



ISSN 2078-7138 (Print)
ISSN 2078-7146 (Online)
DOI: 10.56619/2078-7138-2023-159-5

АГРОПАНОРАМА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ РАБОТНИКОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

№ 5
октябрь
2023

В номере:

*Уравнение равновесного потока жидкости
в системе сосок – доильный стакан*

*Выбор конструктивно-технологической схемы
термографирования вымени коров*

*Математическое моделирование работы проточных
многозонных электродных электронагревателей-
датчиков при наличии отложений на электродах*

*Экспресс-метод количественной оценки содержания
топлива в моторном масле*



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
**БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**
**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**
Агротехнический факультет

Уважаемые коллеги!

**Приглашаем Вас принять участие в работе
Международной научно-практической конференции**

***«ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В
СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ»***,

**которая состоится в Белорусском
государственном аграрном техническом
университете**

23 - 24 ноября 2023 г.

Основные направления работы конференции:

- *Сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, испытание*
- *Мобильная энергетика в сельском хозяйстве*
- *Инновационные технологии производства продукции растениеводства*
- *Инновационные технологии в животноводстве*
- *Инновационные технологии подготовки специалистов для АПК*

г. Минск, пр-т Независимости, 99, корпус 1

Контактные телефоны:

(+ 375 17) 366-11-35; (+375 29) 266-53-95

www.bsatu.by

АГРОПАНОРАМА 5 (159) октябрь 2023

Издается с апреля 1997 г.

Научно-технический журнал
для работников
агропромышленного комплекса.
Зарегистрирован в Министерстве
информации Республики Беларусь
21 апреля 2010 года.
Регистрационный номер 1324

Учредитель

Белорусский государственный
аграрный технический университет

Главный редактор

Николай Николаевич Романюк

Заместитель главного редактора
Михаил Александрович Прищепов

Редакционная коллегия:

Л.С. Герасимович	И.С. Крук
П.П. Казакевич	А.С. Сайганов
В.М. Капцевич	В.Н. Тимошенко
А.Н. Каргашевич	Н.К. Толочко
Н.В. Киреенко	В.П. Чеботарёв
И.П. Козловская	Н.С. Яковчик

Е.В. Сенчуров – ответственный секретарь
Н.И. Цындрина – редактор

Компьютерная верстка
В.Г. Леван

Адрес редакции:

БГАТУ, пр-т Независимости, 99/1, к. 220
220012, г. Минск, Республика Беларусь,
Тел. (+375 17) 272-47-71
Тел./факс (+375 17) 258-41-16

Прием статей и работа с авторами:

г. Минск, пр-т Независимости, 99/5, к. 602, 608
Тел. (+375 17) 385-91-02, 355-22-14
E-mail: AgroP@bsatu.by

БГАТУ, 2023.

Формат издания 60 x 84 1/8.

Подписано в печать с готового оригинала-
макета 27.10.2023 г. Зак. № 611 от 26.10.2023 г.

Дата выхода в свет 31.10.2023 г.

Печать офсетная. Тираж 100 экз.

Статьи рецензируются.

Отпечатано в ИПЦ БГАТУ по адресу: г. Минск,
пр-т Независимости, 99/2

ЛП № 023330/316 от 30.10.2020 г.

Выходит один раз в два месяца.

Подписной индекс в каталоге «Белпочта» - 74884.

Стоимость подписки на журнал на 2-е п/г 2023 г.:

для индивидуальных подписчиков - 40,08 руб.;

ведомственная - 42,21 руб.;

Цена журнала в киоске БГАТУ - 11,70 руб.

При перепечатке или использовании
публикаций согласование с редакцией
и ссылка на журнал обязательны.
Ответственность за достоверность
рекламных материалов несет рекламодатель.

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственное машиностроение. Металлообработка

Д.А. Григорьев, А.М. Кравцов
Уравнение равновесного потока жидкости в системе сосок –
доильный стакан.....2

Ю.А. Ракевич, И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков
Выбор конструктивно-технологической схемы
термографирования вымени коров.....7

Технологии производства продукции расте- ниеводства и животноводства. Зоотехния

А.Н. Леонов, Т.А. Непарко, Е.Ю. Жушма,
Ли Цинчжэнь, Э.В. Дыба
Стохастическое моделирование технологических процессов
растениеводства с использованием ортогональных многочленов....14

Энергетика. Транспорт

М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский
Математическое моделирование работы проточных многозонных
электродных электронагревателей-датчиков при наличии
отложений на электродах.....23

В.М. Збродыга, М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич,
И.В. Протосовицкий, Н.Е. Шевчик
Особенности работы трансформатора со схемой соединения
обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» при нелинейном
характере нагрузки.....32

Технический сервис в АПК. Экономика

В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, И.В. Закревский,
И.А. Литвинов
Экспресс-метод количественной оценки содержания топлива
в моторном масле.....38

А.Л. Косова
Оценка эффективности механизма управления сбалансированным
развитием АПК Республики Беларусь на основе достижения
целевых критериев устойчивости производства.....44

УРАВНЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ В СИСТЕМЕ СОСОК – ДОИЛЬНЫЙ СТАКАН

Д.А. Григорьев,

докторант каф. технологий и механизации животноводства БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.М. Кравцов,

зав. каф. энергетики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье представлен анализ современных тенденций рынка доильного оборудования. Приводится описание процесса молоковыведения под действием вакуумметрического и внутривыменного давления в системе сосок – доильный стакан. С использованием теории одномерных течений получено уравнение потока молока на выходе из соскового сфинктера, рассматриваемого как гидравлическая насадка с изменяющимся сечением.

Ключевые слова: доильное оборудование, уравнение Бернулли, поток молока, сосковый сфинктер, гидравлическая насадка, доильный стакан, вакуумметрическое давление.

The article analyses the current trends in the market of milking equipment. The description of the process of milking under the action of vacuum and udder pressure in the system teat - milking cup is given. Using the theory of one-dimensional flows, the equation of milk flow at the outlet of the teat sphincter, considered as a hydraulic nozzle with a variable cross-section, is obtained.

Key words: milking equipment, Bernoulli equation, milk flow, teat sphincter, hydraulic nozzle, teat cup, vacuum pressure.

Введение

Инновационное развитие молочного скотоводства в Республике Беларусь предполагает использование современного технического обеспечения технологии производства молока, как основного инструмента реализации стратегии, направленной на повышение конкурентоспособности отрасли. Внедрение нового автоматизированного оборудования обеспечивает существенный рост производительности труда [1].

Доение на современном молочно-товарном комплексе становится своеобразным гравитационным центром всей технологии производства молока. Поэтому доильное оборудование, производство которого возрастает во всем мире, является ключевым элементом технического обеспечения. По данным исследовательской компании Research and Markets, показатель совокупного среднегодового темпа роста CAGR (Compound Annual Growth Rate) составляет более 13 % для рынка доильных машин, который вырастет к 2025 г. с 4,22 до 6,87 млрд долл. США по сравнению с 2021 г. [2]. Ведущими производителями доильного оборудования в мире являются такие страны, как Израиль, Швеция и Новая Зеландия [3]. Торговля доильными машинами составляет 0,0032 % от общей мировой торговли. В 2020 г. доильное оборудование занимало 2597-е место в мире по объему торговли, с общим объемом 528 млн долл. США (рис. 1).

В период с 2019 по 2020 гг. экспорт доильного оборудования сократился на 11,8 % (с 599 до 528 млн долл. США). Очевидно, что страны – производители молока стремятся обеспечить фермеров отечественным оборудованием, необходимый научно-технический уровень которого должен соответствовать инновационным инженерно-технологическим разработкам, реализуемым с учетом генетического потенциала и сложившегося фенотипа животных [4]. Совершенствование технологии должно быть ориентировано на адаптивность процессов и оборудования к физиологии и этологии животных [5]. В этой связи актуализируются задачи по детальному изучению, теоретическому обоснованию и моделированию молокоотдачи [6], как наиболее сложно детерминированного результирующего процесса взаимодействия элементов системы «вымя – доильный аппарат».

Циклическую работу доильного стакана традиционно разбивают на два такта – сосания и сжатия, которые в зарубежной литературе часто обозначают как фазы всасывания и отдыха. В данной терминологии нет противоречия, поскольку в процессе сжатия соскового чужка сфинктер «отдыхает» от воздействия вакуумметрического давления. В истории конструирования доильных аппаратов [7] имеются примеры альтернативной организации процесса (отдельного такта отдыха и др.), которые не увенчались успехом. В результате подавляющее большинство производителей доильного оборудования используют обосно-

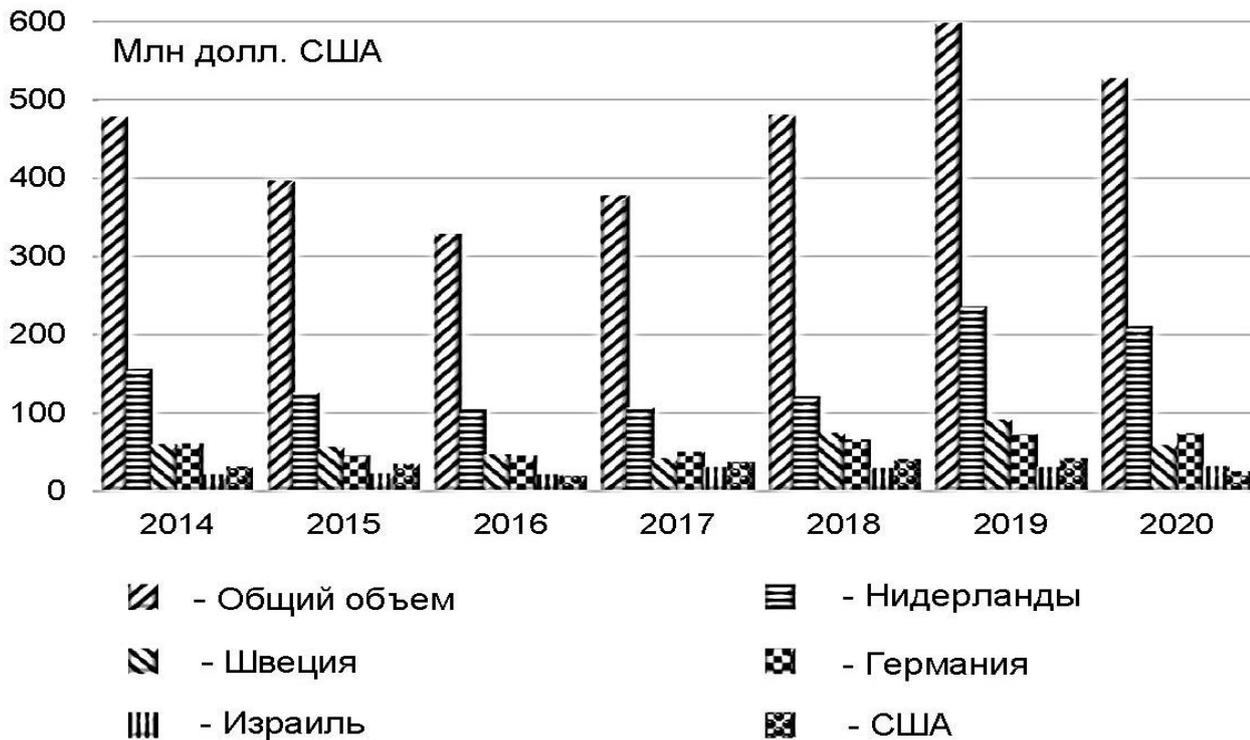


Рисунок 1. Экспорт доильного оборудования (2014-2020 гг.)

ванный еще в начале 20-го века [8] двухтактный режим работы доильного стакана.

Главным результирующим процессом взаимодействия элементов системы «вымя – доильный аппарат» является молокоотдача на выходе из сфинктера соска, изучением которой занимаются исследователи ведущих компаний – производителей доильного оборудования.

В Республике Беларусь данное научное направление разрабатывалось такими ведущими учеными в области физиологии и техники доения, как М. В. Барановский, В.И. Передня, В.О. Китиков. Наиболее детально из числа изученных источников информации процесс выделения молока был проработан учеными Висконсинского университета в Мэдисоне (США) [9].

Целью данной работы является теоретическое описание процесса выхода потока молока из сфинктера соска, обеспечивающее возможность дальнейшего развития общей теории молокоотдачи в процессе доения.

Основная часть

На рисунке 2 представлена гидравлическая схема взаимодействия соска коровы и доильного стакана.

Для вывода расчетных соотношений воспользуемся методами теории одномерных течений и запишем уравнение Бернулли для сечения $a-a$, проходящего через сжатое сечение струи на выходе из отверстия, ограниченного изменяющейся площадью венного кольца, соединяющего цистерну вымени и цистерну соска, в котором действует давление (P_a), и сечения $c-c$, представляющего сжатое сечение струи на

выходе из отверстия сфинктера, в котором действует давление (P_c) (рис. 2).

При выборе плоскостей сравнения на выходах из венного кольца и сфинктера уравнение Бернулли можно записать в следующем виде:

$$H + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{a_a v_a^2}{2g} = \frac{P_c}{\rho g} + \frac{a_c v_c^2}{2g} + \xi_c \frac{a_c v_c^2}{2g}, \quad (1)$$

где H – высота соска, м;

P_a – давление, действующее в сечении $a-a$, Па;

a_a, a_c – коэффициент Кориолиса соответственно в сечении $a-a, c-c$;

v_a – скорость молока в сечении $a-a$, м/с;

P_c – давление, действующее в сечении $c-c$, Па;

v_c – скорость молока в сечении $c-c$, м/с;

ρ – плотность молока, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ξ_c – коэффициент местного сопротивления в сфинктере соска.

