excess moisture of grain in the Russian Federation is high-temperature convective drying, but it refers to very energy-intensive technological operations and, therefore, is very expensive. In the context of the constant increase in energy prices in the Russian economy, the country's agricultural producers face the primary task of increasing the profitability of the grain industry, within which it is necessary to reduce material costs at all stages of production, including through the creation of new high-intensity energy-saving technologies and technical means for drying grain raw materials. The authors have developed a two-stage technology of high-temperature convective and ozone-air grain drying that meets these requirements. In the article, based on the analysis of the parametric scheme of the convective-ozone-air moisture removal method, compiled taking into account the conditions and possibilities of conducting experimental studies of the process at the industrial drying unit «ELEKTA-1» of small productivity, the optimization parameters of this process are defined, which are: reduction of the drying time and the total reduction in energy consumption, in addition, the main factors varied in the experiments are highlighted: the initial moisture

content of the grain, the amount of ozone supply to 1 m<sup>3</sup> of grain and time spent on moisture removal. Second-order regression mathematical models for the convective-ozone-air drying of barley grain with different initial humidity (30, 25 and 20 %) have been developed and their statistical significance has been evaluated. An analysis of the experimental data of the combined drying options studied at 6 % moisture removal for one cycle of processing the grain material revealed the following parameters of the efficiency of the methods of convective ozone-air moisture removal: when drying grain with an initial humidity of 30 %, the process duration decreased by 28 % and the total energy consumption decreased amounted to 33–43 %; when drying grain with a moisture content of 25 %, the duration of the process is reduced by 19 %, energy consumption by 24–35 %; and when drying grain with a moisture content of 20 %, the duration of the process is reduced by 30–35 %, energy consumption by 35–40 %.

**Keywords:** convective heating, ozone-air drying, regression mathematical model, ozone flow, drying time, experimental studies, grain moisture, energy consumption.

## Введение

Россия является крупным мировым производителем зерна, сборы которого в стране в 2014–2017 гг. устойчиво превышают 100 млн т, а в 2018 г. суммарный урожай зерновых культур перешагнул отметку в 130 млн т [1–4]. После уборки из этого количества выращенного зерна в сушке ежегодно нуждается от 15 до 30 %, что существенно зависит от погодноклиматических условий в текущем сельскохозяйственном году.

Необходимость снижения повышенной влажности зерновых материалов до кондиционных значений (13–14 %) связана с тем, что даже при краткосрочном хранении (от 1–5 до 7–14 дней) во влажном состоянии возникают существенные количественные потери зерна и происходит еще более значительное ухудшение его показателей качества (семенных, технологических, кормовых), а учитывая количественную долю в урожае зернового сырья, нуждающегося в сушке, его порча может нанести весьма чувствительный урон экономике страны и финансовой стабильности многих сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Наиболее распространенными в производстве технологиями снижения влажности зерна являются различные варианты процессов высокотемпературной конвективной сушки, большинство из которых очень энергоемкие и по многим известным данным в 1,2–2,8 раза превышают установленное нормативное значение удельных энергозатрат на испарение влаги в данном виде процессов (5000 кДж/кг исп. вл. [5]), приведенных к стандартным условиям. Причем величина энергоемкости практически не зависит от конструктивного разнообразия и принципов работы реализующих ее (конвективную технологию) зерносушилок.

В условиях быстрого роста цен за последние годы на все виды энергоносителей на внутреннем рынке РФ перед производителя-

ми зерна все острее встает задача снижения энергетических затрат на процессы сушки и повышения их производительности за счет интенсификации влагосъема при одновременном сохранении показателей качества зернового сырья. Практика научных исследований показывает, что наилучший комплексный результат в обеспечении энергосбережения и ускорения процессов сушки зерна обеспечивают комбинированные технологии его обработки на основе сочетания двух и более видов воздействий (конвективно-сверхвысокочастотная сушка, рециркуляционная сушка конвективно-сорбционная, технология «драйэрации» (комбинация высокотемпературной конвективной сушки и малообъемного активного вентилирования) и некоторые др.). Однако таких энергоэффективных способов снижения влажности зерна, доведенных до производственного использования, очень мало и они имеют ограничения для своего применения: из-за низкой эксплуатационной надежности и высокой стоимости некоторых элементов оборудования (СВЧ-генераторов), из-за возможности реализации процесса только в сушильных установках высокой производительности (20 т/ч и более), из-за необходимости больших материальных затрат на строительство капитальных сооружений, обеспечивающих выполнение отдельных этапов сушки (бункеров активного вентилирования, металлических силосов, напольных складов и т.д.), а также по ряду других причин.

Учитывая недостатки перечисленных комбинированных способов снижения влажности зерна и продолжая решать актуальную хозяйственную задачу по снижению энергоемкости и обеспечению интенсификации процесса высокотемпературной конвективной сушки зерна, при условии использования его на прямочных сушилках малой, средней и большой производительности, авторы разработали

оригинальный двухэтапный комбинированный способ конвективно-озонородушной сушки зерновых материалов [6, 7], особая структурная компоновка которого позволяет обеспечить повышение технологической эффективности процесса, требуемой в производстве [7–10].

Предлагаемый способ сушки зерна состоит из двух последовательных этапов с непрерывной подачей зернового материала на обоих сверху вниз в плотном слое, на первом – с перемешиванием зерна в слое и продувом его высокотемпературным теплоносителем, на втором этапе – с перемешиванием нагретого частично подсушенного материала в слое и продувом его неподогретым озонированным воздухом с последующим подогревом этого воздуха (отработанного) до температуры, обеспечивающей термическое разложение остаточного озона и использованием полученного теплоносителя на первом этапе сушки [6, 9, 10].

Элементы электротехнологии высокотемпературной конвективной и озонородушной сушки зерна уже экспериментально исследовались на лабораторной установке, но только при ряде допущений: в стационарном неподвижном слое материала, без применения термоутилизации озона в отработанной озонородушной смеси (ОВС) и без рекуперации тепла с этапа сушки неподогретым озонированным воздухом [11, 12]. Некоторые режимные параметры процесса были найдены уже на этом этапе исследований, но в целом все преимущества (энергосбережение, интенсификация влагосъема, повышение качества зерна и др.) предложенной технологии конвективно-озонородушной сушки могут быть выявлены только

при экспериментальном изучении процесса на базе малой производственной зерносушилки «ЭЛЕКТА-1», специально разработанной для его реализации [13, 14]. Хотя, согласно нашим собственным исследованиям, предложенный комбинированный способ выполним на всех типах конвективных шахтных зерносушилок поточного действия, но только после небольшой доработки их конструкции [15].

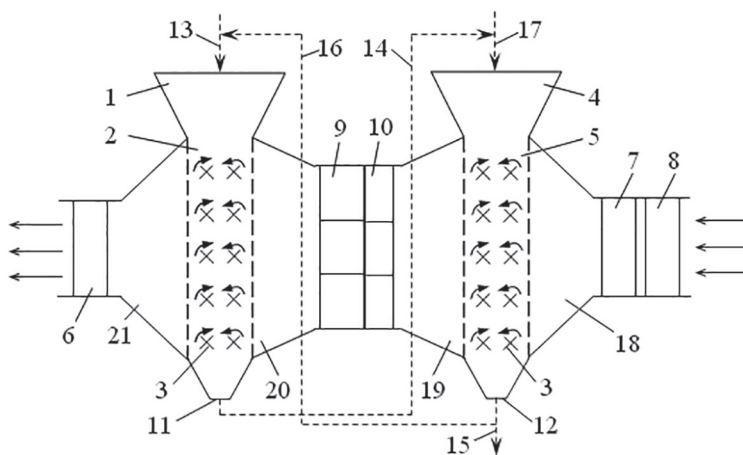
### Материалы и методы исследований

Проведем экспериментальные исследования комбинированного способа высокотемпературной конвективной и озонородушной сушки зерна ячменя на установке «ЭЛЕКТА-1». Исследования выполним для частного случая реализации данного способа, когда на первом этапе происходит только конвективный нагрев материала высокотемпературным теплоносителем без количественно значимого удаления влаги при этом, а на втором этапе горячее зерно сушится продуванием через него неподогретого озонированного воздуха.

Зерносушилка «ЭЛЕКТА-1» (схема которой представлена на рис. 1), на которой проводились опыты, состоит из загрузочного бункера 1 первой сушильной секции, вертикальной камеры высокотемпературной конвективной сушки 2 (первой сушильной секции), в которой расположены равномерно по высоте пять пар ворошителей 3 с горизонтальными осями вращения, выпускного отверстия 11 первой сушильной секции с расположенным на выходе из него шнековым устройством транспортирования зерна (на рис. 1, б не показано), которое подает материал в транспортер 14, перегру-



а



б

Рис. 1. Внешний вид (а) и конструктивно-функциональная схема (б) установки «ЭЛЕКТА-1» для конвективно-озонородушной сушки зерна

жающий зерновой материал с первой секции во вторую, загрузочного бункера 4 второй сушильной секции, вертикальной камеры озонвоздушной обработки зерна 5 (вторая сушильная секция) с ворошителями 3 с таким же расположением и такой же конструкции, как и в камере 2, выпускного отверстия 12 с расположенным на выходе из него устройством транспортирования зерна (на рис. 1, б не показано), которое перемещает материал к выгрузному отверстию установки 15 [13, 14].