Поскольку размеры отверстия сфинктера малы, по сравнению с размерами цистерны вымени и цистерны соска, то из условия сохранения расхода жидкости следует, что скорость опускания свободной поверхности и скорость молока в сжатом сечении струи на выходе из венного кольца v_a в определенный малый момент в начале выхода молока из сфинктера мала, по сравнению со скоростью истечения струи v_c . Поэтому ее величиной можно пренебречь и решить уравнение относительно скорости в сжатом сечении. Тогда скорость струи в

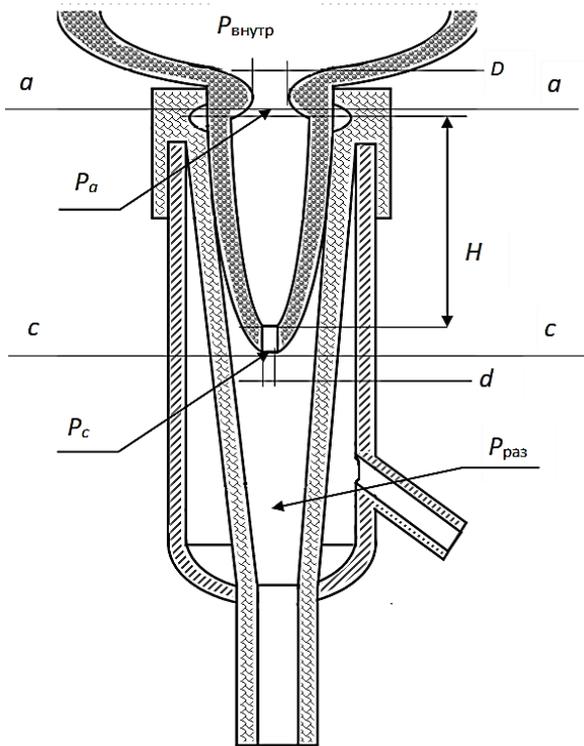


Рисунок 2. Взаимодействие доильного стакана и соска: $P_{внутр}$ – внутривыменное давление; $P_{раз}$ – давление разряжения в подсосковой камере доильного стакана (вакуумметрическое давление)

начальный момент такта сосания, когда сфинктер полностью открылся, составит

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{a_c + \xi_c}} \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)}. \quad (2)$$

Учеными Висконсинского университета в Мэдисоне были получены эмпирические зависимости [9], которые могут быть представлены в виде усредненного графика (рис. 3).

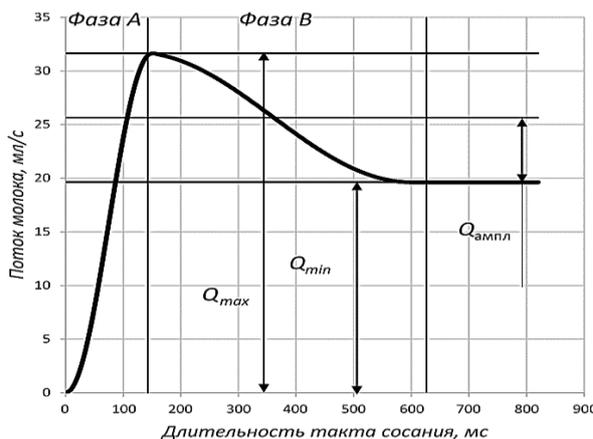


Рисунок 3. Зависимость потока молока от времени такта сосания

Длительность полного цикла пульсации составляет, как правило, 1000 ± 200 мс при соотношении тактов 60...64/36...40 %. Каждый такт, в свою очередь, делится на основную и переходную фазу. В такте сосания эти фазы традиционно обозначаются как А и В, в такте сжатия – С и D.

На графике можно выделить три зоны изменения потока молока:

- резко возрастает и достигает максимального значения (Q_{max});
- изменяется от максимального (Q_{max}) до минимального значения (Q_{min});
- остается на определенном минимальном уровне даже при значительном увеличении длительности такта сосания.

Амплитудное значение $Q_{ампл}$ равно половине разницы: $Q_{max} - Q_{min}$.

Исследования показали, что процесс раскрытия сфинктера при переходе от такта сжатия к такту сосания происходит очень быстро, еще в переходную фазу А. В результате максимальный поток молока достигается в самом начале фазы В такта сосания (рис. 3). Далее происходит плавное снижение потока молока. Такое явление связано, по всей вероятности, с тем, что расход молока через венное кольцо с условным диаметром D становится меньше, чем расход молока через полностью раскрытый сфинктер с условным гидравлическим диаметром d (рис. 2). В результате общее поступление молока по каналам и протокам, соединяющим альвеолярный отдел молочной железы с цистерной вымени, является лимитирующим фактором в процессе молокоотдачи. Скорость выхода молока из цистерны вымени меньше максимальной скорости истечения молока через полностью открытый сфинктер. Поэтому, по мере опорожнения цистерны соска, расход снижается до минимального уровня, соответствующего некоему равновесному состоянию, когда приток и выход молока, а также давление, действующее на поверхность молока в цистерне вымени, и давление, действующее на сфинктер снаружи, уравниваются. В результате скорость выхода молока из цистерны вымени меньше максимальной скорости истечения молока через полностью открытый сфинктер. Если значение коэффициента Кориолиса (a_c) для турбулентного потока принять условно равным единице и выразить коэффициент скорости φ_c , который показывает отличие скорости истечения вязкой жидкости от аналогичной величины, в случае идеальной жидкости [10] как

$$\varphi_c = \frac{1}{\sqrt{a_c + \xi_c}}, \quad (3)$$

то получим

$$v_c = \varphi_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)}. \quad (4)$$

Производная данной функции определяет ускорения потока молока

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{d \left(\varphi_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)} \right)}{dt}. \quad (5)$$

Учитывая эффект инверсии и сжатия струи на выходе из сфинктера, в общем случае можем записать

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{d \left(\varepsilon_c \varphi_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)} \right)}{dt}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_c = \frac{S_{c-}}{S_c}$ – коэффициент сжатия струи,

показывающий уменьшение ее поперечного сечения на выходе из отверстия (S_{c-}) по отношению к площади самого отверстия (S_c).

Для более точного расчета необходимо учесть потери напора в венном кольце и сфинктере соска, тогда

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{d \left(\varepsilon_c \varphi_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} - \Delta h_a - \Delta h_c \right)} \right)}{dt}, \quad (7)$$

где Δh_a – потери напора в венном кольце, м;

Δh_c – потери напора в сфинктере, м.

Однако точное теоретическое и экспериментальное определение сопротивления и потерь напора в сфинктере и венном кольце не представляется возможным, как по уравнению (1), так и по уравнению (7). Поэтому предлагается использовать известные методики расчета по укрупненным коэффициентам. Очевидно, что ускорение в первой части такта увеличивается от нуля до некоторого максимального значения потока Q_{\max} (рис. 3), а после достижения максимума снижается до определенного минимального значения Q_{\min} , соответствующего моменту, при котором чулок смыкается, а система переходит из такта сосания в такт сжатия. Очевидно, что в некоторой точке, соответствующей максимальному потоку молока из сфинктера, знак производной функции изменяется, а ускорение становится равным нулю.

Строение сфинктера таково, что он раскрывается, переходя от сжатого крестообразного сечения к квадратному, а потом к круглому, за короткий период времени (рис. 4).

Для приближенных расчетов, когда потери напора при входе в сфинктер учтены в поправочных коэффициентах, можем принять условие, что сфинктер представляет собой насадки круглого, квадратного и крестообразного сечения, гидравлика которых подробно описана в нескольких научных трудах [11], в которых определены коэффициенты

расхода для различных скоростей потока. Обычно вводят коэффициент расхода $\mu = \varphi_c \varepsilon$, который учитывает потери напора в насадке и установлен экспериментально для конкретных скоростей.

Дифференциал функции (4) представляет собой мгновенное значение количества молока, выходящего из сфинктера при $\Delta t \rightarrow 0$. Тогда, с учетом уравнения (7) и коэффициента расхода $\mu = \varphi_c \varepsilon$, произведение дифференциалов

$$\begin{aligned} dQ_{c\phi} dt &= d(S_c v_c) dt = \\ &= d \left(\mu_c S_c \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)} \right) dt, \quad (8) \end{aligned}$$

где $Q_{c\phi}$ – поток молока из сфинктера, мл/с.

Следовательно, максимальный объемный расход жидкости через полностью раскрытое отверстие сфинктера при максимальной для данных условий разнице значений давлений в сечениях венного кольца и сфинктера определится как

$$\begin{aligned} Q_{c\phi \max} &= S_{c \max} v_{c \max} = \mu_{c \max} \times \\ &\times S_{c \max} \sqrt{2g \left(H + \frac{P_a - P_c}{\rho g} \right)}. \quad (9) \end{aligned}$$

Уравнение (8) содержит одну независимую и несколько зависимых переменных, поэтому для его решения необходим более детальный анализ гидравлических процессов. Внутреннюю полость соска можно условно представить в виде насадки, присоединенной к отверстию венного кольца, которая представляет собой небольшой отрезок трубы, сужающейся к сфинктеру и имеющей соотношение $H \leq 10d$. При входе в него струя жидкости испытывает сжатие точно так же, как и при истечении из отверстия, но поскольку струя ограничена боковой стенкой соска, то внутри него образуется кольцевая вихревая область в сечении, следующим за сечением венного кольца. Ввиду того, что скорость в сжатом сечении больше, чем в венном кольце (это следует из условия неразрывности или постоянства расхода), давление в сжатом сечении уменьшается в соответствии с уравнением Бернулли, примененным

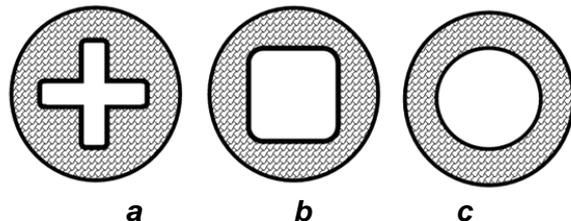


Рисунок 4. Модель отверстия сфинктера соска: а – крестообразное сечение (сфинктер начинает раскрываться); б – квадратное сечение; в – круглое сечение (сфинктер полностью раскрыт)

для этих двух сечений. Таким образом, в сжатом сечении соска возникает вакуум и, следовательно, течение жидкости на участке от условно свободной поверхности молока в цистерне вымени до сжатого сечения в соске происходит под увеличенным напором, который складывается с внутривыменным давлением, имеющим наибольшее значение в начале доения, когда концентрация окситоцина максимальная. Поэтому в совокупности скорость в сжатом сечении соска в начале такта сосания будет максимальной. Это значит, что расход через сосок будет больше. Следует отметить, что в соске появляются дополнительные потери, обусловленные расширением потока после сжатого сечения, и потери на трение о внутренние стенки. Как показывают расчетные и экспериментальные данные [10], при длине насадки, в качестве которой рассматривается сосок, то есть $H \leq 4d$, эти потери меньше, чем выигрыш в действующем напоре. Поэтому сосок теоретически увеличивает расход жидкости. Расчет по полученным уравнениям позволит построить теоретические кривые, которые могут служить инструментом оценки полученных эмпирических данных.

Заключение

1. Решение задач по развитию производства и совершенствованию доильного оборудования должно быть ориентировано на адаптивность процесса доения к условиям производства, этологии и физиологии животных.

2. Гидравлическая модель базируется на принципах физиологии процесса молокоотдачи коровы, которые сформулированы на основе практических результатов, полученных исследователями ведущих научных учреждений и производителей доильного оборудования.

3. Представленные в статье математические зависимости позволят определить параметры процесса выхода молока из сфинктера соска, с использованием фундаментальных законов и результатов исследований в области гидравлики истечения жидкостей.

4. Полученные уравнения могут быть использованы для расчета расходов молока через сфинктер, на основе скорости молокоотдачи коровы, которая является наиболее часто измеряемым параметром, используемым для оценки, как генетического потенциала, так и факторов технологии производства молока, включая физиологичность машинного доения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гусаков, В.Г. Приоритетные направления повышения эффективности, конкурентоспособности и устойчивости развития аграрной отрасли

Республики Беларусь / В.Г. Гусаков, А.П. Шпак // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2018. – Т. 56. – № 4. – С. 401-409.

2. Global Milking Machines Market Report (2021 to 2030) [Electronic resource] / GlobeNewswire, Inc. – Mode of access: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/12/07/2347222/28124/en/Global-Milking-Machines-Market-Report-2021-to-2030-Featuring-Fullwood-BouMatic-Robotics-and-AMS-Galaxy-USA-Among-Others.html>. – Date of access: 14.12.2022.

3. Top 10 Importers Countries of Milking machines by percentage of total imports CEPII [Electronic resource] / The leading French center for research and expertise on the world economy. – Mode of access: <https://oec.world/en/profile/hs/milking-machines>. – Date of access: 11.09.2022.

4. Григорьев, Д.А. Технология машинного доения коров на основе конвергентных принципов управления автоматизированными процессами: монография / Д.А. Григорьев, К.В. Король. – Гродно: ГГАУ, 2017. – 216 с.

5. Ульянов, В.М. Совершенствование технологии машинного доения путем разработки стимулирующе-адаптированных доильных аппаратов и манипуляторов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В.М. Ульянов. – Рязань, 2008. – 42 с.

6. Григорьев, Д.А. Дифференцированное динамическое доение как фактор ветеринарного благополучия и продуктивности коров / Д.А. Григорьев, К.В. Король, В.С. Журко // Эколого-биологическое благополучие растительного и животного мира: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Благовещенск, 23 сентября 2020 г. / Дальневосточный гос. аграрный ун-т. – Благовещенск, 2020. – С. 84-85.

7. Reinemann, J. Milking machine research past present and future / Douglas J. Reinemann, Graeme A. Mein, Misty Davis-Johnson. – Fort Worth Texas, USA: WI Paper Presented at the 42nd annual meeting of the National Mastitis Council, January 26-29, 2003. – 7 p.

8. Erf, O. Milking machines / O. Erf. – Manhattan, Kan.: Kansas State Agricultural College, Agricultural Experiment Station, 1906. – 68 p.

9. Mein, Graeme A. Machine Milking / Graeme A. Mein, Douglas J. Reinemann. – CreateSpace Independent Publishing, 2015. – Vol. 1. – 174 p.

10. Качанов, И.В. Механика жидкости и газа: курс лекций в 4 ч. / И.В. Качанов, В.В. Кулебякин, В.К. Недбальский. – Минск: БНТУ, 2014. – Ч. 4. – 58 с.

11. Пильгунов, В.Н. Особенности истечения жидкости через отверстия некруглой формы / В.Н. Пильгунов, К.Д. Ефремова // Наука и образование: электр. журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 2. – С. 1-23.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 30.06.2023

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ТЕРМОГРАФИРОВАНИЯ ВЫМЕНИ КОРОВ

Ю.А. Ракевич,

научн. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

И.И. Гируцкий,

профессор каф. автоматизированных систем управления производством БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

А.Г. Сеньков,

начальник отдела математического моделирования

ГП «Центр радиотехники НАН Беларуси», канд. техн. наук, доцент

В статье представлена методика размещения тепловизоров в доильных залах для получения качественных инфракрасных изображений вымени коров и определены основные факторы, влияющие на их размещение. Представлена схема расположения тепловизоров на входе в доильный зал. Предложена 3D модель расположения тепловизора относительно биологического объекта – вымени дойной коровы. Проведены экспериментальные исследования в условиях действующего предприятия по предложенной методике. Определены наиболее рациональные параметры тепловизора, которые необходимы для получения качественных изображений вымени коров.

Ключевые слова: мастит, тепловизор, вымя, корова, доильный зал, инфракрасные изображения.

The article presents a technique for placing thermal imagers in milking parlors to obtain the highest quality infrared images of cow udders. The main factors influencing the placement of thermal imagers in the milking parlors were determined. The layout of the thermal imager at the entrance to the milking parlor is presented. A 3D model of the location of the thermal imager relative to the biological object - the udder of a milking cow is proposed. An experimental study was carried out at an operating enterprise, according to the proposed technique. Based on the presented technique and the conducted studies, the most rational parameters of the thermal imager necessary to obtain infrared images of cow udders of the highest quality were determined.

Key words: mastitis, thermal imager, udder, cow, milking parlour, infrared images.

Введение

Молочное животноводство – отрасль, которая одна из первых среди других животноводческих секторов стала использовать интеллектуализированные системы управления производством, включающие системы радиочастотной идентификации животных, компьютерные системы управления процессами доения, кормления, обеспечения микроклимата, навозоудаления, доильных роботов и другие технические решения.

Первые отечественные разработки подобных систем с АСУТП – автоматизированные весы для взвешивания животных, посты управления доением в доильных залах, системы распознавания животных, нормированной выдачи им концентратов и передачи данных по индивидуальным надоям, заболеванию маститом и другим зооветеринарным признакам в центральный компьютер относятся еще к середине 80-х гг. прошлого столетия [1, 2].

Исследованиям в области диагностики состояния животных и развития технических средств и технологий в молочном скотоводстве посвящены работы ученых – Кирсанова В.В., Китикова В.О., Казакевича П.П., Передни В.И. и других.

В рамках совместной российско-белорусской программы учеными ФНАЦ ВИМ разработана концепция создания «интеллектуальной фермы», предусматривающая разработку инновационных цифровых технологий и технических средств для молочного животноводства [3, 4].

В настоящее время одной из самых распространенных незаразных болезней животных, встречающихся на молочных предприятиях, является мастит. Данное заболевание имеет два основных вида: субклинический (скрытый) и клинический (с открытыми визуальными симптомами болезни). Наиболее опасным из них является субклинический, когда внешне вымя животного и выделяемое из него молоко выглядят абсолютно нормальными. Скрытый мастит встречается в 5-10 раз чаще, чем клинический. Если субклинический мастит не обнаружить своевременно, то через некоторое время он переходит в клиническую стадию, что приводит к необходимости снятия животного с производства для лечения с использованием антибиотиков, после которых молоко животного становится непригодным для дальнейшей переработки [5].

Идентификация состояния доильного оборудования и раннее выявление заболевания дойных коров в условиях беспривязного содержания животных на молочно-товарных фермах требуют разработки бесстрессовых методов, работающих в режиме реального времени [6, 7].

Перспективным направлением решения этой актуальной задачи является развитие оптико-электронных методов и средств, в силу своей многофункциональности и бесконтактности, что является важным качеством для контроля состояния биологического объекта, каким является дойная корова. Получение и анализ инфракрасных изображений снимков вымени и сосков позволяет осуществлять мониторинг теплового поля, а также изучать воздействие доильного оборудования на молочную железу в зависимости от степени заболевания коров маститом [8, 9].

Целью настоящей работы является обоснование конструктивно-технологических схем размещения тепловизоров в доильных залах для получения качественных инфракрасных изображений вымени коров.

Основная часть

Конструктивно-технологическая схема размещения тепловизоров для получения термографического снимка вымени коровы зависит от решаемой задачи: использование для оперативной диагностики степени заболевания маститом или для физиологической оценки воздействия доильного аппарата на молочную железу [10, 11].

Размещение тепловизоров в доильном зале для получения наиболее высокого качества инфракрасных изображений вымени коров будет зависеть от следующих факторов:

- типа конструкций доильного зала;
- технических параметров тепловизора;
- формы, размеров и положения вымени в зоне наблюдения;
- расстояния от тепловизионной камеры до вымени;
- скорости движения коровы.

Определим понятие *элемент разрешения* – минимальный элемент вымени, который может различать термографическая камера на определенном расстоянии. Размер этого элемента может быть определен как по вертикали, так и по горизонтали.

Размер элемента разрешения Δ может быть определен как линейный размер S зоны обзора (длина дуги) в соответствующей плоскости на определенном расстоянии L , деленный на количество пикселей M матрицы телевизора в этой же плоскости (рис. 1).

Учитывая, что S зависит от расстояния L до вымени коровы и углов обзора объектива камеры тепловизора в вертикальной $\alpha_{верт}$ и горизонтальной $\alpha_{гор}$ плоскостях, можно записать соответствующие выражения для размеров дуг в вертикальной $S_{верт}$ и горизонтальной $S_{гор}$ плоскостях [12]:

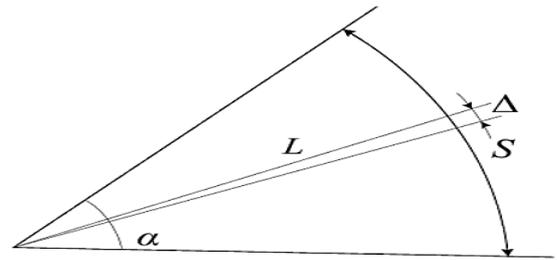


Рисунок 1. Расчетная схема к определению зоны обзора вымени и минимального элемента разрешения вымени тепловизионной камерой: α – угол обзора объектива тепловизионной камеры, град; L – расстояние от объектива тепловизионной камеры до вымени, м; S – зона обзора вымени, м; Δ – элемент разрешения вымени, м.

$$S_{верт} = 2\pi L \frac{\alpha_{верт}}{360}, \quad (1)$$

$$S_{гор} = 2\pi L \frac{\alpha_{гор}}{360}, \quad (2)$$

где L – расстояние от объектива тепловизионной камеры до вымени, м;

$\alpha_{верт}$ – угол обзора объектива тепловизионной камеры в вертикальной плоскости, град;

$\alpha_{гор}$ – угол обзора объектива тепловизионной камеры в горизонтальной плоскости, град;

и для соответствующих размеров Δ элементов разрешения [12]:

$$\Delta_{гор} = 2\pi L \frac{\alpha_{гор}}{360 \cdot M_{гор}}, \quad (3)$$

$$\Delta_{верт} = 2\pi L \frac{\alpha_{верт}}{360 \cdot M_{верт}}, \quad (4)$$

где $M_{гор}$ и $M_{верт}$ – количество пикселей матрицы тепловизора в горизонтальной и вертикальной плоскостях в зависимости от модели прибора.

Таким образом, размер элемента разрешения является функцией нескольких переменных:

- расстояния L от объектива тепловизионной камеры до вымени коровы;
- угла обзора α , определяемого объективом камеры тепловизора и форматом матрицы;
- количества M пикселей матрицы тепловизора.

Характер изменения размера элемента разрешения на разных расстояниях до объекта показан на рисунке 2.

Исходя из приведенных выражений, зависимость размеров элементов разрешения в вертикальной $\Delta_{верт}$ и горизонтальной $\Delta_{гор}$ плоскостях от тепловизора будет линейной, а число N дискретных фрагментов объекта контроля будет обратно пропорциональным расстоянию от камеры (рис. 3).

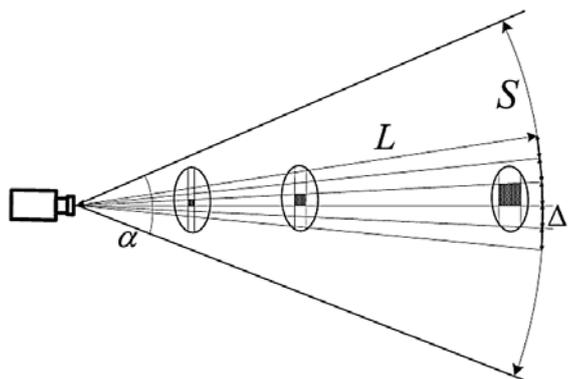


Рисунок 2. Схема изменения элемента разрешения тепловизионной камеры в зависимости от расстояния до объекта

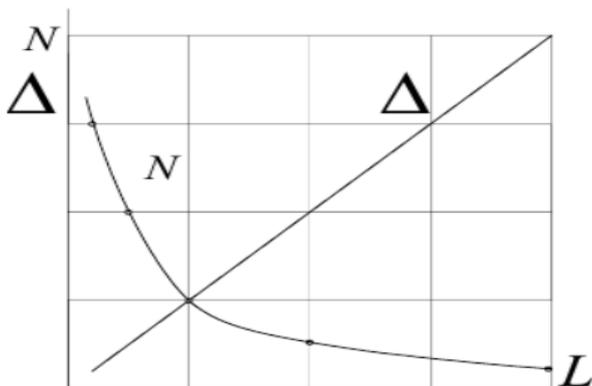


Рисунок 3. Зависимость количества и размера элементов разрешения от расстояния между камерой и объектом контроля

Для практических задач такой параметр, как разрешающая способность тепловизионной камеры, характеризующий потенциальные возможности качества формируемого инфракрасного изображения, безусловно является одним из важнейших.

Для формирования изображения одного кадра требуется определенное ограниченное время. Оно складывается из времени экспозиции кадра (времени работы электронного затвора) и времени считывания сигнала матрицы. В течение времени работы электронного затвора происходит накопление сигнала. Однако в течение этого же промежутка происходит смещение объекта в пространстве или изменение его видимых форм и размеров, т.е. изменение исходного изображения. Следовательно, будет изменяться и сигнал на элементах матрицы, на которые проецируется изображение движущегося объекта.

При движении животного со скоростью V в направлении, образующим угол Ψ с оптической осью тепловизора, в общем случае будут иметь место поперечная V_n и радиальная V_p составляющие скорости движения объекта. При этом максимальные значения поперечной и радиальной составляющих будут при перемещении животного строго в поперечном или радиальном направлениях. Эти значения будут соответствовать максимальному значению скорости дви-

жения животного, а также оказывать наибольшее влияние на качество изображения (рис. 4).



Рисунок 4. Схема к определению скорости движения животного:

V – скорость движения коровы, м/с; V_p – радиальная составляющая, м/с; V_n – поперечная составляющая, м/с; Ψ – угол между оптической осью объектива тепловизора и направлением движения коровы, рад.

Поэтому, если животное движется в произвольном направлении, разложение в соответствующих плоскостях можно не учитывать и использовать значение V_{max} для оценки степени влияния скорости движения. Если же в поле зрения тепловизора животное движется в одном направлении (к примеру, через проход с односторонним движением), то можно учитывать только поперечную составляющую скорости. В этой связи предлагается следующая схема расположения тепловизионных камер для выявления больных животных непосредственно при их входе в доильный зал (рис. 5).

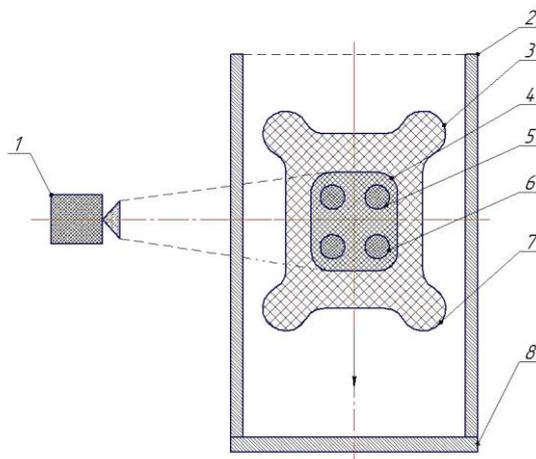


Рисунок 5. Схема расположения тепловизора на входе в доильный зал (вид сверху в разрезе на уровне вымени): 1 – тепловизионная камера; 2 – ограждение; 3 – задние ноги животного; 4 – вымя дойной коровы; 5 – задние соски четверти вымени; 6 – передние соски четверти вымени; 7 – передние ноги животного; 8 – селекционные ворота

Установка тепловизора на входе в доильный зал после электронной идентификации коровы позволяет осуществить диагностику степени заболевания маститом путем анализа температурных показателей термографического снимка вымени. Во время прохождения коровы через место распознавания номера ее на несколько секунд задерживают автоматически-

ми селекционными воротами. В этот момент объектив тепловизионной камеры направлен на вымя для регистрации температурных показателей в зоне обзора вымени и сосков [13].

После идентификации маститного заболевания животное направляется на специальные лечебные процедуры, минуя процесс дойки. Количество тепловизионных камер и их расположение будут зависеть от типа доильной установки: «Параллель», «Елочка» или «Карусель» [14].

На основании теоретических исследований предложена 3D модель расположения тепловизора относительно биологического объекта – вымени дойной коровы (рис. 6).