В рассматриваемой сушильной установке кроме основного загрузочного устройства 13 с бункером зерна [15], подающего материал в первую сушильную секцию, предусмотрено также устройство 17, предназначенное для отдельной загрузки зерна во вторую сушильную секцию, а также перегрузочный транспортер 16 для возврата зернового материала в первую сушильную камеру на повторный цикл обработки [14].

Система подготовки и транспортирования теплоносителя, работающая в составе установки, содержит вентилятор 8 озонатора, предназначенный для подачи атмосферного воздуха на электроразрядную обработку и одновременно на охлаждение электродов и диэлектрических барьеров разрядника, озонатор объемного барьерного разряда 7 с регулируемой производительностью, воздуховод-конфузор 18, соединяющий выходное отверстие озонатора со второй сушильной секцией 5 установки, дающий возможность поперечной подачи озонированного воздуха в вертикально перемещающийся слой зерна через перфорированную стенку секции, воздуховод-диффузор 19, соединяющий выход второй сушильной секции 5 установки с входом вентиляторов 10, по которому отработанный озонсодержащий воздух подается на подогрев и разложение остаточного озона в теплоэлектронагревателе 9. Затем располагается воздуховод-конфузор 20, соединяющий выход блока ТЭНов с входом первой сушильной секции 2. По нему нагретый теплоноситель подается через перфорированную стенку в вертикально перемещающийся слой зерна, на выходе из которого он попадает в воздуховод-диффузор 21, соединяющий выход первой сушильной секции 2 установки с вытяжным вентилятором б, выполняющим удаление отработанного теплоносителя из установки. Именно вентилятор б обеспечивает последовательную прокачку агента сушки через оба слоя зерна, проходящего обработку в рабочих

камерах 2 и 5 комбинированной зерносушилки [13, 14].

В методике эксперимента, разработанной для исследования конвективно-озонвоздушной сушки зерна на лабораторной установке [11], в качестве варьируемых (управляемых) величин использовались шесть технологических факторов: толщина слоя материала ( $v_3$ , мм); скорость воздуха ( $v_{a.c.} = v_{конв.} = v_{OBC}$ , м/с); начальная влажность зерна ( $W_{нз}$ , %); продолжительность конвективной сушки ( $\tau_{конв.}$ , мин); продолжительность озонвоздушной сушки ( $\tau_{OBC}$ , мин), концентрация озона в OBC ( $O_{оз.} = O_{оз.н}$ , кг/м<sup>3</sup>). Их влияние определялось на параметры оптимизации процесса обезвреживания зернового материала (снижение влажности зерна  $\Delta W = W_{нз} - W_{кз}^{OBC}$  и удельные энергозатраты на испарение влаги  $\mathcal{E}_{уд.}$ ).

В малой производственной установке «ЭЛЕКТА-1» не предусмотрено столь гибкое и разнообразное регулирование технологических параметров исследуемого способа высокотемпературной конвективной и озонвоздушной сушки зерна как в лабораторной, поэтому, чтобы выбрать для данной сушилки варьируемые в опытах факторы, составим и проанализируем параметрическую схему изучаемого варианта комбинированного процесса (рис. 2), которая будет отражать направления движения материальных потоков (зерна, нагретого воздуха, OBC) в установке и основные параметры двухэтапной сушки, протекающей в ней.

#### Конвективный нагрев (1-й этап сушки)

Входными параметрами этапа конвективного нагрева являются: начальная влажность  $W_{нз}$ , температура  $t_{нз}$  и качество зерна  $k_{нз}$ ; температура  $t_{н.в}$ , относительная влажность  $\phi_{н.в}^{конв.}$ , влагосодержание  $d_{н.в}^{конв.}$  и давление  $B_{н.в}^{конв.}$  теплоносителя после ТЭН; продолжительность конвективного нагрева  $\tau_{конв.}$ ; толщина зернового слоя  $v_3$ ; скорость  $v_{н.в}^{конв.}$  и расход  $Q_{н.в}^{конв.}$  агента сушки; расход зерна  $Q_3$ , порозность зернового материала  $\varepsilon$  и суммарная поверхность теплообмена зерновых частиц в слое  $F_{нз}$ ; остаточное количество озона в теплоносителе после ТЭН  $O_{оз}^{ТЭН}$ .

К выходным параметрам относятся: конечная влажность  $W_{кз}^{конв.}$ , температура  $t_{кз}^{конв.}$  и качество зерна  $k_{кз}^{конв.}$ ; конечная температура  $t_{к.в}^{конв.}$ , относительная влажность  $\phi_{к.в}^{конв.}$ , влагосодержание  $d_{к.в}^{конв.}$  и давление  $B_{к.в}^{конв.}$  отработанного агента сушки; конечная скорость  $v_{н.в}^{конв.}$  и расход  $Q_{к.в}^{конв.}$  отработанного агента сушки.

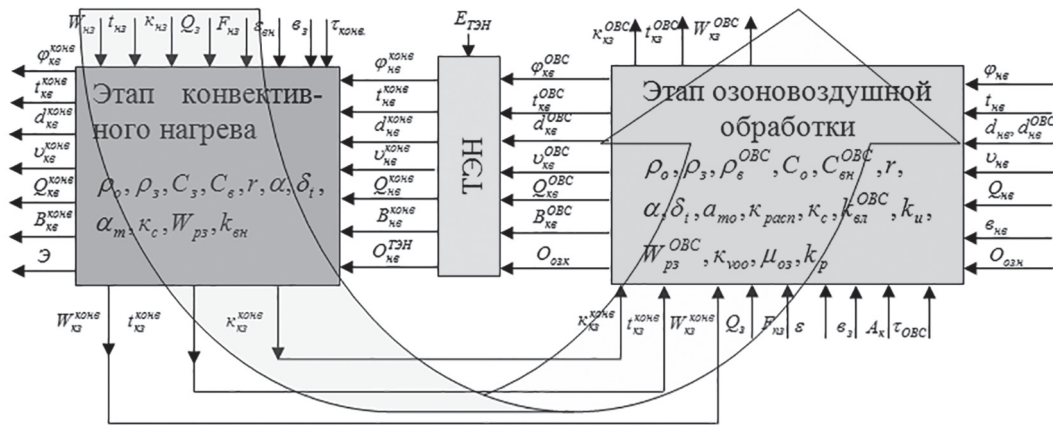


Рис. 2. Параметрическая схема комбинированного процесса конвективно-озонородушной сушки зерна для установки «ЭЛЕКТА-1»

К внутренним параметрам слоя зерна и агента сушки относятся их качественные характеристики, физические, механические, химические, теплофизические и термодинамические свойства: коэффициенты теплообмена  $\alpha$ , массообмена  $k_{\text{вл}}$ , диффузии влаги  $\alpha_m$ , относительный коэффициент термодиффузии влаги  $\delta_r$ , теплоемкость  $C$ , удельная теплота парообразования  $r$ , плотность  $\rho$ , равновесная влажность зерна  $W_{\text{рз}}$  и другие. Все внутренние параметры процесса, как и входные параметры, определяют результаты сушки, т.е. выходные параметры.

#### Озонородушная сушка (2-й этап сушки)

Входными параметрами этапа озонородушной обработки (сушки) являются: начальная влажность  $W_{\text{нз}}^{\text{OBC}}$ , температура  $t_{\text{нз}}^{\text{OBC}}$  и качество зерна  $K_{\text{нз}}^{\text{OBC}}$ ; начальная температура  $t_{\text{нв}}^{\text{OBC}}$ , относительная влажность  $\phi_{\text{нв}}^{\text{OBC}}$ , влагосодержание  $d_{\text{нв}}^{\text{OBC}}$  и давление  $B_{\text{нв}}^{\text{OBC}}$  агента сушки; начальная концентрация озона  $O_{\text{оз.н}}$  в агенте сушки, продолжительность озонородушной сушки  $\tau_{\text{OBC}}$ , площадь поперечного сечения сушильной камеры  $A_k$ , толщина зернового слоя  $v_3$ , начальная скорость  $v_{\text{нв}}^{\text{OBC}}$  и расход  $Q_{\text{нв}}^{\text{OBC}}$  озонородушной смеси, расход зерна  $Q_3$ , порозность зернового материала при механическом ворошении  $\epsilon$  и суммарная поверхность тепло- и массообмена зерновых частиц в слое  $F_{\text{п.з.}}$ .