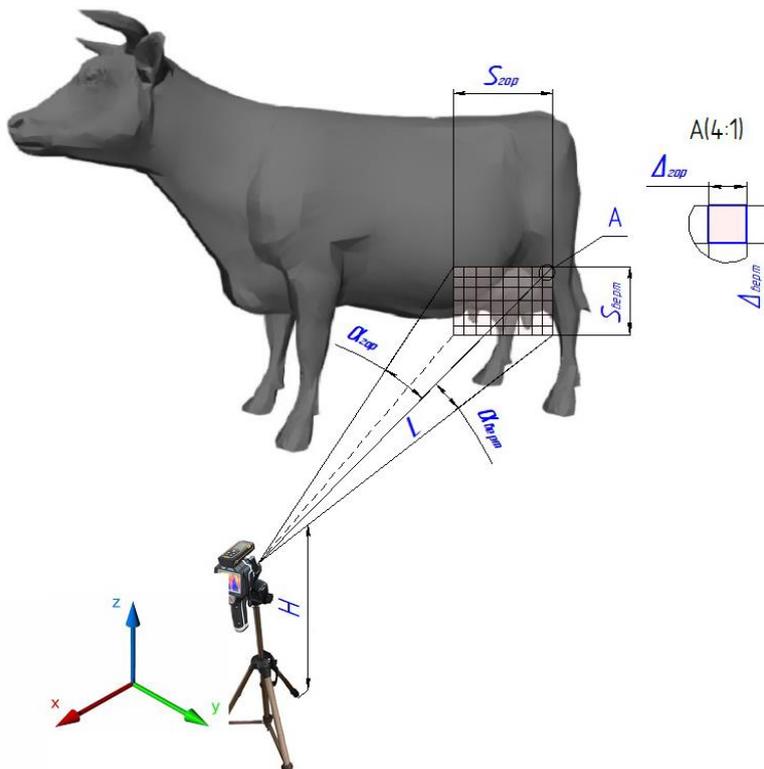


Рисунок 6. 3D модель расположения тепловизора относительно биологического объекта – вымени дойной коровы: $\alpha_{гор}$ – угол обзора объектива тепловизионной камеры в горизонтальной плоскости, град; $\alpha_{верт}$ – угол обзора объектива тепловизионной камеры в вертикальной плоскости, град; $S_{гор}$ – зона обзора вымени в горизонтальной плоскости, м; $S_{верт}$ – зона обзора вымени в вертикальной плоскости, м; $\Delta_{гор}$ – элемент разрешения вымени в горизонтальной плоскости, м; $\Delta_{верт}$ – элемент разрешения вымени в вертикальной плоскости, м; L – расстояние от объектива тепловизионной камеры до вымени, м; H – расстояние от объектива тепловизионной камеры до пола, м.

Таким образом, расположение тепловизионной установки на входе в доильный зал в непосредственной близости от системы идентификации номера коровы позволяет ограничить число тепловизоров и оперативно определить дальнейшее направление движения коровы.

Экспериментальные исследования проводились в действующем предприятии УСП «Совхоз «Порозов-

ский» Свислочского района Гродненской области. На ферме содержалось 520 голов дойного стада. Заболеваемость животных маститом составляла 25 %. Утренняя дойка – с 6:00 до 24:00. На ферме была установлена доильная установка «Параллель» 2x16 фирмы «Вестфалия» (Германия), которая позволяет обслуживать до 800 голов дойного стада.

Для проведения исследований использовался тепловизор марки DT-9875 с сенсорным ЖК-экраном 3,5 дюйма (320 x 240 пикселей). Оптическое поле зрения – 33° x 24°, минимальное фокусное расстояние – 0,3 м. Пространственная разрешающая способность – 3,33 мрад. Детектор (ИК) 160 x 120 пикселей. Температурный диапазон – от -20 °С до 150 °С. Анализ результатов измерения – 3 зоны, с минимальным, максимальным и средним значением температуры. Погрешность прибора $\pm 2^\circ\text{C}$ ($\pm 3,6^\circ\text{F}$) или $\pm 2\%$ от величины показаний.

По результатам проведенных экспериментальных исследований и разработанного алгоритма для идентификации раннего мастита коров по максимальной температуре вымени были определены четыре группы животных в заданных температурных условиях: «здоровая» группа – животные с отрицательным тестом по кенотесту (-) в диапазоне температур $[34,6^\circ\text{C} < T_{max} < 36,8^\circ\text{C}]$; «сомнительная группа» – с сомнительным тестом по кенотесту (+) в диапазоне температур $[36,8^\circ\text{C} < T_{max} < 38^\circ\text{C}]$; «субклиническая» группа – с субклинической стадией мастита по кенотесту (++) в диапазоне $[38^\circ\text{C} < T_{max} < 39^\circ\text{C}]$ и «клиническая» – с выраженной стадией мастита по экспрес-тесту (+++) в диапазоне $[39^\circ\text{C} < T_{max} < 40,5^\circ\text{C}]$. Коэффициент теплового излучения для биологических объектов согласно табличным значениям технического паспорта – 0,98 (рис. 7) [15].

Тепловизор устанавливался на штативе, который позволял изменять высоту расположения ИРТ-камеры от 0,63 до 1,65 м. Данную высоту фиксировали метровой рулеткой. Расстояние от объектива ИК – камеры до биологического объекта (молочной железы дойной коровы), фиксировали дистанционно с помощью лазерного дальномера марки SNDWAY SW-TG50. Прибор позволяет определять расстояние до объекта от 0,05 – 50 м. Точность измерения расстояния $\pm 2\text{мм}$.



Рисунок 7. Оборудование для проведения экспериментальных исследований

Для получения наиболее высокого качества инфракрасных изображений вымени коров, термографические камеры целесообразно устанавливать на входе в доильный зал совместно с электронной идентификацией номера коровы. Процесс эксперимента заключался в следующем. На входе в доильный зал (сбоку относительно биологического объекта – вымени дойной коровы) устанавливался оптико-электронный прибор – тепловизор. В момент прохождения на дойку корова на несколько секунд задерживалась автоматическими сортировочными воротами на технологической зоне площадки. В результате получали инфракрасные изображения вымени и сосков с регистрируемыми температурными показателями в самой горячей области, которые наблюдались на ЖК-приборе. Такая оптимальная идентификация предмаститного состояния позволяет бесстрессово и бесконтактно контролировать животных, заболевших маститом, в режиме реального времени и своевременно проводить зоотехнические и ветеринарные мероприятия (рис. 8).

Рациональное расположение тепловизора относительно биологического объекта (вымени дойной коровы) на входе в доильный зал (левое движение коровы) позволило зафиксировать в зоне обзора объектива камеры вымя и соски животного. На ЖК-экране прибора регистрировали температуру вымени и сосков в самой горячей области. Расстояние по высоте от пола до объектива ИК-камеры составляло – 0,935 м. Расстояние от объектива ИК-камеры до биологического объекта (молочной железы дойной коровы) определили дистанционно лазерным

дальномером – 0,921 м. По полученным инфракрасным изображениям на ЖК-экране тепловизора определили температуру вымени в самой горячей области (37,4 °С). Это позволило отнести данную корову к сомнительной группе.

Движение коров на доильной установке типа «Параллель» осуществляется с двух сторон, поэтому целесообразно было устанавливать тепловизор и с правого бока движения коров на дойку (рис. 9).

В результате рационального расположения тепловизора относительно биологического объекта (вымя дойной коровы) на входе в доильный зал, где движение животного на дойку осуществлялось по правую сторону (правое движение коровы), позволило зафиксировать в зоне обзора камеры вымя и соски коровы и определить температуру вымени и сосков в самой

горячей области. Расстояние по высоте от пола до объектива ИК-камеры составило – 0,975 м. Расстояние от объектива ИК-камеры до биологического объекта – молочной железы дойной коровы определили дистанционно – 0,884 м. По полученным инфракрасным изображениям на ЖК-экране тепловизора зафиксировали температуру вымени в самой горячей области – 33,8 °С, что позволило отнести данную корову к здоровой группе.

При физиологической оценке воздействия доильного аппарата на биологический объект (вымя дойной коровы) наиболее целесообразно размещать термографические камеры в зоне доения относительно доильного места (рис. 10).



Рисунок 8. Размещение тепловизора на входе в доильный зал (левое движение коровы в доильный бокс для доения)

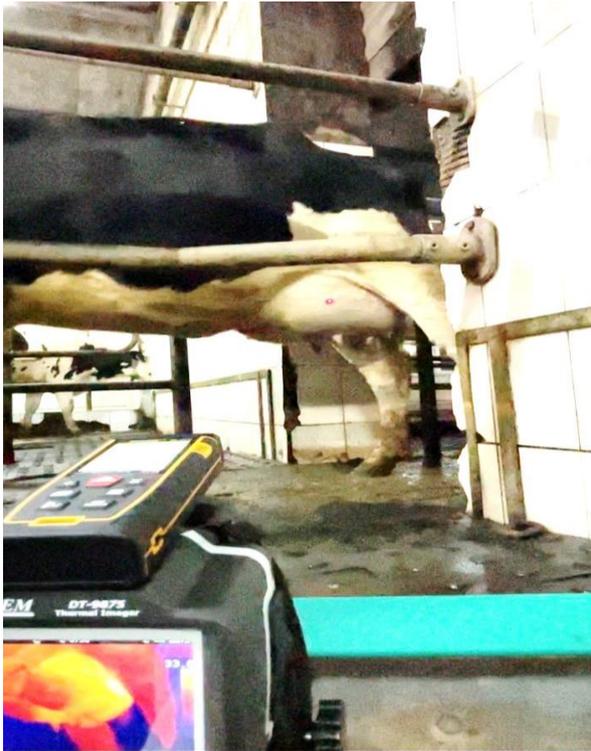


Рисунок 9 Размещение тепловизора на входе в доильный зал (правое движение коровы в доильный бокс для доения)

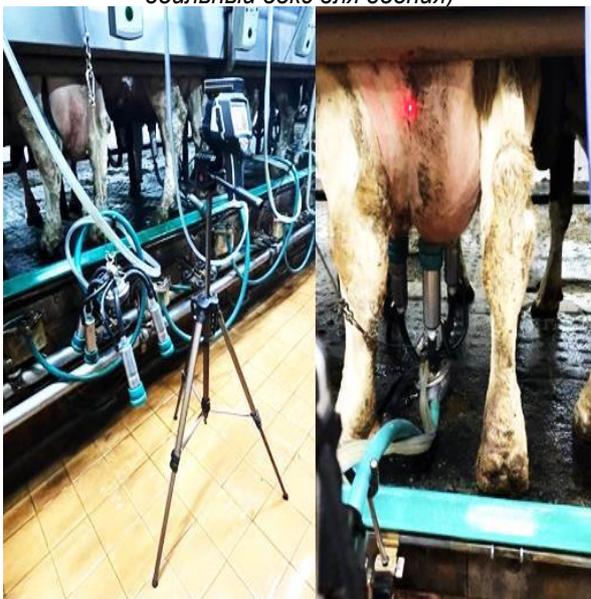


Рисунок 10. Размещение тепловизора в зоне доения относительно доильного места

Динамические изменения температуры вымени в процессе доения позволяют дать оценку влияния доильного аппарата на физиологическое состояние молочной железы, а соски вымени коровы могут служить как индикаторы качества работы доильных аппаратов и эффективности функциональных процессов машинного доения. Чем более щадящий доильный аппарат и лучшее соблюдение технологии машинного

доения, тем меньше нарушений кровообращения происходит в соске, что проявляется уменьшением температуры в конце доения.

Заключение

1. Конструктивно-технологическая схема размещения тепловизионных камер в доильных залах для получения инфракрасных изображений вымени коров определяется ее назначением: оперативной диагностикой мастита в режиме реального времени или проведением диагностики оценки качества работы доильного аппарата. В первом случае более целесообразна установка тепловизионных камер на входе в доильный зал и получения термографического снимка в момент прохождения коровы на дойку. Во втором случае тепловизионные камеры можно разместить непосредственно в зоне доения относительно доильного места. Размещение тепловизионных камер в доильном зале для получения качественных инфракрасных изображений вымени коров будет зависеть от следующих факторов: типа конструкций доильного зала; технических параметров тепловизора; формы, размеров и положения вымени в зоне наблюдения; расстояния от тепловизионной камеры до вымени; скорости движения коровы.

2. В результате проведенного эксперимента установлено, что для более достоверной информации и получения качественных инфракрасных изображений вымени и сосков, для доильной установки типа «Параллель» необходимо устанавливать две тепловизионные камеры, расположенные с двух сторон относительно вымени животного, чтобы обеспечить захват в зону обзора всех четвертей вымени и сосков. Для уменьшения теневых зон обзора вымени необходимо, чтобы в момент получения снимков бедренная часть животного находилась сзади, а данное условие может соблюдаться только в том случае, если корова находится непосредственно в движении со скоростью около 1 м/сек.

3. На основании разработанной методики и проведенных экспериментальных исследований были определены рациональные параметры размещения тепловизионных камер, которые необходимы для получения качественных инфракрасных изображений вымени.

При использовании тепловизора марки DT-9875 или с аналогичными техническими характеристиками:

- расстояние от объектива тепловизионной камеры до вымени $L = 1$ м;
- зона обзора вымени по горизонтали $S_{гор} = 0,57$ м;
- по вертикали $S_{верт} = 0,42$ м;
- минимальный элемент вымени по горизонтали $\Delta_{гор} = 0,0037$ м;
- минимальный элемент вымени по вертикали $\Delta_{верт} = 0,0047$ м.

Установленные параметры позволяют надежно диагностировать степень заболевания маститом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кирсанов, В.В. Разработка автоматизированного и роботизированного комплекса машин и оборуду-

дования с интеллектуальными цифровыми технологиями для развития молочного животноводства / В.В. Кирсанов, Ю.А. Цой, Д.Ю. Павкин // Вестник ВНИИМЖ. – № 2 (46). – 2022. – С. 24-31.

2. Интеллектуальная система управления и обеспечения эффективного производства продукции молочного скотоводства «умной фермы» / Ю.А. Иванов [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – № 1. – С. 57-67.

3. Техническое оснащение «умной фермы» по производству конкурентоспособного молока / Н.М. Морозов [и др.] // Вестник ВНИИМЖ, № 2 (30). – 2018. – С. 22-26.

4. Передня, В.И. Приоритетные направления по созданию «умной» молочной фермы / В.И. Передня, Н.Г. Бакач, Ю.А. Цой // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24-25 октября 2019 г.: в 2 ч. – Минск: БГАТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 31-39.

5. Казакевич, П.П. Технологическая концепция «умной» молочной фермы: монография / П.П. Казакевич, В.Н. Тимошенко, А.А. Музыка / РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству». – Жодино, 2021. – 245 с.

6. Гируцкий, И.И. Анализ инфракрасного изображения вымени коров / И.И. Гируцкий, В.И. Передня, Ю.А. Ракевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 9-12.

7. Ракевич, Ю.А. Использование инфракрасной термографии для выявления мастита коров / Ю.А. Ракевич // Агропанорама. – 2020. – № 5. – С. 19-22.

8. Методика диагностики доильного оборудования и коров по термографическому снимку вымени / И.И. Гируцкий [и др.] // Наука и образование: науч.-техн. журнал Казахстана. – 2022. – № 4 (69). – Т. 3. – С. 50-61.

9. Ракевич, Ю.А. Использование метода термографии для оценки здоровья животных / Ю.А. Ракевич, И.И. Гируцкий // Техника и технологии в животноводстве. – 2023. – № 1(49). – С. 27-34.

10. Гируцкий, И.И. Статистический алгоритм обработки термографических снимков вымени коровы для диагностики мастита с использованием критерия Байесса / И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков, Ю.А. Ракевич // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 1. – С. 42-46.

11. Гируцкий, И.И. Совершенствование доильных аппаратов для щадящего доения коров и средства их диагностики / И.И. Гируцкий, Ю.А. Ракевич, В.К. Клыбик // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сборник РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – 2023. – Вып. 56. – С. 261-266.

12. Алексеев, С.А. Телевизионные системы наблюдения / С.А. Алексеев, В.В. Волхонсий, А.В. Суханов // Особенности применения устройств. – СПб.: ИТМО, 2015. – 103 с.

13. Hirutski, I. Selection of the information parameter for the thermography method of diagnostics of dairy cows mastitis / I. Hirutski, Y.A. Rakevich, A.G. Stankov // International scientific journal «Mechanization in agriculture & conserving of the resources». – Bulgaria, 2021. – P. 14-18.

14. Vision systems desingn [Electronic resource]: Managing mastitis with thermal imaging / Swedish researchers have developed a thermal imaging system that enables farmers to detect Mastitis in dairy cattle, 2016. – Mode of access: <https://www.vision-systems.com/embedded/article/16736798/managing-mastitis-with-thermal-imaging>. – Date of access: 15.06.2023.

15. Тепловизоры инфракрасные DT-9875 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.https://all-pribors.ru/opisanie/56926-14-dt-9875-60803>. – Дата доступа: 15.06.2023.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.08.2023

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2023 года: для индивидуальных подписчиков - 40,08 руб., ведомственная подписка - 42,21 руб.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ МНОГОЧЛЕНОВ

А.Н. Леонов,

профессор каф. моделирования и проектирования БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Т.А. Непарко,

зав. каф. эксплуатации машинно-тракторного парка и агротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Е.Ю. Жушма,

магистрант агромеханического факультета БГАТУ

Ли Цинчжэнь,

науч. сотр. Ибинского профессионального технического колледжа (Сычуань, Китай)

Э.В. Дыба,

зав. лабораторией механизации заготовки кормов

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент

Разработана методология стохастического моделирования технологических процессов, описываемых однофакторными уравнениями в ортогональных многочленах, являющаяся эффективным инструментом изучения сложных технических систем методом системного анализа. Уравнения такого типа позволяют корректно определить минимально достаточный порядок адекватного алгебраического полинома, независимо оценить вклад каждого фактора, а также рассчитать абсолютную ошибку параметра оптимизации. Разработанная методология проиллюстрирована при решении типовой задачи растениеводства – построение зависимости недобора урожая зерновых при отклонении срока посева от оптимального значения.

Ключевые слова: моделируемая функция, моделирующая функция, ортогональные многочлены, недобор урожая, сроки выполнения операций, абсолютная погрешность моделирующей функции.

The method of stochastic modeling of technological processes described by single factor equations in orthogonal polynomials, which is an effective tool for studying complex technical systems by the method of system analysis, has been developed. This type of equations allows us to determine correctly the minimum sufficient order of an adequate algebraic polynomial, to evaluate independently the contribution of each factor, as well as to calculate the absolute error of the optimization parameter. This method is illustrated when solving the typical problem of crop production - establishing a relationship between insufficient crop harvest and optimal value deviation.

Key words: simulated function, simulating function, orthogonal polynomial, insufficient harvest, operation time, absolute error of simulating function.

Введение

Эффективным методом исследования сложных технических систем (СТС), к которым относится агропромышленный комплекс (АПК), является системный анализ. Начальный этап системного анализа – операция **анализ**, которая включает в себя разбиение СТС на подсистемы с последующим математическим моделированием. Моделирование подсистем, так как они являются объектами более низкого порядка по сравнению с обобщенной системой, реализовать значительно легче, чем моделирование всей системы в целом. Заключительный этап системного анализа – операция **синтез**, которая включает в себя объедине-

ние всех подсистем в единое целое путем наложения функциональных связей между ними и построение обобщенной модели [1].

Для построения обобщенной модели СТС в стандартных компьютерных системах (например, MS Excel, Mathcad) необходимо, чтобы их математические модели и функциональные связи между ними (в дальнейшем – объекты) были представлены непрерывными функциями с непрерывными производными. Однако на практике это не всегда возможно. В этом случае предполагается, что изучаемый объект описывается некоторой неизвестной функцией $Y(t)$ (моделируемая функция), которая задается базой дискретных значений $Y_j(t)$, получаемых в результате

экспериментальных исследований (t – независимый управляющий фактор). Математически задача моделирования объекта формулируется следующим образом: для моделируемой функции $Y(t)$ необходимо «подобрать» такую моделирующую функцию $\psi(t)$, чтобы $[Y(t) \approx \psi(t)]$ [2].

В данной статье рассмотрен случай, в котором и моделируемая функция $Y(t)$ и моделирующая функция $\psi(t)$ зависят от одного фактора, и обе представлены в виде степенного полинома k -го порядка [3]

$$\begin{aligned} \psi(t) &= a_0 + a_1 t^1 + a_2 t^2 + \dots + a_k t^k = \\ &= a_0 + \sum_{l=1}^k a_l t^l, \quad t \in [t_{\min}, t_{\max}], \end{aligned} \quad (1)$$

где a_l – размерный коэффициент, $l = 0, \dots, k$.

Такой способ задания обеих функций имеет ряд существенных недостатков. Для исключения отрицательных моментов, связанных с различной размерностью и масштабом размерного фактора t , выраженного в натуральных координатах, моделирование нами осуществляется в безразмерном нормированном факторе X [3].

$$X_j = \frac{t_j - t_0}{\Delta t}, \quad X_j \in [-1, +1], \quad j = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где $t_0 = (t_{\min} + t_{\max})/2$ – основной уровень;

$\Delta t = (t_{\max} - t_{\min})/2$ – интервал варьирования размерного фактора t .

После замены размерного фактора t на безразмерный X , уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \psi(X) &= b_0 X_0 + b_1 X^1 + b_2 X^2 + \dots + b_k X^k = \\ &= b_0 X_0 + \sum_{l=1}^k b_l X^l, \quad X \in [-1, +1], \end{aligned} \quad (3)$$

где b_l – безразмерный коэффициент уравнения; $l = 0, \dots, k, X_0 = 1$.

Однако уравнение (3) также имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что все факторы X^l взаимозависимы, что затрудняет интерпретацию параметра $\psi(X)$ и существенно усложняет расчет абсолютной ошибки моделирующей функции $\Delta\psi(X)$, которая необходима для полного комплекта результатов моделирования.

Существенный прогресс в повышение эффективности моделирования изучаемых объектов внес Дж. Форсайт, который предложил структуру моделирующей функции $\psi(X)$ в виде суммы ортогональных многочленов, а расчет коэффициентов моделирующей функции по критерию Гаусса – Лагранжа методом наименьших квадратов (МНК) [4].

Уравнение моделирующей функции в ортогональных многочленах имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi(X) &= c_0 q_0 + c_1 q_1(X) + c_2 q_2(X) + \dots + \\ &+ c_k q_k(X) = \sum_{l=0}^k c_l q_l(X), \end{aligned} \quad (4)$$

где c_l – безразмерный коэффициент;

$q_l(X)$ – безразмерный ортогональный многочлен l -го порядка, $l = 0, 1, \dots, k$; $q_0(X) = 1$.

В научной литературе имеется большое количество публикаций, которые посвящены моделированию объектов, описываемых детерминированными закономерностями [2; 4-8]. В этом случае каждому независимому управляющему фактору t_j соответствует одно значение моделирующей функции $\psi(t_j)$.

Ортогональные многочлены задаются уравнениями [5]

$$\begin{cases} q_0(X) = 1 \\ q_1(X) = X - \alpha_{10} \\ q_2(X) = X^2 - \alpha_{21}X - \alpha_{20} \\ \dots \\ q_k(X) = X^k - \alpha_{k,k-1}X^{k-1} - \dots - \alpha_{k0}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\alpha_{10}, \alpha_{21}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{k0}$ – коэффициенты, которые рассчитывают из условия ортогональности многочленов, задаваемых следующим уравнением:

$$\sum_{j=1}^N q_l(X_j) \cdot q_m(X_j) = \begin{cases} 0, & l \neq m \\ \sum_{j=1}^N q_l^2(X_j) > 0, & l = m \end{cases} \quad (6)$$

Для того, чтобы моделирующая функция $\psi(X)$ (уравнение (4)) «наилучшим образом» отражала дискретные экспериментальные значения моделируемой функции $Y(X_j)$, в данной работе коэффициенты c_0, c_1, \dots, c_k при $N > k+1$ рассчитывают методом МНК

$$\Phi(c_0, c_1, c_2, \dots, c_k) = \sum_{j=1}^N [\psi(X_j) - Y_j(X_j)]^2 = \min, \quad (7)$$

где $\psi(X_j)$ – значение моделирующей функции при $X = X_j$ (уравнение (4)).

Необходимое условие минимума функции $\Phi(c_0, c_1, c_2, \dots, c_k)$

$$\partial\Phi/\partial c_l = 0, \quad l = 0, 1, \dots, k. \quad (8)$$

Система уравнений (8) после преобразования имеет следующий вид:

$$\begin{cases} c_0 \sum_{j=1}^N q_0^2 + c_1 \sum_{j=1}^N q_0 q_{1j} + c_2 \sum_{j=1}^N q_0 q_{2j} + \dots + c_k \sum_{j=1}^N q_0 q_{kj} = \sum_{j=1}^N q_0 \bar{Y}_j \\ c_0 \sum_{j=1}^N q_0 q_{1j} + c_1 \sum_{j=1}^N q_{1j}^2 + c_2 \sum_{j=1}^N q_{1j} q_{2j} + \dots + c_k \sum_{j=1}^N q_{1j} q_{kj} = \sum_{j=1}^N q_{1j} \bar{Y}_j \\ \dots \\ c_0 \sum_{j=1}^N q_0 q_{kj} + c_1 \sum_{j=1}^N q_{1j} q_{kj} + c_2 \sum_{j=1}^N q_{2j} q_{kj} + \dots + c_k \sum_{j=1}^N q_{kj}^2 = \sum_{j=1}^N q_{kj} \bar{Y}_j \end{cases} \quad (9)$$

Так как в системе уравнений (9) многочлены ортогональны (система уравнений (6)), то эта система имеет диагональный вид и поэтому регрессионные коэффициенты $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ рассчитывают по достаточно простым формулам [3]

$$c_0 = \frac{\sum_{j=1}^N q_{0j} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^N q_{0j}^2}, c_1 = \frac{\sum_{j=1}^N q_{1j} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^N q_{1j}^2},$$

$$c_2 = \frac{\sum_{j=1}^N q_{2j} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^N q_{2j}^2}, \dots, c_k = \frac{\sum_{j=1}^N q_{kj} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^N q_{kj}^2}. \quad (10)$$

Абсолютная погрешность $\Delta Y(X)$ моделируемой функции равна [2]

$$\Delta \psi(X) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [\psi(X_j) - Y_j(X_j)]^2}{k+1}}. \quad (11)$$

Очевидно, что чем выше порядок ортогональных многочленов, тем точнее моделирующая функция $\psi(X)$ отражает дискретные значения моделируемой функции $Y(X)$. Наилучшее среднее квадратичное приближение в случае объекта, описываемого детерминированными законами, достигается при таком значении коэффициента k , при котором абсолютная погрешность $\Delta \psi(X)$, рассчитанная по уравнению (11), равна инструментальной погрешности измерения $Y_j(X_j)$.

Стохастическому моделированию объектов в ортогональных многочленах в научной литературе посвящено значительно меньшее число публикаций, и порядок многочленов, используемых в них, не превышает $k = 3$ [7]. При стохастическом моделировании каждому управляющему фактору t_j соответствуют различные значения объекта, причем каждое из значений в отдельно взятом опыте реализуется концептуально непредсказуемо, даже при соблюдении одинаковых условий эксперимента.

Поясним методологию стохастического моделирования на конкретном примере (производство зерна). Производство зерна относится к классу сложных технических систем, так как состоит из большого количества подсистем (основная обработка почвы, внесение удобрений, предпосевная обработка почвы, посев, операции по уходу за посевами (подкормка, защита растений, орошение и др.), уборка, послеуборочная доработка продукции). Очевидно, что методология изучения основных закономерностей растениеводства должна базироваться на системном анализе. Кроме моделирования, перечисленных подсистем, необходимо также наличие некоторого числа математических уравнений, характеризующих функциональные связи между подсистемами, которые необходимы при объединении подсистем в единое целое. В растениеводстве в качестве таких связей используют, как правило, математические модели, отражающие зависимость недобора урожая зерновых культур от сроков выполнения производственных операций (пахота, посев, уборка) [8].