К выходным параметрам относятся: конечная влажность  $W_{\text{кз}}^{\text{OBC}}$ , температура  $t_{\text{кз}}^{\text{OBC}}$  и качество зерна  $K_{\text{кз}}^{\text{OBC}}$ ; конечная температура  $t_{\text{кв}}^{\text{OBC}}$ , относительная влажность  $\phi_{\text{кв}}^{\text{OBC}}$ , влагосодержание  $d_{\text{кв}}^{\text{OBC}}$  и давление  $B_{\text{кв}}^{\text{OBC}}$  отработавшей озонородушной смеси; конечная концентрация озона  $O_{\text{оз.к}}$  в агенте сушки, конечная скорость  $v_{\text{кв}}^{\text{OBC}}$  и расход  $Q_{\text{кв}}^{\text{OBC}}$  озонородушной смеси.

К внутренним параметрам слоя зерна, озонородушного агента сушки и его компонен-

тов относятся: коэффициенты теплообмена  $\alpha$ , массообмена  $k_{\text{вл}}^{\text{OBC}}$ , диффузии влаги  $\alpha_t$ ; относительный коэффициент термодиффузии влаги  $\delta_r$ , теплоемкость  $C$  (зерна, ОВС), удельная теплота парообразования воды  $r$ , плотность  $\rho$  (зерновки, зернового слоя, ОВС); коэффициенты распада озона в нагретом зерне  $k_{\text{расп.}}$ , объемной массопередачи озона  $K_{\text{воз}}$ , молярного переноса влаги  $k_p^{\text{OBC}}$  и др. Внутренние параметры относятся к исходным данным процесса и находятся из литературных источников (справочников), а в отдельных случаях определяются экспериментально.

Анализ данных параметрической схемы процесса конвективно-озонородушной сушки (рис. 2), составленной для установки «ЭЛЕКТА-1», показал, что фигурирующие в ней технологические факторы (входные, выходные, внутренние) практически идентичны тем, которые рассматривались и использовались при лабораторных экспериментальных исследованиях [11, 12]. А поскольку исследуемые в опытах процессы сушки на лабораторной и производственной установках, в принципе, одинаковы, то варьируемые в эксперименте параметры процесса, полученные в лабораторных опытах, можно перенести с лабораторной сушилки на «ЭЛЕКТА-1» при некоторой их корректировке под ее технические возможности.

В связи с тем, что в проведенных исследованиях на первом этапе комбинированного способа удаления влаги выполнялся только нагрев зерна (без сушки), то экспериментальное изучение процесса на установке «ЭЛЕКТА-1» проведем, управляя только параметрами этапа озонородушной обработки (2-й этап комбинированного способа) [17], при этом время конвективного нагрева  $\tau_{\text{конв.}}$  зерна будет по-

стоянным и напрямую в эксперименте рассматриваться не будет. Температура нагрева теплоносителя, подаваемого в слой зернового материала в процессе опытов, на 1-м этапе конвективно-озоновоздушного способа сушки составляет  $t_{\text{нв}}^{\text{копв.}} = 82\text{--}85\text{ }^\circ\text{C}$ , а величина нагрева влажного зерна на этапе конвективной обработки немного колеблется и составляет  $t_{\text{кз}}^{\text{копв.}} = 45\text{--}52\text{ }^\circ\text{C}$ , что не превышает допустимой температуры нагрева зерна, способной ухудшить его качество.

Поскольку прочность связей влаги с сухим веществом зерна, величина влагосъема в процессе сушки, его интенсивность и удельные энергозатраты существенно зависят, в том числе, и от начальной влажности зернового материала, то исследование и моделирование конвективно-озоновоздушной сушки проводилось отдельно для трех значений начальной влажности зерна 20, 25 и 30 %. При этом для опытов использовалось искусственно увлажненное до заданных значений зерно ячменя, прошедшее отлежку в течение двух суток в герметичных условиях при положительных пониженных температурах окружающего воздуха (7–11 °C) с целью обеспечения равномерного распределения влаги по объему отдельных зерновых частиц зерновой массы, подготавливаемой для экспериментов [12, 17].

Выходными контролируемыми параметрами процесса конвективно-озоновоздушной сушки в эксперименте являлись: конечная влажность 1 м<sup>3</sup> зерна ( $W_{i,p}$ , %), уменьшение продолжительности удаления влаги ( $\Delta t \Theta_{i,p}$ , %) и снижение величины энергозатрат на процесс ( $\Theta_{i,p}$ , %). Варьируемыми в опыте технологическими факторами на этапе озоновоздушной сушки приняты: подача озона на 1 м<sup>3</sup> высушиваемого зерна ( $Q_{\text{оз}}$ , мг/с) и время сушки ( $\tau$ , мин). Величина подачи озона вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{оз}} = \frac{O_{\text{оз.н.}} \cdot Q_{\text{н.в.}}}{V_3 \cdot A_{\text{к}}} \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что  $Q_{\text{оз}}$  является комплексным параметром, включающим в себя три варьируемых фактора с этапа лабораторных исследований [11, 12]  $Q_{\text{оз}} = f(O_{\text{оз}}, v_{\text{ОВС}}, V_3)$ , а также площадь поперечного сечения сушильной камеры ( $A_{\text{к}}$ , м<sup>2</sup>) и толщину зернового слоя ( $V_3$ , м) в опытах, проводимых на сушилке «ЭЛЕКТА-1», исходя из ее конструктивных особенностей, являются постоянными величинами одинаковыми для этапа конвективного нагрева и этапа озono-воздушной сушки.

Уровни варьирования подачи озона на 1 м<sup>3</sup> высушиваемого зерна в экспериментах приняты для начальной влажности зернового материала  $W_{1\text{н.з.}} = 30\text{ \%}$  –  $Q_{\text{оз}} = 4, 12$  и  $20$  мг/с; для  $W_{2\text{н.з.}} = 25\text{ \%}$  –  $Q_{\text{оз}} = 2, 7$  и  $12$  мг/с; и для  $W_{3\text{н.з.}} = 20\text{ \%}$  –  $Q_{\text{оз}} = 6, 18$  и  $30$  мг/с. Время сушки изменяется  $\tau =$  от 0 до 260 мин с интервалом в  $\Delta t = 10$  мин (всего  $n = 27$  точек замера), притом, что в каждый момент фиксирования времени сушки отбиралась проба зерна ячменя для оценки ее относительной влажности. Влажность опытных проб зерна определялась весовым методом в четырех повторностях по ГОСТ 13586.5-93 на базе агрохимической лаборатории СКНИИМЭСХ.

Способ сушки зерна, исследуемый «в контроле», также как и в основных опытах, состоял из двух этапов: на 1-ом этапе происходил конвективный нагрев материала без существенного для практики удаления влаги, а на 2-м выполнялась сушка зерна атмосферным неподогретым воздухом не содержащим озон. На обоих этапах снижения влажности «в контроле» расход воздуха через слой высушиваемого материала составлял  $Q_{\text{в}}^{\text{копв.}} = Q_{\text{в}}^{\text{атм.}} = 870\text{--}900$  м<sup>3</sup>/ч. Изменение времени сушки на 2-м этапе процесса (при обработке атмосферным воздухом) происходило в том же диапазоне и с таким же интервалом варьирования, как и на этапах сушки ОВС в опытах, и с оценкой величины относительной влажности высушиваемого зерна в фиксируемые моменты времени.

### Анализ и обсуждение результатов исследований

Обработку экспериментальных данных для трех разных вариантов комбинированной конвективно-озоновоздушной сушки зерна проводили с использованием специализированной компьютерной программы Statistica.

В результате статистической обработки опытных данных [18–19], полученных при исследовании комбинированного способа сушки зерна с начальной влажностью  $W_{1\text{н.з.}} = 30\text{ \%}$  (1-й вариант процесса), была построена поверхность отклика (рис. 3), которая имеет единственный явно выраженный минимум и представляет собой зависимость влажности 1 м<sup>3</sup> высушиваемого зерна ( $W = W_3^{30\text{ \%}}$ , %) от подачи озона ( $Q_{\text{оз}}$ , мг/с) и времени сушки ( $\tau$ , мин). Данная поверхность математически описывается уравнением регрессии второго порядка (2), которое представляет собой

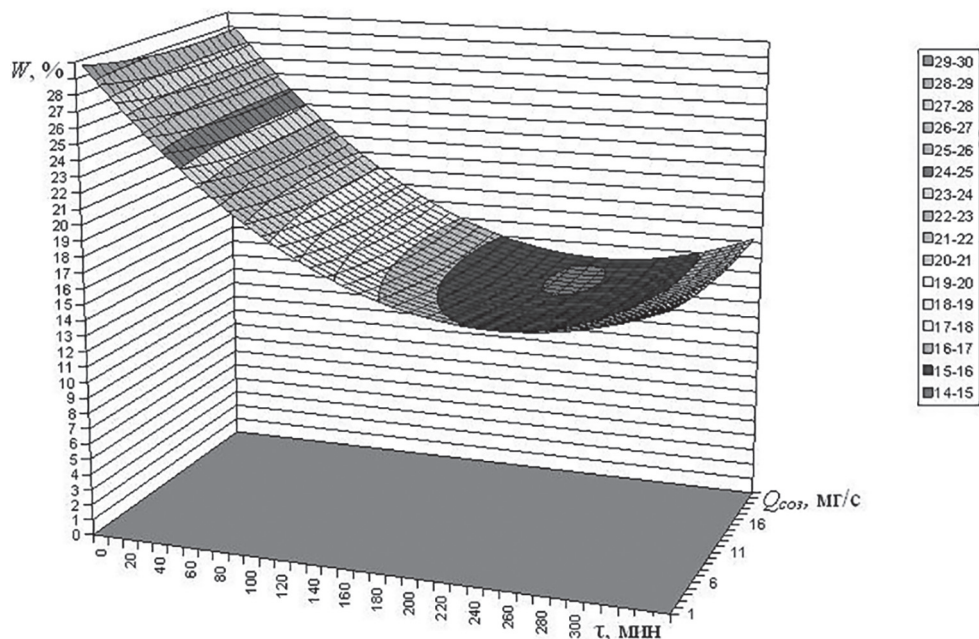


Рис. 3. Поверхность отклика, описывающая процесс конвективно-озонородушной сушки 1 м<sup>3</sup> зерна с начальной влажностью  $W_{н.з.} = 30\%$

аналитическую модель процесса комбинированной электрофизической сушки зерна  $W_3^{30\%} = f(Q_{оз}, \tau)$ :

$$W_3^{30\%} = 29,9498 - 0,13922 \cdot Q_{оз} - 0,11048 \cdot \tau + 0,00423 \cdot Q_{оз}^2 + 0,00022 \cdot \tau^2. \quad (2)$$

Проверка адекватности уравнения (2) была выполнена на основе вычисления критерия Фишера ( $F_{30\%}$ ) по методике В.М. Гусарова [20, 21] и сравнения полученного значения с критическим (табличным) значением  $F$ -критерия ( $F_{крит.}$ ) при условии обязательного соблюдения неравенства  $F_{30\%} > F_{крит.}$ .

Расчетное значение критерия Фишера составило  $F_{30\%} = 3289,43$ , а критическое значение  $F$ -критерия для принятого уровня значимости 0,05 и чисел степеней свободы  $v_1 = m - 1 = 1$  (где  $m$  – число варьируемых факторов в опыте,  $m = 2$ ),  $v_2 = n - 2 = 25$  (где  $n$  – число вариантов в опыте,  $n = 27$ ) равно  $F_{крит.}(1; 25) = 4,2417$  [21]. Поскольку неравенство  $F_{30\%} > F_{крит.}$  соблюдено, то уравнение регрессии (2) статистически значимо.

Обработка в программе Statistica данных эксперимента по исследованию электротехнологии конвективно-озонородушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{н.з.} = 25\%$  (2-й вариант процесса) позволила построить поверхность отклика, которая показана на

рис. 4 и имеет такой же единственный четко выраженным минимумом, как и у функции  $W_3^{30\%} = f(Q_{оз}, \tau)$  в предыдущем опыте. Полученная 3D-зависимость процесса снижения влажности зерна математически описывается уравнением регрессии второго порядка:

$$W_3^{25\%} = 25,62645 - 0,22697 \cdot Q_{оз} - 0,12442 \cdot \tau + 0,01176 \cdot Q_{оз}^2 + 0,00032 \cdot \tau^2. \quad (3)$$

Адекватность разработанной аналитической модели процесса сушки (3) оценивали путем вычисления критерия Фишера по В.М. Гусарову [20, 21] для ряда экспериментальных данных, полученных в опыте, и сравнения его с критическим (табличным) значением  $F$ -критерия. Расчетная величина критерия Фишера составила  $F_{25\%} = 9734,81$ , критическое значение  $F$ -критерия для принятого уровня значимости 0,05 и чисел степеней свободы  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = 25 - F_{крит.}(1; 25) = 4,2417$  [21]. Поскольку неравенство  $F_{25\%} > F_{крит.}$  соблюдено, то уравнение регрессии (3) является статистически значимым.

В результате компьютерной статистической обработки опытных данных, которые собраны в ходе исследования способа конвективно-озонородушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{н.з.} = 20\%$  (3-й вариант процесса), получено уравнение регрессии второго порядка:

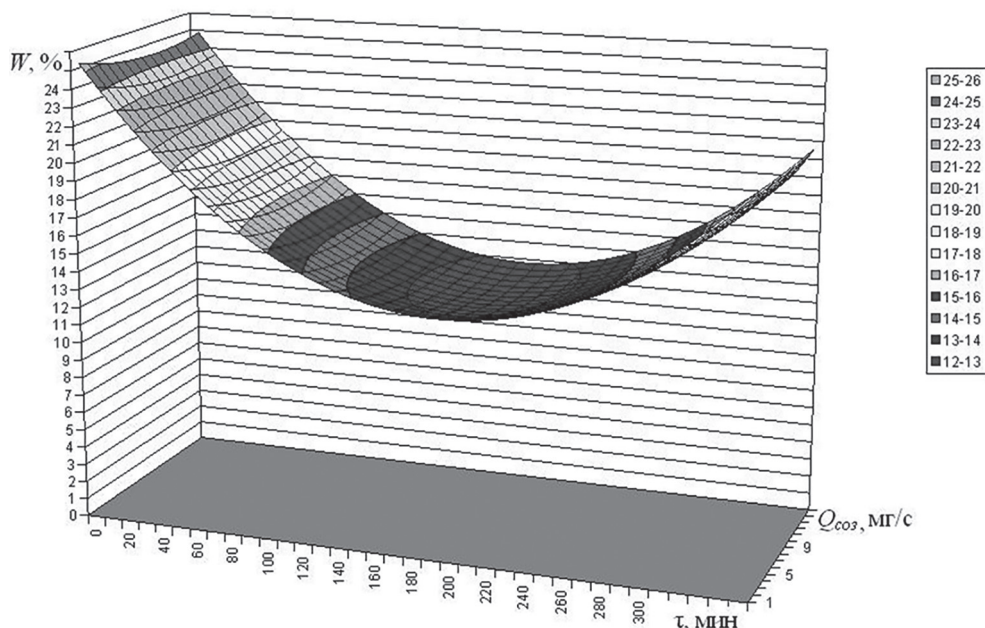


Рис. 4. Поверхность отклика, описывающая процесс конвективно-озоновоздушной сушки 1 м<sup>3</sup> зерна с начальной влажностью  $W_{2н.з.} = 25\%$

$$W_3^{20\%} = 18,78002 - 0,04674 \cdot Q_{\text{coз}} - 0,07337 \cdot \tau - 0,00224 \cdot Q_{\text{coз}}^2 + 0,00021 \cdot \tau^2. \quad (4)$$

Данное уравнение представляет собой аналитическую модель процесса снижения влажности зерна  $W_3^{20\%} = f(Q_{\text{coз}}, \tau)$ . Поскольку поверхность отклика, математически описываемая уравнением (4) [17], не имеет экстремальных точек и представляет собой последовательно снижающуюся функцию влажности зерна ( $W = W_3^{20\%}$ , %) в зависимости от варьируемых в опыте факторов процесса, достаточно типичной формы для классических способов сушки зерновых культур (конвективного, кондуктивного, активного вентилирования и др.). Ее графическая интерпретация в статье не приводится.

Для проверки адекватности разработанного уравнения регрессии (4) вычисляли по методике В.М. Гусарова [20, 21] расчетное значение критерия Фишера, которое для экспериментальных данных исследованного процесса комбинированной сушки зерна 20%-й влажности составляет  $F_{20\%} = 4903,25$ , при этом критическое (табличное) значение  $F$ -критерия для уровня значимости 0,05 и чисел степеней свободы  $\nu_1 = 1$ ,  $\nu_2 = 25$  принималось равным  $F_{\text{крит.}}(1; 25) = 4,2417$  [21]. Сравнение найденного расчетного и критического критериев Фишера по-

казало, что соблюдено требуемое неравенство между ними:  $F_{20\%} > F_{\text{крит.}}$ , которое подтверждает статистическую значимость уравнения (4).

Для отыскания значения минимальной влажности высушиваемого зерна при различных режимах комбинированной конвективно-озоновоздушной сушки полученные функции (зависимости) двух переменных для разных начальных влажностей обрабатываемого зерна (2), (3), (4) были исследованы на экстремум [18].