Моделирование процессов фотосинтеза, позволяющее установить зависимость прироста биомассы зерна на стадии молочно-воскового созревания, а также естественного процесса осыпания зерна на стадии уборки, с помощью детерминированных закономерностей, выработанных в молекулярной биологии, в настоящее время реализовать практически невозможно. Кроме того, детерминированное моделирование этих процессов в значительной степени осложняется непредсказуемыми колебаниями природно-климатических условий. Поэтому стохастическое моделирование производства зерна является единственно возможным способом изучения таких систем.

В результате агротехнических исследований установлено, что на величину собранного урожая значительное влияние оказывает соблюдение оптимальных сроков выполнения основных операций, возможно даже большее, чем их качество [8, 9]. В свою очередь, данный фактор оказывает существенное влияние на формирование рационального комплекса технических средств, что напрямую определяет эффективность производства (себестоимость зерна, производительность труда).

Алгоритм Форсайта, разработанный для моделирования детерминированных процессов, в целом можно использовать и для моделирования стохастических процессов, но с учетом того, что при обработке исходных экспериментальных данных следует использовать аппарат математической статистики. Поэтому можно ожидать, что значения коэффициентов α в ортогональных многочленах (система уравнений (5)), а также абсолютная погрешность прогнозирования изучаемого объекта, будут зависеть не только от порядка ортогональных многочленов k , но и от плана эксперимента, количества опытов N , числа дублей n в каждом опыте.

Целью работы является разработка методологии стохастического моделирования технологических процессов с помощью уравнений регрессии в ортогональных многочленах, а также иллюстрация разработанного алгоритма при решении конкретной народнохозяйственной задачи – математическое моделирование зависимости урожая озимой пшеницы от сроков посева.

Основная часть

Прежде чем перейти к моделированию технологического процесса, необходимо задать базу экспериментальных данных $Y_j(X_j)$, характеризующих этот процесс. Так как природа изучаемого объекта стохастическая, то получение экспериментальных данных должно осуществляться по заранее выбранному плану, матрица планирования которого состоит из N опытов ($j = 1, \dots, N$) и n дублей в каждом опыте ($i = 1, \dots, n$), а в качестве плана эксперимента использован равномерный симметричный

план (РСП), размерный фактор которого в натуральных координатах задается уравнением

$$t_j = t_{\min} + \frac{j-1}{N-1} \cdot (t_{\max} - t_{\min}),$$

$$t \in [t_{\min}, t_{\max}], \text{ при } j = 1, \dots, N. \quad (12)$$

Равномерный симметричный план эксперимента в безразмерных нормированных координатах X после подстановки уравнения (12) в уравнение (2) задается следующим уравнением:

$$X_j = -1 + \frac{2(j-1)}{N-1}, \quad X_j \in [-1, +1],$$

при $j = 1, \dots, N.$ (13)

Если интервал варьирования фактора $X_j \in [-1, +1]$, а значения фактора антисимметричны относительно начала координат, то ортогональный многочлен $q_k(X)$ содержит только те степени фактора X , которые имеют одинаковую четность с номером k [5, 6]. Поэтому система уравнений (5) принимает следующий вид (для иллюстрации метода ограничимся случаем $k = 5$):

$$\begin{cases} q_0(X) = 1 \\ q_1(X) = X \\ q_2(X) = X^2 - \alpha_{20} \\ q_3(X) = X^3 - \alpha_{31}X \\ q_4(X) = X^4 - \alpha_{42}X^2 - \alpha_{40} \\ q_5(X) = X^5 - \alpha_{53}X^3 - \alpha_{51}X, \end{cases} \quad (14)$$

где $\alpha_{20}, \alpha_{31}, \alpha_{42}, \alpha_{40}, \alpha_{53}, \alpha_{51}$ – коэффициенты ортогональных многочленов.

Следует отметить, что в работе была сделана попытка рассчитать коэффициенты α по системе уравнений (5). Результат: $\alpha_{10}, \alpha_{21}, \alpha_{32}, \alpha_{30}, \alpha_{43}, \alpha_{41}, \alpha_{54}, \alpha_{52}, \alpha_{50}$ тождественно равны нулю, что подтвердило справедливость утверждения, сделанного в работах [5, 6], для детерминированных систем.

Так как факторы $q_0(X), q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X)$ ортогональны между собой, то система уравнений (9) имеет диагональный вид, а коэффициенты $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ рассчитываются по системе уравнений (10).

При расчете коэффициентов $\alpha_{20}, \alpha_{31}, \alpha_{42}, \alpha_{40}, \alpha_{53}, \alpha_{51}$, значения которых обеспечивают ортогональность многочленов $q_0(X), q_1(x), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X)$, следует учесть, что при антисимметричности РСП

$$X_j = -X_{N-j+1} \text{ для } j = 1, 2, \dots, N, \quad (15)$$

справедливы следующие формулы:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N X_j \equiv 0 \\ \sum_{j=1}^N X_j^{2m+1} \equiv 0 \end{cases}, \quad m = 0, 1, 2. \quad (16)$$

Приведем еще одно очевидное равенство, которое будет полезно при расчете коэффициентов $\alpha_{20}, \alpha_{31}, \alpha_{42}, \alpha_{40}, \alpha_{53}, \alpha_{51}$.

$$\sum_{j=1}^N X_j^{2m} = \overline{X^{2m}} \cdot N, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

Ниже приводится подробный расчет коэффициентов $\alpha_{20}, \alpha_{31}, \alpha_{42}, \alpha_{40}, \alpha_{53}, \alpha_{51}$.

$$1. \sum_{j=1}^N q_{1j} \cdot q_{0j} = \sum_{j=1}^N X_j \cdot 1 \equiv 0, \quad (18)$$

факторы (q_1, q_0) для РСП ортогональны **всегда**.

$$2. \begin{cases} \sum_{j=1}^N q_{2j} \cdot q_{0j} = \sum_{j=1}^N (X_j^2 - \alpha_{20}) \cdot 1 = \\ = (\overline{X^2} - \alpha_{20}) \cdot N = 0 \rightarrow \alpha_{20} = \overline{X^2}, \\ \sum_{j=1}^N q_{2j} \cdot q_{1j} = \sum_{j=1}^N (X_j^2 - \alpha_{20}) \cdot X_j \equiv 0 \end{cases}$$

факторы $(q_2, q_0), (q_2, q_1)$ для РСП ортогональны при $\alpha_{20} = \overline{X^2}$. (19)

$$3. \begin{cases} \sum_{j=1}^N q_{3j} q_{0j} = \sum_{j=1}^N (X_j^3 - X_j) \cdot 1 \equiv 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{3j} q_{1j} = \sum_{j=1}^N (X_j^3 - \alpha_{31} X_j) \cdot X_j = \\ = \sum_{j=1}^N X_j^4 - \alpha_{31} \sum_{j=1}^N X_j^2 = (\overline{X^4} - \alpha_{31} \overline{X^2}) \times \\ \times N = 0 \rightarrow \alpha_{31} = \overline{X^4} / \overline{X^2} \\ \sum_{j=1}^N q_{3j} q_{2j} = \sum_{j=1}^N (X_j^3 - \alpha_{31} X_j) \cdot (X_j^2 - \alpha_{20}) \equiv 0, \end{cases}$$

факторы $(q_3, q_0), (q_3, q_1), (q_3, q_2)$ для РСП ортогональны при $\alpha_{31} = \frac{\overline{X^4}}{\overline{X^2}}$. (20)

$$4. \begin{cases} \sum_{j=1}^N q_{4j} q_{0j} = \sum_{j=1}^N (X_j^4 - \alpha_{42} X_j^2 - \alpha_{40}) \cdot 1 = (\overline{X^4} - \alpha_{42} \overline{X^2} - \alpha_{40}) \cdot N = 0 \rightarrow \overline{X^4} - \alpha_{42} \overline{X^2} - \alpha_{40} = 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{4j} q_{1j} = \sum_{j=1}^N (X_j^4 - \alpha_{42} X_j^2 - \alpha_{40}) \cdot X_j \equiv 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{4j} q_{2j} = \sum_{j=1}^N (X_j^4 - \alpha_{42} X_j^2 - \alpha_{40}) \cdot (X_j^2 - \overline{X^2}) = \left[(\overline{X^6} - \overline{X^4} \cdot \overline{X^2}) - \alpha_{42} \left(\overline{X^4} - (\overline{X^2})^2 \right) \right] \cdot N = 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{4j} q_{3j} = \sum_{j=1}^N (X_j^4 - \alpha_{42} X_j^2 - \alpha_{40}) \cdot (X_j^3 - \alpha_{31} X_j) \equiv 0 \end{cases} \quad (21)$$

Для расчета констант α_{42} , α_{40} следует воспользоваться 1-м и 3-м уравнениями системы (21)

$$\begin{cases} \alpha_{42} \overline{X^2} + \alpha_{40} = \overline{X^4} \\ \alpha_{42} \left(\overline{X^4} - (\overline{X^2})^2 \right) = \overline{X^6} - \overline{X^4} \cdot \overline{X^2} \end{cases} \quad (22)$$

Из системы уравнений (22) следует, что факторы (q_4, q_0) , (q_4, q_1) , (q_4, q_2) , (q_4, q_3) – ортогональны при

$$\alpha_{42} = \frac{\overline{X^6} - \overline{X^4} \cdot \overline{X^2}}{\overline{X^4} - (\overline{X^2})^2}, \quad \alpha_{40} = \frac{(\overline{X^4})^2 - \overline{X^6} \cdot \overline{X^2}}{\overline{X^4} - (\overline{X^2})^2}. \quad (23)$$

$$5. \begin{cases} \sum_{j=1}^N q_{5j} q_{0j} = \sum_{j=1}^N (X_j^5 - \alpha_{53} X_j^3 - \alpha_{51} X_j) \cdot 1 \equiv 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{5j} q_{1j} = \sum_{j=1}^N (X_j^5 - \alpha_{53} X_j^3 - \alpha_{51} X_j) \cdot X_j = (\overline{X^6} - \alpha_{53} \overline{X^4} - \alpha_{51} \overline{X^2}) \cdot N = 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{5j} q_{2j} = \sum_{j=1}^N (X_j^5 - \alpha_{53} X_j^3 - \alpha_{51} X_j) \cdot (X_j^2 - \overline{X^2}) \equiv 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{5j} q_{3j} = \sum_{j=1}^N (X_j^5 - \alpha_{53} X_j^3 - \alpha_{51} X_j) \cdot \left(X_j^3 - \frac{\overline{X^4}}{X^2} X_j \right) = \left[\left(\overline{X^8} - \frac{\overline{X^4}}{X^2} \cdot \overline{X^6} \right) - \alpha_{53} \left(\overline{X^6} - \frac{\overline{X^4}}{X^2} \cdot \overline{X^4} \right) \right] \cdot N = 0 \\ \sum_{j=1}^N q_{5j} q_{4j} = \sum_{j=1}^N (X_j^5 - \alpha_{53} X_j^3 - \alpha_{51} X_j) \cdot (X_j^4 - \alpha_{42} X_j^2 - \alpha_{40}) \equiv 0 \end{cases} \quad (24)$$

Для расчета констант α_{53} , α_{51} следует воспользоваться 2-м и 4-м уравнениями системы (24)

$$\begin{cases} \alpha_{53} \overline{X^4} + \alpha_{51} \overline{X^2} = \overline{X^6} \\ \alpha_{53} \left(\overline{X^6} - \frac{\overline{X^4}}{X^2} \cdot \overline{X^4} \right) = \left(\overline{X^8} - \frac{\overline{X^4}}{X^2} \cdot \overline{X^6} \right), \end{cases} \quad (25)$$

из системы уравнений (25) следует, что факторы (q_5, q_0) , (q_5, q_1) , (q_5, q_2) , (q_5, q_3) , (q_5, q_4) для РСП ортогональны при условии:

$$\alpha_{53} = \frac{\overline{X^8} \cdot \overline{X^2} - \overline{X^6} \cdot \overline{X^4}}{\overline{X^6} \cdot \overline{X^2} - (\overline{X^4})^2}, \quad \alpha_{51} = \frac{(\overline{X^6})^2 - \overline{X^8} \cdot \overline{X^4}}{\overline{X^6} \cdot \overline{X^2} - (\overline{X^4})^2}. \quad (26)$$

Таким образом, моделирующая функция $\psi(X)$ может быть представлена уравнением в ортогональных многочленах 5-го порядка

$$\psi(X) = c_0 + c_1 X + c_2 (X^2 - \alpha_{20}) + c_3 (X^3 - \alpha_{31} X) + c_4 (X^4 - \alpha_{42} X^2 - \alpha_{40}) + c_5 (X^5 - \alpha_{53} X^3 - \alpha_{51} X), \quad (27)$$

или с учетом уравнений (18)-(20) и систем уравнений (23), (26)

$$\left\{ \begin{aligned} \psi(X) = & c_0 + c_1 X + c_2 (X^2 - \overline{X^2}) + c_3 \left(X^3 - \frac{\overline{X^4}}{X^2} \times X \right) + c_4 \left(X^4 - \frac{\overline{X^6} - \overline{X^4} \times \overline{X^2}}{X^4 - (\overline{X^2})^2} \times X^2 - \frac{(\overline{X^4})^2 - \overline{X^6} \times \overline{X^2}}{X^4 - (\overline{X^2})^2} \right) + \\ & + c_5 \left(X^5 - \frac{\overline{X^8} \times \overline{X^2} - \overline{X^6} \times \overline{X^4}}{X^6 \times \overline{X^2} - (\overline{X^4})^2} X^3 - \frac{(\overline{X^6})^2 - \overline{X^8} \times \overline{X^4}}{X^6 \times \overline{X^2} - (\overline{X^4})^2} X \right) \end{aligned} \right. , \quad (28)$$

где коэффициенты $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ рассчитываются по системе уравнений (10).

В таблице 1 приведены результаты расчетов коэффициентов $\alpha_{20}, \alpha_{31}, \alpha_{42}, \alpha_{40}, \alpha_{53}, \alpha_{51}$, которые являются функциями только 4-х факторов: $\overline{X^2}, \overline{X^4}, \overline{X^6}, \overline{X^8}$. Для расчета коэффициентов α , например, в компьютерной программе MS Excel, в зависимости от числа опытов N , сначала, с учетом уравнения (13), формируют столбцы X^2, X^4, X^6, X^8 , затем рассчитывают их средние значения, потом по уравнениям (19), (20) и системам уравнений (23), (26) рассчитывают коэффициенты $\alpha_{20}, \alpha_{31}, \alpha_{42}, \alpha_{40}, \alpha_{53}, \alpha_{51}$.

Таблица 1. Коэффициенты α ортогональных многочленов для различных N

N	α_{20}	α_{31}	α_{42}	α_{40}	α_{53}	α_{51}
21	0,3667	0,6580	0,9357	-0,1018	1,2056	-0,2794
20	0,3684	0,6609	0,9395	-0,1026	1,2096	-0,2812
19	0,3704	0,6642	0,9436	-0,1035	1,2140	-0,2831
18	0,3725	0,6678	0,9481	-0,1044	1,2188	-0,2852
17	0,3750	0,6719	0,9531	-0,1055	1,2240	-0,2874
16	0,3778	0,6764	0,9587	-0,1066	1,2296	-0,2899
15	0,3810	0,6816	0,9650	-0,1080	1,2358	-0,2926
14	0,3846	0,6876	0,9721	-0,1094	1,2426	-0,2954
13	0,3889	0,6944	0,9802	-0,1111	1,2500	-0,2985
12	0,3939	0,7025	0,9894	-0,1130	1,2580	-0,3017
11	0,4000	0,7120	1,0000	-0,1152	1,2667	-0,3051
10	0,4074	0,7235	1,0123	-0,1177	1,2757	-0,3082
9	0,4167	0,7375	1,0268	-0,1205	1,2847	-0,3108
8	0,4286	0,7551	1,0437	-0,1237	1,2925	-0,3116

Как и предполагалось, значения ортогональных многочленов при стохастическом моделировании зависят от числа опытов N .

Проиллюстрируем применение разработанного алгоритма стохастического моделирования в ортогональных многочленах для моделирования зависимости недобора урожая озимой пшеницы при отклонении срока посева от оптимального значения. Исходные данные, а также предварительная обработка экспериментальных данных приведены в таблицах 2-3 [8, 9].

В таблице 3 приведены результаты предварительной обработки экспериментальных данных [3].

В таблицах 4-6 приведены значения ортогональных многочленов моделирующей функции ψ_j^p при $N = 11$; абсолютной погрешности коэффициентов c_k , а также результаты проверки коэффициентов c_k на значимость

по критерию Стьюдента; моделирующей функции $\psi(X)$ на адекватность по критерию Фишера [3].

Адекватность моделирующей функции проверяется по критерию Фишера

$$S_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\psi_j^p - \bar{Y}_j)^2}{N - B}; \quad (\text{табл. 6});$$

$$f_{ад} = N - B; \quad F_3 = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2},$$

$$F_T = F_{N-B, N(n-1); 0,95},$$

так как $S_{ад}^2 > S_{воспр}^2$

Если $F_3 < F_T$, то уравнение регрессии адекватно, в противном случае – неадекватно [3].

Так как коэффициент c_5 незначим (табл. 5), то

$$\psi_4(X) = 14,64 - 4,5 \cdot X + 22,3 \times$$

$$\times (X^2 - 0,400) - 10,9 \times$$

$$\times (X^4 - X^2 + 0,115).$$

Полученное уравнение адекватно, так как $F_3 = 1,452 < 2,464 = F_{7,22; 0,95}$ (табл. 6).

Ортогональность многочленов позволяет рассчитать не только величину недобора урожая озимой пшеницы при отклонении оптимального срока посева от оптимального значения, но и ее абсолютную погрешность (уравнение (24))

$$\begin{aligned} \Delta \Psi(X) = & t_{N(n-1); 0,95} \cdot \left(S^2(c_0) + q_1^2 S^2(c_1) + \right. \\ & + q_2^2 S^2(c_2) + q_3^2 S^2(b_3) + q_4^2 S^2(c_4) + \\ & \left. + q_5^2 S^2(c_5) \right)^{0,5}. \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Psi(X) = & 2,074 \cdot \left(0,04278 + 0,1070 \cdot X^2 + \right. \\ & + 0,3428 \cdot (X^2 - 0,400)^2 + \\ & \left. + 4,464 \cdot (X^4 - X^2 + 0,115)^2 \right)^{0,5}. \end{aligned} \quad (30)$$

Таблица 2. Исходные данные по озимой пшенице и рассчитанные ортогональные многочлены

<i>N</i>	<i>n</i>	<i>t</i> _{min} , ДН	<i>t</i> _{max} , ДН	<i>X</i> ₀ , ДН	ΔX , ДН	α_{20}	α_{31}	α_{42}	α_{40}	α_{53}	α_{51}
11	3	-25	25	0	25	0,4000	0,7120	1,0000	-0,1152	1,2667	-0,3051

Таблица 3. Матрица планирования. Предварительная обработка экспериментальных данных

<i>j</i>	<i>t</i> , ДН	<i>Y</i> _{1i} , %	<i>Y</i> _{2i} , %	<i>Y</i> _{3i} , %	\bar{Y}_j , %	<i>S</i> _{<i>j</i>} ²	$\Delta \bar{Y}_j$, %
1	-25	30,1	32,3	33,6	32,0	3,130	4,4
2	-20	24,0	25,5	22,5	24,0	2,250	3,7
3	-15	18,1	19,2	16,7	18,0	1,570	3,1
4	-10	10,5	10,4	12,1	11,0	0,910	2,4
5	-5	6,2	5,2	6,6	6,0	0,520	1,8
6	0	4,3	4,4	3,3	4,0	0,370	1,5
7	5	4,7	5,8	4,5	5,0	0,490	1,7
8	10	8,1	9,0	9,9	9,0	0,810	2,2
9	15	14,0	13,2	11,8	13,0	1,240	2,8
10	20	17,1	18,3	15,6	17,0	1,830	3,4
11	25	21,9	20,5	23,6	22,0	2,410	3,9
<i>G</i> ₃ = 0,202 < <i>G</i> _{2, 11; 0,95} = 0,417; Сумма					161,0	15,53	31

$$S^2_{\text{воспр}} = \sum_{j=1}^N S_j^2 / N = 1,412; f_{\text{воспр}} = N(n-1) = 22; \Delta \bar{Y}_j = \frac{t_{n-1; 0,95} \cdot S_j}{\sqrt{n}}$$

Таблица 4. Матрица моделирования.

Рассчитанные параметры ψ_j^p и их абсолютная погрешность $\Delta \psi_j^p$

<i>j</i>	\bar{Y}_j , %	<i>q</i> _{0j}	<i>q</i> _{1j}	<i>q</i> _{2j}	<i>q</i> _{3j}	<i>q</i> _{4j}	<i>q</i> _{5j}	ψ_j^p , %	$(\psi_j^p - \bar{Y}_j)^2$	$\Delta \psi_j^p$, %	$\Delta \bar{Y}_j$, %	$\Delta \bar{Y}_j / \Delta \psi_j^p$
1	32,0	1	-1,000	0,600	-0,288	0,115	-0,038	31,22	0,603	1,2	4,4	3,7
2	24,0	1	-0,800	0,240	0,058	-0,115	0,077	24,82	0,665	0,9	3,7	4,1
3	18,0	1	-0,600	-0,040	0,211	-0,115	0,013	17,68	0,106	0,8	3,1	3,9
4	11,0	1	-0,400	-0,240	0,221	-0,019	-0,051	11,27	0,074	0,6	2,4	4,0
5	6,0	1	-0,200	-0,360	0,134	0,077	-0,051	6,65	0,427	0,7	1,8	2,6
6	4,0	1	0,000	-0,400	0,000	0,115	0,000	4,45	0,202	0,8	1,5	1,9
7	5,0	1	0,200	-0,360	-0,134	0,077	0,051	4,87	0,017	0,7	1,7	2,4
8	9,0	1	0,400	-0,240	-0,221	-0,019	0,051	7,71	1,670	0,6	2,2	3,7
9	13,0	1	0,600	-0,040	-0,211	-0,115	-0,013	12,33	0,449	0,8	2,8	3,5
10	17,0	1	0,800	0,240	-0,058	-0,115	-0,077	17,69	0,473	0,9	3,4	3,8
11	22,0	1	1,000	0,600	0,288	0,115	0,038	22,31	0,099	1,2	3,9	3,3
									σ = 4,784	0,8	2,8	3,5

Таблица 5. Коэффициенты уравнения моделирующей функции *c_k* и их значимость

	<i>c</i> ₀	<i>c</i> ₁	<i>c</i> ₂	<i>c</i> ₃	<i>c</i> ₄	<i>c</i> ₅	
	14,64	-4,5	22,3	-2,1	-10,9	3	
$S^2(c_k) = \frac{S^2_{\text{воспр}}}{n \sum_{j=1}^n q_{kj}^2}$	0,04278	0,1070	0,3428	1,190	4,464	18,41	
$S(c_k) = \sqrt{S^2(c_k)}$	0,2068	0,3270	0,5855	1,091	2,113	4,291	
$t_{N(n-1); 0,95}$	2,074	2,074	2,074	2,074	2,074	2,074	
$\Delta c_k = t_{N(n-1); 0,95} \cdot S(c_k)$	0,43	0,7	1,2	2,3	4,4	9	B
Значимость коэффициента <i>c_k</i> равна 1 если $\Delta c_k < c_k $, в противном 0	1	1	1	0	1	0	4

Таблица 6. Результаты проверки уравнения моделируемой функции на адекватность

Уравнения	$S_{\text{воспр}}^2 (f_{\text{воспр}})$	$S_{\text{ад}}^2 (f_{\text{ад}})$	F_9	$F_{\text{табл}}$	Адекват.
$\Psi_0(X) = 14,64$	1,412 (22)	236,6 (10)	167,6	2,297	Нет
$\Psi_1(X) = 14,64 - 4,5X$	1,412 (22)	233,7 (9)	165,6	2,342	Нет
$\Psi_2(X) = 14,64 - 4,5X + 22,3 \cdot (X^2 - 0,400)$	1,412 (22)	6,514 (8)	4,613	2,397	Нет
$\Psi_3(X)^* = 14,64 - 4,5X + 22,3 \cdot (X^2 - 0,400)$	1,412 (22)	6,514 (8)	4,613	2,397	Нет
$\Psi_4 = 14,64 - 4,5X + 22,3 \cdot (X^2 - 0,400) - 10,9 \cdot (X^4 - X^2 + 0,115)$	1,412 (22)	2,050 (7)	1,452	2,464	Да

* Уравнение $\Psi_3(X) = \Psi_2(X)$, так как коэффициент c_3 – незначим

Следует обратить внимание на то, что уравнения моделирующей функции 0-го, 1-го, 2-го, 3-го порядков неадекватны (табл. 6). В случае ортогональности многочленов последовательное повышение порядка уравнения $\psi(X)$ не изменяет значения предыдущих коэффициентов c_k , что подтверждает независимость ортогональных многочленов. Так как уравнение 4-го порядка адекватно, коэффициент c_5 должен быть незначимым, что и подтверждается данными таблиц 5 и 6.

Следует обратить внимание еще на один результат расчета. Из данных таблицы 4 следует, что среднее значение абсолютной погрешности моделирующей функции $\Delta\psi(X)$ в 3 раза меньше, чем среднее значение абсолютной погрешности экспериментальных данных $\Delta\bar{Y}_j$. Объяснение этого явления достаточно простое и предсказуемое: среднее экспериментальное значение моделируемой функции \bar{Y}_j рассчитывается по 3-м дублям ($n = 3$), а значения моделирующей функции $\psi(X)$ – по 33-м экспериментальным точкам ($Nn = 33$). Поэтому точность определения последнего параметра в \sqrt{N} раз выше ($\sqrt{11} \approx 3,3$), чем первого. Вывод: математическая модель объекта позволяет делать прогноз точнее, чем породивший ее эксперимент.

На рисунке приведены графики, наглядно показывающие влияние отклонения срока посева озимой пшеницы от оптимального значения на недобор урожая.

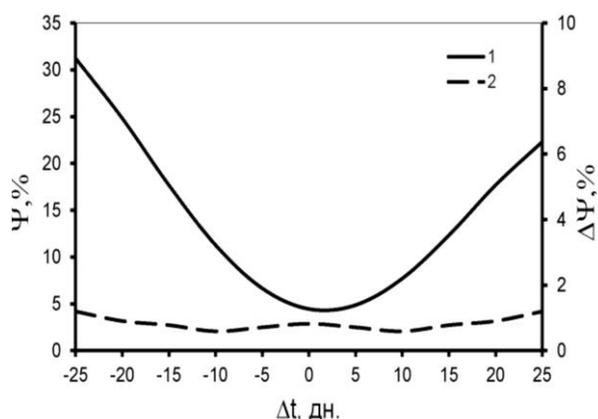


Рисунок. График зависимости недобора урожая озимой пшеницы $Y(\Delta t)$ (1) и абсолютной погрешности недобора урожая $\Delta Y(\Delta t)$ (2) при отклонении срока посева от оптимального значения Δt

Заключение

1. Разработан алгоритм стохастического моделирования технологических процессов растениеводства с помощью ортогональных многочленов. Ортогональная форма уравнений регрессии позволяет корректно определить минимальный порядок алгебраического полинома моделирующей функции, оценить вклад каждого фактора, а также рассчитать абсолютную ошибку при прогнозировании изучаемых объектов. Отличительная особенность стохастического моделирования в ортогональных многочленах от детерминированного моделирования заключается в том, что минимальный порядок ортогональных многочленов зависит от выбранного плана эксперимента, количества опытов и дублей в каждом опыте.