В общем виде уравнения регрессии (2), (3) и (4) могут быть записаны в виде уравнения:

$$W = a_0 + a_1 \cdot Q_{\text{coз}} + a_2 \cdot \tau + a_3 \cdot Q_{\text{coз}}^2 + a_4 \cdot \tau^2. \quad (5)$$

Для уравнения (5) находились первые частные производные по каждой переменной:

$$W'_Q = a_1 + 2 \cdot a_3 \cdot Q_{\text{coз}}, \quad (6)$$

$$W'_\tau = a_2 + 2 \cdot a_4 \cdot \tau. \quad (7)$$

Для поиска корней системы уравнений найденные частные производные (6) и (7) приравнялись к нулю

$$\begin{cases} a_1 + 2 \cdot a_3 \cdot Q_{\text{coз}} = 0, \\ a_2 + 2 \cdot a_4 \cdot \tau = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Технологический параметр подачи озона на 1 м<sup>3</sup> высушиваемого зерна выражался из первого уравнения системы (8):

$$Q_{\text{coз}} = -\frac{a_1}{2 \cdot a_3}, \quad (9)$$



а продолжительность конвективно-озонородушной сушки зерна выводилась из второго уравнения системы (8):

$$\tau = -\frac{a_2}{2 \cdot a_4}. \quad (10)$$

В результате проведения вычислений по формулам (9) и (10) получали стационарную точку экстремума с координатами  $P = (Q_{\text{CO}_2}, \tau)$  для конкретных экспериментальных данных исследуемых вариантов процесса сушки и построенных по ним уравнениям регрессии (2), (3) и (4).

В первую очередь рассчитывались координаты минимальной точки влажности зернового материала  $P_1 = W_3^{30\% \text{ min}} = (Q_{\text{CO}_2}^{30\% \text{ min}}, \tau_{30\% \text{ min}})$  для поверхности отклика, построенной по данным исследования процесса конвективно-озонородушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{1.н.з.} = 30\%$ . Для этого коэффициенты  $a_1 = -0,13922$  и  $a_3 = 0,00423$  из уравнения (2) подставляли в формулу (9), а коэффициенты  $a_2 = -0,12442$  и  $a_4 = 0,00032$  – в формулу (10). В результате вычислений получили:  $Q_{\text{CO}_2}^{30\% \text{ min}} = 16,46$  мг/с,  $\tau_{30\% \text{ min}} = 251,1$  мин. При подстановке значений  $Q_{\text{CO}_2}^{30\% \text{ min}}$  и  $\tau_{30\% \text{ min}}$  в формулу (2) находили минимальное значение влажности зерна  $W_3^{30\% \text{ min}} = 14,93\%$ .

Аналогичным образом проводился расчет координат минимальной точки влажности зерна  $P_2 = W_3^{25\% \text{ min}} = (Q_{\text{CO}_2}^{25\% \text{ min}}, \tau_{25\% \text{ min}})$  для поверхности отклика, построенной по данным исследования процесса двухэтапной высокотемпературной конвективной и озонородушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{2.н.з.} = 25\%$ . Только для этого в формулу (9) подставляли коэффициенты  $a_1 = -0,22697$  и  $a_3 = 0,01176$  из уравнения (3), а в формулу (10) – коэффициенты  $a_2 = -0,12442$  и  $a_4 = 0,00032$  и в результате вычислений получили:  $Q_{\text{CO}_2}^{25\% \text{ min}} = 9,65$  мг/с,  $\tau_{25\% \text{ min}} = 194,4$  мин. При подстановке значений  $Q_{\text{CO}_2}^{25\% \text{ min}}$  и  $\tau_{25\% \text{ min}}$  в формулу (3) и выполнения по ней вычислений находили минимальное значение влажности зерна, которое составило  $W_3^{25\% \text{ min}} = 12,44\%$ .

Анализ найденных по регрессионным математическим моделям (2) и (3) оптимальных режимов комбинированной электрофизической сушки зерна с начальными влажностями 30 и 25 %, показал, что полученное время снижения содержания избыточной влаги в материале в исследованных процессах составило:  $\tau_{30\% \text{ min}} = 251,1$  мин. и  $\tau_{25\% \text{ min}} = 194,4$  мин, соответственно, и что оно (время) избыточно велико

для поточных способов сушки, при которых обрабатываемое нагретым и озонированным воздухом зерно должно в непрерывном режиме перемещаться через рабочую камеру сушильной установки и за это время достигать кондиционной влажности ( $W_3^{\text{конд.}} = 14\%$  [22, 23]). Причина большой продолжительности влагосьема отчасти связана с особенностями проведения экспериментальных исследований процессов конвективно-озонородушной сушки, которые состояли в том, что только короткий промежуток времени на этапе обработки неподогретым озонированным воздухом (2-й этап) высушиваемый материал в установке «ЭЛЕКТА-1» перемещался в плотном вертикальном слое, характерном для поточных способов сушки, а большую часть времени опыта зерно находилось в стационарном слое, из-за чего и была получена значительная величина  $\tau_{30\% \text{ min}}, \tau_{25\% \text{ min}}$ . Основным путем сокращения в рассматриваемом случае продолжительности процесса комбинированной сушки в целом и этапа озонородушной обработки в частности является выполнение не только на этапе высокотемпературной конвективной сушки (1-й этап процесса) нагрева зерна, но и существенного снижения его влажности (не менее чем 50 % от необходимой величины влагосьема). Следует отметить, что повышение энергозатрат на комбинированную сушку за счет увеличения в ней времени этапа тепловой конвективной обработки не произойдет, так как при высоких (более 22 %) начальных влажностях зерна (в нашем случае это 25 и 30 %) в нем содержится большое количество слабосвязанной поверхностной влаги, которая с высокой интенсивностью, пропорциональной величине подводимой тепловой энергии, и с низкими удельными энергозатратами удаляется в процессе конвективной сушки [23, 24] и одновременно позволяет достигнуть максимализации влагосьема на озонородушном этапе при сокращении энергопотребления на комбинированную электротехнологию снижения влажности в целом в соответствии с разработанным физическим механизмом протекания тепло-массообменных процессов в зерне при конвективно-озонородушной сушке [7, 8] и за счет рациональной технологической компоновки процесса [9, 10].

Для выявления рационального соотношения продолжительностей 1-го (конвективного) и 2-го (озонородушного) этапов и доли удаляемой избыточной влаги на каждом из них в составе комбинированного способа сушки необ-

ходимо в дальнейшем проведение специальных экспериментальных исследований.

Расчет координат минимальной точки влажности зернового сырья  $P_3 = W_3^{20\% \text{ min}} = (Q_{\text{CO}_2}^{20\% \text{ min}}, \tau_{20\% \text{ min}})$  для уравнения регрессии (4), аналитически описывающего характер изменения функции  $W_3^{20\%} = f(Q_{\text{CO}_2}, \tau)$  и закономерности протекания процесса конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{3.н.з.} = 20\%$ , при подстановке коэффициентов  $a_1 = -0,04674$  и  $a_3 = -0,00224$  из выражения (4) в формулу (9), а коэффициентов  $a_2 = -0,07337$  и  $a_4 = 0,00021$  в формулу (10), показал по результатам вычислений, что величина подачи озона в  $1 \text{ м}^3$  зерна ( $Q_{\text{CO}_2}^{20\% \text{ min}}$ ) получается отрицательной, а минимум регрессионной модели (4) при этом уходит в область мнимых значений. Таким образом, в условиях отсутствия минимума функции у модели (4) для проведения по ней расчетов по определению снижения продолжительности комбинированной сушки и сокращения энергозатрат на процесс в качестве минимальной конечной влажности зерна после обезвоживания принимаем рациональное ее значение, которым является кондиционная влажность, равная  $W_3^{\text{конд.}} = W_{3.к.з.}^{20\% \text{ min}} = 14\%$ , при которой ячмень может безопасно храниться длительное время без потерь качества [22, 23].

Для расчета величины снижения времени конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{3.н.з.} = 20\%$  по отношению к контролю на основе уравнения регрессии (4) построили показанный на рис. 5 график зависимости  $Q_{\text{CO}_2} = f(\tau)$  для всего диапазона варьируемых в опыте факторов, обеспечивающих получение действительных значений выходного параметра  $Q_{\text{CO}_2}$ .

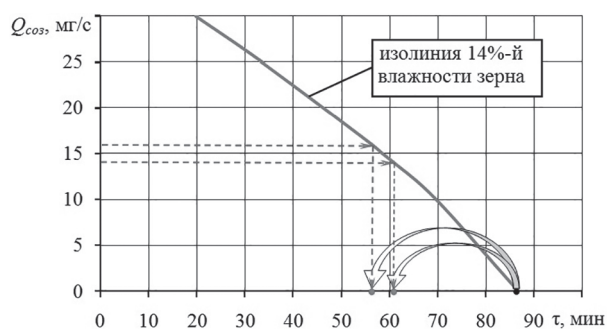


Рис. 5. График зависимости  $Q_{\text{CO}_2} = f(\tau)$  для расчета снижения времени сушки  $1 \text{ м}^3$  зерна от начальной влажности  $W_{3.н.з.} = 20\%$  до конечной  $W_{3.к.з.} = 14\%$  (изолиния)

Стандартными условиями по влагоусьему для тепловых способов сушки является снижение относительной влажности зерна за один цикл процесса на  $\Delta W_{\text{ст.з.}} = 6\%$  от начальной влажности  $W_{3.н.з.} = 20\%$  до конечной  $W_{3.к.з.} = 14\%$  [5, 23]. Рациональными значениями подачи озона на  $1 \text{ м}^3$  зерна от озонатора барьерного разряда в установке «ЭЛЕКТА-1» в рассматриваемом варианте процесса, согласно графика, представленного на рис. 5, являются  $Q_{\text{CO}_2}^{20\%} = 14\text{--}16 \text{ мг/с}$ , при которых время сушки в контроле снижается с  $\tau_{\text{контр.}}^{20\%} = 86,6$  мин до рациональных значений продолжительности комбинированного процесса в опыте  $\tau_{\text{рац.}}^{20\%} = 56,2\text{--}60,8$  мин, то есть затраты времени на влагоусьем уменьшаются на  $\Delta \tau_{\text{контр.-OBC}}^{20\%} = 30\text{--}35\%$ .

Учитывая, что вместе с уменьшением затрат времени на проведение конвективно-озоновоздушной сушки зерна ячменя с начальной влажностью  $W_{3.н.з.} = 20\%$  происходит снижение продолжительности работы энергоемких элементов сушильной установки «ЭЛЕКТА-1» (рис. 1, а, б), таких как привод вытяжного вентилятора (основной), ТЭНы, приводы вентиляторов работающих вместе с ТЭНами, приводы ворошителей, устройств транспортирования зерна из-под сушильных секций, загрузочно-го, возвратного и перегрузочного шнеков, при этом величина уменьшения энергозатрат на удаление влаги составляет  $\Delta \mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{20\%} = 30\text{--}35\%$  [17, 24]. Кроме того, происходит сокращение энергоемкости сушки за счет рекуперации тепла со 2-го этапа комбинированного процесса ( $\Delta \mathcal{E}_{\text{рек.}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{рек.}}^{20, 25, 30\%} = 5\text{--}10\%$  [17]), на котором через нагретое зерно продувается неподогретый озонированный воздух. При этом выполняется предварительный нагрев теплоносителя (отработанной озоновоздушной смеси) для 1-го этапа сушки, который только после этого догревается до высокотемпературного состояния на ТЭНах и за счет термического разложения (идущего с выделением тепла) остаточного озона, не использованного на этапе обработки зерна ОВС [6, 10, 17]. Суммарное снижение энергозатрат на комбинированный процесс сушки зерна составляет  $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma}^{20\%} = \Delta \mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{20\%} + \Delta \mathcal{E}_{\text{рек.}}^{20\%} = 35\text{--}40\%$ .

Для расчета величин уменьшения продолжительности высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна ячменя с начальными влажностями  $W_{1.н.з.} = 30\%$  и  $W_{2.н.з.} = 25\%$  по отношению к контролю построим с использованием уравнений регрессии (2)

и (3), соответственно, два контурных графика поверхностей отклика  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{CO}_2}, \tau)$ ,  $W_3^{25\%} = f(Q_{\text{CO}_2}, \tau)$  и выделим на каждом из них укрупненные графические элементы, показанные на рис. 6 и 7, на которых наиболее четко визуальнo отражается величина снижения затрат времени в рассматриваемом процессе комбинированной сушки при оптимальных для производственных условий режимах обработки зернового материала.

По результатам исследования на экстремум функции (2) было найдено, что оптимальным значением подачи озона на  $1 \text{ м}^3$  зерна в процессе комбинированной сушки является  $Q_{\text{CO}_2}^{30\% \text{ min}} = 16,46 \text{ мг/с}$ . При этом, как показывают расчеты по уравнению (2), изменение величины подачи озона в диапазоне  $Q_{\text{CO}_2} = 14\text{--}19 \text{ мг/с}$  вызывает колебание показателя эффективности (в нашем случае времени удаления влаги) процесса конвективно-озонородушной обработки (рис. 6) не более чем на  $0,1\text{--}0,3 \%$ , что для практики несущественно, поэтому считаем, что сушка зерна в обозначенном интервале подач озона протекает на рациональных режимах. Затраты времени на комбинированное электрофизическое удаление влаги из зерна при  $6\%$ -м влагосъеме за один цикл процесса от начальной влажности  $W_{\text{н.з.}} = 30 \%$  до промежуточно-конечной влажности  $W_{\text{к.з.}}^{30\% (1 \text{ цикл})} = 24 \%$ , согласно анализу рис. 6, в контроле составляют  $\tau_{\text{контр.}}^{30\%} = 63 \text{ мин}$ , а при конвективно-озонородушной сушке на рациональных режимах –  $\tau_{\text{рац.}}^{30\% (1 \text{ цикл})} = 45,5 \text{ мин}$ , что соответ-

ствует снижению времени на исследованный процесс на  $\Delta\tau_{\text{конв.-ОВС}}^{30\%} = 28 \%$ .

Уменьшение энергозатрат на удаление влаги в установке «ЭЛЕКТА-1», за счет полученного снижения продолжительности работы в ней энергопотребителей и возникновения технологических эффектов интенсификации влагопереноса в зерне и энергоэкономии в процессе сушки, составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{30\%} = 28\text{--}33 \%$  [17, 24], а с учетом энергосбережения от рекуперации тепла с этапа воздействия на влажный зерновой материал озонородушной смеси (ОВС), величина которого составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{30\%} = 5\text{--}10 \%$  [17], суммарное снижение энергозатрат на высокотемпературную конвективную и озонородушную сушку ячменя  $30\%$ -й начальной влажности составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{30\%} = \Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{30\%} + \Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{30\%} = 33\text{--}43\%$ .

Для определения величины сокращения продолжительности конвективно-озонородушной сушки зерна ячменя с начальной влажностью  $W_{\text{н.з.}} = 25 \%$ , по сравнению с контролем, за один стандартный цикл влагосъема, который составляет  $\Delta W_{\text{ст.з.}} = 6 \%$ , принимаем, по результатам исследования на экстремум уравнения регрессии (3) и проверочных расчетов по нему на предмет снижения эффективности удаления влаги, что рациональный диапазон значений подачи озона на  $1 \text{ м}^3$  зерна для рассматриваемого способа сушки равен  $Q_{\text{CO}_2}^{25\%} = 9\text{--}10 \text{ мг/с}$ . Для указанных режимов реализации процесса, согласно анализу данных по рис. 7, получаем, что продолжительность

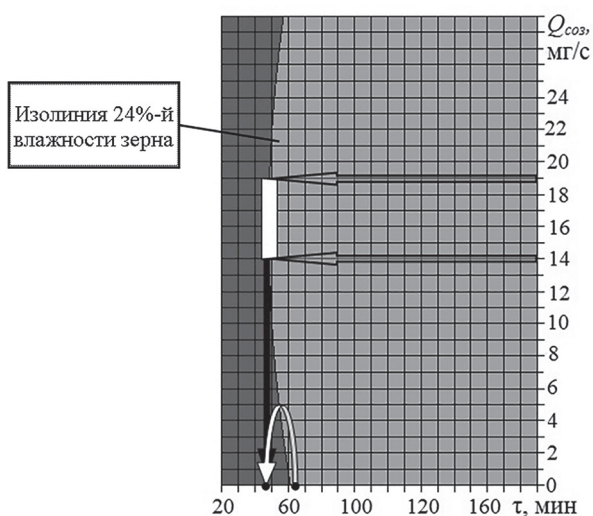


Рис. 6. Элемент контурного графика поверхности отклика  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{CO}_2}, \tau)$  для расчета снижения времени сушки  $1 \text{ м}^3$  зерна с начальной влажностью  $W_{\text{н.з.}} = 30 \%$

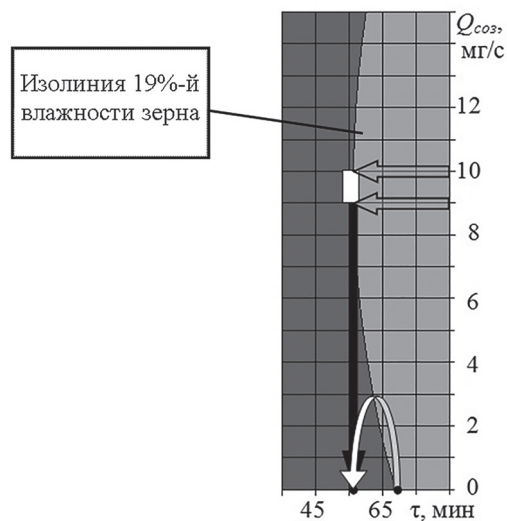


Рис. 7. Элемент контурного графика поверхности отклика  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{CO}_2}, \tau)$  для расчета снижения времени сушки  $1 \text{ м}^3$  зерна с начальной влажностью  $W_{\text{н.з.}} = 25 \%$

снижения влажности зерна в контроле составляет  $\tau_{\text{контр.}}^{25\%} = 69$  мин, а время протекания комбинированной электрофизической сушки –  $\tau_{\text{рац.}}^{25\%} = 56$  мин, что соответствует сокращению продолжительности процесса конвективно-озоновоздушной обработки на  $\Delta\tau_{\text{конв.-ОВС}}^{25\%} = 19\%$ . С учетом этого уменьшение энергозатрат на удаление влаги из зерна с  $W_{2.н.з.} = 25\%$  в установке «ЭЛЕКТА-1», за счет сокращения времени работы энергоемкого оборудования зерносушилки и получения энергосэкономии от физико-технологических эффектов, возникающих в материале при комбинированном способе сушки, составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{25\%} = 19\text{--}25\%$  [17, 24]. С учетом величины энергосбережения от рекуперации тепла со 2-го этапа процесса конвективно-озоновоздушной обработки, равной  $\Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{25\%} = 5\text{--}10\%$  [17], получаем, что суммарное снижение энергозатрат на исследуемый вариант комбинированной электротехнологии сушки составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{25\%} = \Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{25\%} + \Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{25\%} = 24\text{--}35\%$ .

### Заключение

По результатам экспериментальных исследований на базе установки «ЭЛЕКТА-1» частного случая способа высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна ячменя для трех значений начальной влажности – 20, 25 и 30 % построены две поверхности отклика и три уравнения регрессии второго порядка вида  $W_3^{20\%, 25\%, 30\%} = f(Q_{\text{СОЗ}}, \tau)$ , прошедшие проверку статистической значимости по  $F$ -критерию. Анализ регрессионных математических моделей конвективно-озоновоздушной сушки показал следующее:

– при 6%-м удалении влаги из зерна с начальной влажностью  $W_{3.н.з.}^{20\%} = 20\%$  при подаче озона в  $1 \text{ м}^3$  материала  $Q_{\text{СОЗ}}^{20\%} = 14\text{--}16$  мг/с снижение продолжительности процесса обезвоживания по сравнению с контролем происходит на  $\Delta\tau_{\text{конв.-ОВС}}^{20\%} = 30\text{--}35\%$ , а уменьшение энергоемкости сушки с учетом рекуперации тепла со 2-го этапа озон-воздушной обработки составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{20\%} = 35\text{--}40\%$ ;

– при 6%-м удалении влаги из зерна с начальной влажностью  $W_{2.н.з.} = 25\%$  при подаче озона в  $1 \text{ м}^3$  материала  $Q_{\text{СОЗ}}^{25\%} = 9\text{--}10$  мг/с снижение продолжительности процесса происходит на  $\Delta\tau_{\text{конв.-ОВС}}^{25\%} = 19\%$ , а уменьшение суммарных энергозатрат на сушку с учетом рекуперации тепла составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{25\%} = 24\text{--}35\%$ .

– при 6%-м удалении влаги из зерна ячменя с начальной влажностью  $W_{1.н.з.} = 30\%$  и при подаче озона в  $1 \text{ м}^3$  материала  $Q_{\text{СОЗ}}^{30\%} = 14\text{--}19$  мг/с снижение продолжительности процесса удаления влаги происходит на  $\Delta\tau_{\text{конв.-ОВС}}^{30\%} = 28\%$ , а уменьшение суммарной энергоемкости сушки с учетом рекуперации тепла составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{30\%} = 33\text{--}43\%$ .

Рассматриваемый способ конвективно-озоновоздушной сушки зерна ячменя подтвердил свою высокую эффективность как по критерию интенсификации удаления влаги, так и по критерию снижения энергозатрат на процесс. Однако, как показали проведенные опыты в сравнении с лабораторными, потенциал исследованного варианта комбинированного способа сушки в части уменьшения продолжительности процесса, при полупоточной технологии исполнения реализуется далеко не полностью из-за остающихся довольно большими затрат времени на снижение содержания влаги в зерне от его начальных значений до кондиционной влажности.

В дальнейших исследованиях способа высокотемпературной конвективной и озон-воздушной сушки необходимо на 1-м этапе конвективной обработки не только нагревать материал, но и проводить его существенную подсушку, особенно для зерна с начальной влажностью 25 и 30 %. При этом для зернового материала с начальной влажностью 20 % кроме увеличения влагосъема на 1-м этапе процесса необходимы экспериментальные исследования конвективно-озоновоздушной сушки по использованию на 2-м этапе озон-воздушной обработки более высоких подач озона на  $1 \text{ м}^3$  зерна, главным образом, за счет увеличения концентрации озона в ОВС.

### Литература

1. Петриченко В.В. Августовский прогноз урожая зерна 2017 г. – 132 млн т (сверхрекорд) // Хлебопродукты. 2017. № 9. С. 4–5.
2. Петриченко В.В. Июньский прогноз урожая зерна 2016 г. – рекорд – 110,1 млн т // Хлебопродукты. 2016. № 7. С. 6–8.
3. Петриченко В.В. Июльский прогноз урожая зерна в России в 2015 г. // Хлебопродукты. 2015. № 9. С. 4–7.
4. Петриченко В.В. Урожай зерна в России в 2014 г. – более 100 млн т // Хлебопродукты. 2014. № 9. С. 4–6.

5. Елизаров В.П., Антышев Н.М., Бейлис В.М. и др. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве / М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. С. 140–143.
6. Способ сушки зерновых материалов: пат. № 2422741 РФ, МПК F26 В3/14 / В.И. Пахомов, В.А. Максименко, К.Н. Буханцов; заявитель и патентообладатель: ВНИПТИМЭСХ. № 2010106531/06, заявл.: 24.02.2010, опубли.: 27.06.2011, Бюл. № 18. 13 с.
7. Пахомов В.И., Буханцов К.Н., Максименко В.А. Двухэтапный комбинированный способ высокотемпературной сушки зерна. Ч. 1 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 12. С. 56–60.
8. Пахомов В.И., Буханцов К.Н., Максименко В.А. Двухэтапный комбинированный способ высокотемпературной сушки зерна. Ч. 2 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 1. С. 53–58.
9. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Энергосберегающая технология высокотемпературной конвективной сушки и озонородушной обработки зерна. Ч. 1 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 5. С. 19–25.
10. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Энергосберегающая технология высокотемпературной конвективной сушки и озонородушной обработки зерна. Ч. 2 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 6. С. 23–27.
11. Буханцов К.Н. Методика проведения экспериментальных исследований конвективно-озонородушной сушки зерновых материалов // Механизация технологических процессов в животноводстве: технологии, машины, оборудование: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конференции «Ресурсосберегающие технологии и инновационные проекты в АПК» (г. Зерноград Ростовской обл., ВНИПТИМЭСХ, 14–15 апреля 2009 г.). Зерноград, 2009. С. 265–276.
12. Проведение экспериментальных исследований фрагментов энергоэкономных электротехнологий и процессов обработки растительных сельскохозяйственных материалов с использованием электрофизических методов и разработка оптимизационной математической модели: отчет о НИР (промежуточ.): 09.02.02.01 / ВНИПТИМЭСХ; рук. В.Д. Каун. Зерноград, 2008. 46 с. № ГР 15070.7721019635.06.8.002.0.
13. Максименко В.А., Буханцов К.Н. Многофункциональная установка малой производительности для реализации электротехнологий послеуборочной и предпосевной обработки зерна и семян // О проблемах обеспечения в современных условиях количественной и качественной сохранности материальных ценностей, поставляемых и складываемых в государственный резерв: сборник докладов Междунар. науч.-практ. конференции (г. Москва, ФГБУ НИИ проблем хранения Росрезерва, 5–6 сентября 2011 г.). М.: ООО «Галлея-Принт», 2011. Ч. 2. С. 158–168.
14. Пахомов В.И., Буханцов К.Н. Реализация технологий комбинированной сушки, обеззараживания и стимулирования посевных свойств зерна и семян на базе установки «ЭЛЕКТА-1» // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конференции (г. Минск, РУП НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 19–20 октября 2011 г.). Минск, 2011. Т. 1. С. 196–207.
15. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Рассмотрение возможности использования новой двухэтапной технологии высокотемпературной конвективной сушки и озонородушной обработки зерна на базе применяемых в производстве сушильных установок // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ-2011: труды 4-й Междунар. науч.-практ. конференции (г. Москва, ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 20–23 сентября 2011 г.). М., 2011. Т. 2. С. 54–66.
16. Ванурин В.Н., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Выбор привода отгрузочного шнека установки СВЧ-обеззараживания «СИГМА-1» // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 4. С. 18–23.
17. Проведение экспериментальных исследований по проверке эффективности перспективных энергосберегающих электротехнологий обработки растительных сельскохозяйственных материалов (биообъектов), уточнение параметрических зависимостей процесса сушки и разработка математической модели процесса сушки сельскохозяйственных культур: отчет о НИР (промежуточ.): 09.02.02.01 / ВНИПТИМЭСХ; рук. А.И. Пахомов. Зерноград, 2009. 59 с. № ГР 15070.7721019635.06.8.002.0. Инв. № 73-09.1.
18. Газалов В.С., Пономарева Н.Е., Беленов В.Н. Использование статистических методов при решении прикладных задач в сельскохозяйственном производстве: монография. Зерноград: ПМГ СКНИИМЭСХ, 2011. 74 с.
19. Грачева Н.Н., Руденко Н.Б., Кононенко А.Ф., Литвинов В.Н. Применение ЭВМ в агрономии. Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО ДонГАУ, 2017. Ч. 2. Обработка и анализ экспериментальных данных. 152 с.

20. Гусаров В.М., Проява С.М. Общая теория статистики. М.: ЮНИТИ, 2008. 206 с.
21. Гусаров В.М., Кузнецова Е.И. Статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 479 с.
22. Горелова Е.И. Основы хранения зерна. М.: Агропромиздат, 1986. 136 с.
23. Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. М.: Колос, 1982. 239 с.
24. Птицын С.Д. Зерносушилки. Технологические основы, тепловой расчет и конструкции. М.: Машиностроение, 1966. 212 с.

## References

1. Petrichenko V.V. The August forecast for the 2017 grain harvest is 132 million tonnes (super-record). Hlebo-produkty. 2017. No 9, pp. 4–5 (in Russ.).
2. Petrichenko V.V. June grain harvest forecast for 2016 is a record of 110.1 million tons. Hlebo-produkty. 2016. No 7, pp. 6–8 (in Russ.).
3. Petrichenko V.V. July forecast of grain harvest in Russia in 2015. Hlebo-produkty. 2015. No 9, pp. 4–7 (in Russ.).
4. Petrichenko V.V. The grain harvest in Russia in 2014 is more than 100 million tons. Hlebo-produkty. 2014. No 9, pp. 4–6 (in Russ.).
5. Elizarov V.P., Antyshev N.M., Bejlis V.M. Iskhodnye trebovaniya na bazovye mashinnye tekhnologicheskie operacii v rastenievodstve [Baseline requirements for basic machine process operations in crop production]. Mos-cow: FGNU «Rosinformagrotekh» Publ., 2005, pp. 140–143.
6. Sposob sushki zernovykh materialov [The method of drying grain materials]: patent No 2422741 RF, МПК F26 V3/14. V.I. Pahomov, V.A. Maksimenko, K.N. Buhancov; заявитель i патентообладатель: VNIPTIMEHCKH. No 2010106531/06, заявл.: 24.02.2010, опubl.: 27.06.2011, Byul. No 18. 13 p.
7. Pahomov V.I., Buhancov K.N., Maksimenko V.A. Two-stage combined method of high-temperature grain drying. CH. 1. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2011. No 12, pp. 56–60 (in Russ.).
8. Pahomov V.I., Buhancov K.N., Maksimenko V.A. Two-stage combined method of high-temperature grain drying. CH. 2. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2012. No 1, pp. 53–58 (in Russ.).
9. Pahomov V.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Energy-saving technology of high-temperature convective drying and ozone-air grain processing. CH. 1. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2013. No 5, pp. 19–25 (in Russ.).
10. Pahomov V.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Energy-saving technology of high-temperature convective drying and ozone-air grain processing. CH. 2. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2013. No 6, pp. 23–27 (in Russ.).
11. Buhancov K.N. Methods of conducting experimental studies of convective ozone-air drying of grain materials. Mekhanizaciya tekhnologicheskikh processov v zhivotnovodstve: tekhnologii, mashiny, oborudovanie: Sb. nauch. tr. 4-j Mezhdunar. nauch.-tekh. konferencii: «Resursosberegayushchie tekhnologii i innovacionnye proekty v APK» [Mechanization of technological processes in animal husbandry: technology, machinery, equipment: Collection of scientific articles of 4th International scientific and technical conference: «Resource-saving technologies and innovative projects in agriculture»] (g. Zernograd Rostovskoj obl., VNIPTIMEHCKH, 14–15 aprelya 2009 g.). Zernograd, 2009, pp. 265–276 (in Russ.).
12. Provedenie ehksperimental'nyh issledovaniy fragmentov ehnergoehkonomnyh ehlektrotekhnologij i processov obrabotki rastitel'nyh sel'skohozyajstvennykh materialov s ispol'zovaniem ehlektrofizicheskikh metodov i razrabotka optimizacionnoj matematicheskoy modeli [Conducting experimental studies of fragments of energy-saving electrical technologies and the processing of plant-based agricultural materials using electrophysical methods and the development of an optimization mathematical model]: otchet o NIR (promezhutoch.): 09.02.02.01/ VNIP-TIMEHCKH; ruk. Kaun V.D. Zernograd, 2008. 46 p. № GR 15070.7721019635.06.8.002.0.
13. Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Multifunctional low-capacity plant for the implementation of electrical technologies of post-harvest and presowing treatment of grain and seeds. O problemah obespecheniya v sovremennykh usloviyah kolichestvennoj i kachestvennoj sohrannosti material'nyh cennostej, postavlyaemykh i zakladyvaemykh v gosudarstvennyj rezerv: sbornik dokladov Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Moskva, FGBU NII problem hraneniya Rosrezerva, 5–6 sentyabrya 2011 g.) [The problems of ensuring in modern conditions the quantitative and qualitative safety of material values supplied and pledged to the state reserve: a collection of reports of the Intern. scientific and practical conference (Moscow, Federal Research Institute of Storage Problems of the Federal Reserve, September 5-6, 2011)]. Moscow: OOO "Galleya-Print" Publ., 2011. CH. 2, pp. 158–168 (in Russ.).
14. Pahomov V.I., Buhancov K.N. Implementation of combined drying technologies, disinfection and stimulation of the sowing properties of grain and seeds based on "ELEKTA-1" device. Nauchno-tekhnicheskij progress v sel'sko-hozyajstvennom

- производстве: материалы Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Minsk, RUP NPC NAN Belarusi po mekhanizacii sel'skogo hozyajstva, 19–20 okt'yabrya 2011 g.) [Scientific and technical progress in agricultural production: materials of the Intern. scientific and practical conference (Minsk, Scientific and Practical Center for Agricultural Mechanization of the National Academy of Sciences of Belarus, October 19-20, 2011)]. Minsk, 2011. Vol. 1, pp. 196–207 (in Russ.).
15. Pahomov V.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Consideration of the possibility of using a new two-stage technology of high-temperature convective drying and ozone-air processing of grain based on drying equipment used in the production. *Sovremennye ehnergoberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov) – SEHTT-2011: Trudy 4-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Moskva, FGBOU VPO MGAU im. V.P. Goryachkina, 20–23 sent'yabrya 2011 g.)* [Modern energy-saving thermal technologies (drying and heat and moisture treatment of materials) – SETT-2011. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference (Moscow, Moscow State Agro-Engineering University, September 20-23, 2011)]. Moscow, 2011. Vol. 2, pp. 54–66 (in Russ.).
16. Vanurin V.N., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Selection of the drive of the discharge screw of the «SIGMA-1» microwave disinfection unit. *Vestnik APK Stavropol'ya*. 2015. No 4, pp. 18–23 (in Russ.).
17. Provedenie ehksperimental'nyh issledovaniy po proverke ehffektivnosti perspektivnyh ehnergoberegayushchih ehlektrotekhnologij obrabotki rastitel'nyh sel'skohozyajstvennyh materialov (bioob'ektov), utocnenie parametricheskikh zavisimostej processa sushki i razrabotka matematicheskoy modeli processa sushki sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Conducting experimental studies to verify the effectiveness of promising energy-saving electrical technologies for processing plant-based agricultural materials (bioobjects), clarifying the parametric dependencies of the drying process and developing a mathematical model of the process of drying agricultural crops]: otchet o NIR (promezhutoch.): 09.02.02.01/ VNIPTIMEHSKH; ruk. Pahomov A.I. Zernograd, 2009. 59 p. № GR 15070.7721019635.06.8.002.0. Inv. No 73-09.1.
18. Gazalov V.S., Ponomaryova N.E., Belenov V.N. Ispol'zovanie statisticheskikh metodov pri reshenii prikladnyh zadach v sel'skohozyajstvennom proizvodstve [The use of statistical methods in solving applied problems in agricultural production]. *Monografiya*. Zernograd: PMG SKNIIMEHSKH Publ., 2011. 74 p.
19. Gracheva N.N., Rudenko N.B., Kononenko A.F., Litvinov V.N. *Primenenie EHVM v agronomii* [The use of computers in agronomy]. Zernograd: ACHII FGBOU VO DonGAU, 2017. CH. 2. *Obrabotka i analiz ehksperimental'nyh dannyh*. 152 p.
20. Gusarov V.M., Proyava S.M. *Obshchaya teoriya statistiki* [General theory of statistics]. Moscow: YUNITI Publ., 2008. 206 p.
21. Gusarov V.M., Kuznecova E.I. *Statistika* [Statistics]. Moscow: YUNITI-DANA Publ., 2007. 479 p.
22. Gorelova E.I. *Osnovy hraneniya zerna* [Basics of grain storage]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 136 p.
23. ZHidko V.I., Rezhikov V.A., Ukolov V.S. *Zernosushenie i zernosushilki* [Grain drying and grain dryers]. Moscow: Kolos Publ., 1982. 239 p.
24. Pticyn S.D. *Zernosushilki*. *Tekhnologicheskie osnovy, teplovoj raschet i konstrukcii* [Technological basis, thermal calculation and design]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. 212 p.