2. Разработанная стохастическая модель зависимости недобора урожая озимой пшеницы при отклонении срока посева от оптимального значения может быть использована в качестве уравнения функциональной связи при объединении подсистем в единую систему методом системного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасенко, В.П. Прикладной системный анализ / В.П. Тарасенко. – М.: КНОРУС, 2010. – 224 с.
2. Вержбицкий, В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2001. – 104 с.
3. Леонов, А.Н. Основы научных исследований и моделирования / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.
4. Forsythe, G.E. Generation and use of orthogonal polynomial for data fitting with a digital computer / J.Soc.Indust. Appl. Math. – 1957. – V.5. – P. 74-88.
5. Суетин, П.К. Классические ортогональные многочлены / П.К. Суетин – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2005 – 480 с.
6. Сухопаров, С.Ю. Вывод рекуррентного соотношения ортогональных многочленов из процесса ортогонализации Грамма-Шмидта, а также схема применения полученного рекуррентного соотношения

ния / С.Ю. Сухопаров // arxiv:submit/1109657 [cs.NA] 8 Nov, 2014.

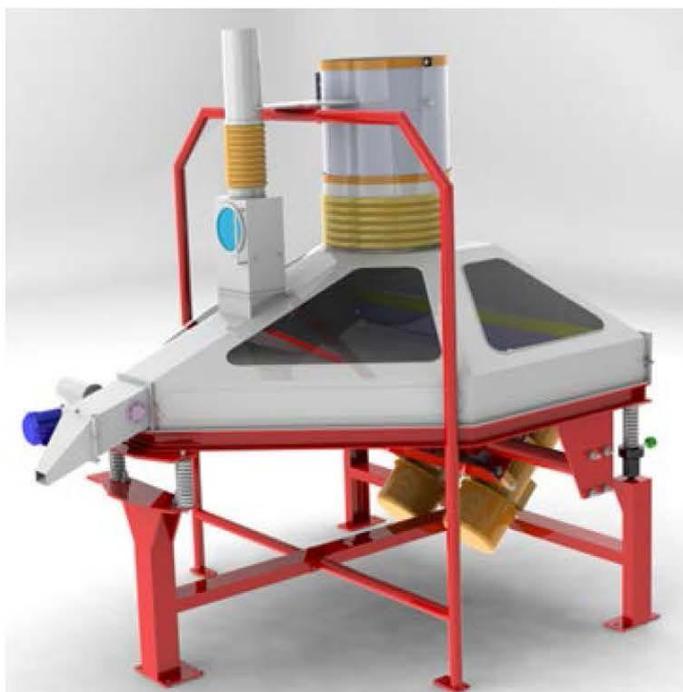
7. Леонов, А.Н. Моделирование зависимости фактической урожайности зерновых от сроков посева и уборки / А.Н. Леонов, Цинчжэнь Ли // Агропанорама. – 2018. – № 4. – С. 21-30.

8. Шило, И.Н. Ресурсосберегающие технологии сельскохозяйственного производства / И.Н. Шило, В.Н. Дашков. – Минск: БГАТУ, 2003. – С. 75-76.

9. Кадыров, М.А. О земледелии, селекции и рациональном хозяйствовании / М.А. Кадыров. – Минск: Несси, 2001. – 163 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.08.2023

Сепаратор вибропневматический



пластин, снижающих потери годного зерна с отходами.

Предназначен для очистки зерновой массы от трудноотделимых примесей на зерноперерабатывающих предприятиях, элеваторах, комбикормовых заводах. Также может быть использован для подготовки семенного материала с целью предотвращения заражения спорыньей зерна будущего урожая на семенных станциях и в фермерских хозяйствах.

Применение в технологических линиях очистки зерна разработанного сепаратора позволит повысить эффективность очистки зерна от трудноотделимых примесей за счет системы периодического вывода фракции примесей, а также комплекта отражающих и отбойных

Основные технические данные

Производительность, т/ч до	6
Коэффициент очистки, % до	95
Площадь ситовой поверхности, м ²	3,16
Диапазон регулировки угла наклона деки, град	2-8
Амплитуда колебаний, мм	2,5-3
Расход воздуха, м ³ /ч	10000
Установленная мощность привода, кВт	2×0,18
Диапазон регулировки частоты вращения электровибраторов, мин ⁻¹	800-1650
Разрежение в рабочей камере, Па	500-700
Габаритные размеры, мм (д ш в)	2240 2100 1960
Масса сепаратора, кг, не более	510

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОТОЧНЫХ МНОГОЗОННЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ-ДАТЧИКОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОДАХ

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

И.Г. Рутковский,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

При электродном нагреве на электродах нагревателя неизбежны отложения, которые могут вызвать нарушение режима тепловой обработки и ухудшить качество обрабатываемой среды. Использование многозонных электродных электронагревателей-датчиков позволяет контролировать процесс образования отложений на электродах во времени и проводить своевременное отключение электродных электронагревателей для очистки электродов от отложений. В статье проведено математическое моделирование работы многозонного электродного электронагревателя-датчика в процессе увеличения количества отложений на электродах и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: электродный электронагреватель-датчик, отложения обрабатываемой среды, математическая модель, алгоритм расчета, численное решение, информационный сигнал.

During electrode heating the heater electrodes are inevitably exposed to deposits, which can cause heat treatment disturbance and deteriorate the quality of the medium being treated. The use of multi-zone electrode electric heater-sensors allows to control the process of deposit accumulation on electrodes in time and to carry out timely disconnection of electrode electric heaters for the purpose of cleaning of the electrodes from deposits. The article contains mathematical modeling of the multi-zone electrode electric heater-sensor operation in the process of increasing the amount of electrode deposits and comparing the results of modeling with the experimental data.

Key words: electrode electric heater-sensor, deposits of the medium being treated, mathematical model, calculation algorithm, numerical solution, information signal.

Введение

При электродном нагреве негативное влияние на термообработку сельскохозяйственных термолабильных сред оказывают отложения на электродах. В работах Маслова А.М., Васильевой Л.В., Карницкого Н.Б. и других приводится информация о том, что при обработке молочных продуктов, фруктовых и овощных соков, кормов и пищевых отходов отложения на электродах неизбежны [1-8]. Маслов А.М. и Зимняков А.М. отмечают, что по влиянию на электротепловую обработку их можно разделить на две группы [1; 5]:

1) мягкий, пушистый налет из денатурированного белка, который образуется при небольшом перегреве и легко удаляется;

2) пригар, похожий на камень, который состоит из денатурированного белка, волокон клетчатки, ссепментированных солями, образуется при сильном перегреве и плохо удаляется.

Утверждение о том, что распределение образующихся отложений практически не поддается теоретическому моделированию, приводится в работах Маслова А.М. и Балабан-Ирменин Ю.В. [1; 7]. По-

этому исследования должны проводиться экспериментально, на реальной установке, для конкретных режимов работы, так как при разработке электродного электронагревателя-датчика (ЭЭН-Д) невозможно учесть все факторы, которые влияют на образование отложений на электродах, поскольку некоторые факторы определяются технологическими требованиями, а другие зависят от свойств продукта.

Целью данной работы является исследование работы многозонного ЭЭН-Д при отложениях обрабатываемой среды на электродах, а также обоснование возможности контроля процесса образования отложений во времени для своевременной очистки электродов.

Основная часть

Для исследования работы проточного многозонного ЭЭН-Д при образовании отложений на электродах была разработана его экспериментальная установка [9]. Поскольку распределение толщины отложений по длине электродов зависит от различных факторов и, как правило, возрастает с увеличением температуры к выходу из ЭЭН-Д, то для определения

температурной зависимости удельного сопротивления (проводимости) отложений на электродах и распределения их толщины по длине выделялись отдельные участки электродов для проведения измерений. Для этого каждый из электродов ЭЭН-Д был разделен на четыре одинаковых участка. Электроды изготовленного ЭЭН-Д имели следующие размеры: $H=0,006$ м; $\Pi=0,04$ м; $L_1=L_2=L_3=L_4=0,04$ м; $L_5=L_6=L_7=L_8=0,0315$ м; $L_9=L_{10}=L_{11}=L_{12}=0,03$ м (рис. 1).

При экспериментальных исследованиях в ЭЭН-Д использовалась водопроводная вода с электрической проводимостью $\gamma_{0\text{ос}} = 0,02149$ Ом·м и температурным коэффициентом проводимости $\alpha_{\Pi\text{ос}} = 0,0274$ 1/°С, теплоемкостью $C_p = 4174$ кДж/(кг·°С) и плотностью $\rho_c = 1000$ кг/м³. Для температуры обрабатываемой среды (воды) на входе в ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вх}} = 20$ °С, при массовом расходе обрабатываемой среды $G = 0,003$ кг/с температура на выходе поддерживалась $\theta_{c\text{вых}} = 70$ °С путем регулирования напряжения питания. При работе ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах напряжение питания составило: $U = 220$ В. Измерительный мост образован термoneзависимыми сопротивлениями Rm_1 , Rm_2 и термозависимыми сопротивлениями участков ЭЭН-Д, которые вычислялись как сумма сопротивлений зон нагрева – Rm_3 и Rm_4 . При этом с точки соединения термoneзависимых сопротивлений Rm_1 и Rm_2 и второго (по ходу движения обрабатываемой среды) промежуточного электрода снимался информационный сигнал ΔU (ИС). Измерительный мост балансировался при отсутствии отложений на электродах и температуре обрабатываемой среды (воды) на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}} = 70$ °С. Суммарное значение дополнительных сопротивлений Rm_1 и Rm_2 составляло 6700 Ом. К измерительной диагонали моста подключался электроизмерительный прибор с внутренним сопротивлением 10000 Ом.

В ходе эксперимента на электродах ЭЭН-Д образовывались отложения, что привело к изменению сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы ΔU . Для поддержания заданной температуры на выходе из ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ регулировалось напряжение питания U .

При проведении экспериментальных исследований проводился визуальный контроль образования отложений через прозрачные боковые стенки ЭЭН-Д из оргстекла. Периодически проводилась разборка нагревателя и измерение расстояния между образовавшимися отложениями, а также толщины отложений. По величине напряжения и тока определялось общее сопротивление обрабатываемой среды и отложений на участках электродов ЭЭН-Д. С учетом измеренного расстояния между образующимися отложениями определялось сопротивление обрабатываемой среды.

Анализ экспериментальных данных напряжений на зонах нагрева и токов на участках электродов ЭЭН-Д показал, что электрическая проводимость $\gamma_{0\text{ос}}$ и температурный коэффициент проводимости $\alpha_{\Pi\text{ос}}$ отложений на электродах, как по длине нагревателя, так и по времени его работы, существенно не меняются ($\gamma_{0\text{ос}} = 0,02386$ Ом·м, $\alpha_{\Pi\text{ос}} = 0,01069$ 1/°С). Это значит, что при данном режиме нагрева в исследуемом диапазоне образования отложений структура кальциево-магниевого отложений также существенно не меняется.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что количество отложений на электродах увеличивается к выходу из электронагревателя. Через 300 часов работы ЭЭН-Д толщина отложений на выходе электронагревателя достигала 0,98 мм. В результате математической обработки экспериментальных данных получено выражение изменения распределения толщины отложений $H_{r\text{ос}}$ по длине ЭЭН-Д в зависимости от времени его работы:

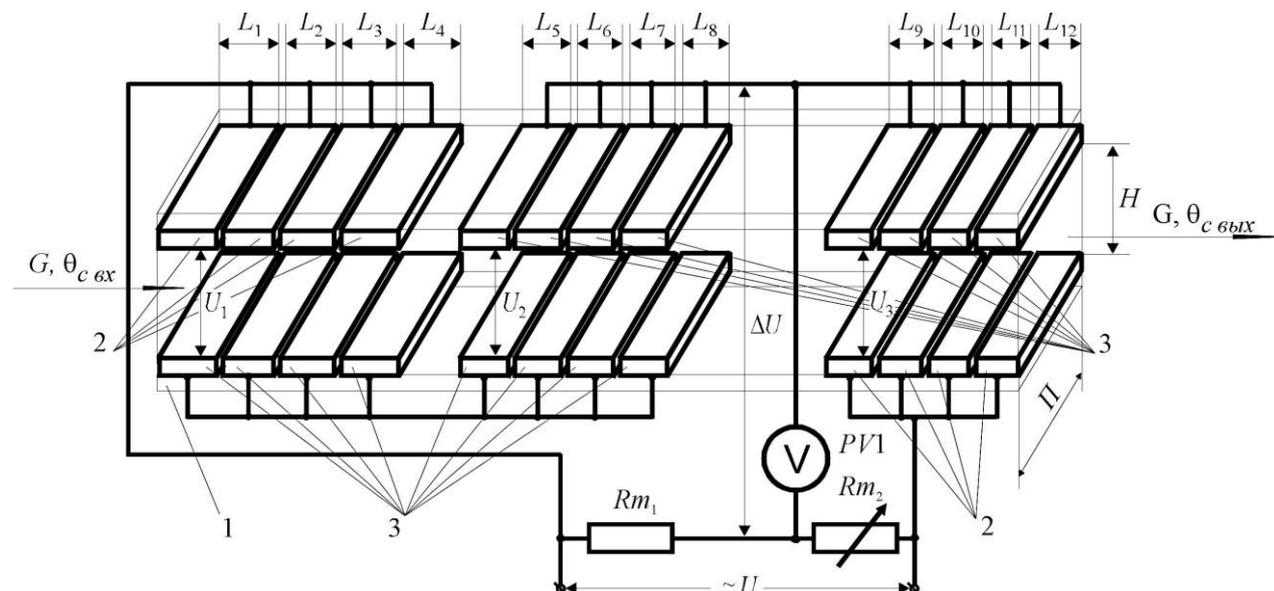


Рис. 1. Экспериментальная установка проточного многозонного ЭЭН-Д для исследования электротепловой обработки при образовании отложений на электродах: 1 – корпус; 2 – основные токоподводящие электроды; 3 – промежуточные электроды; Rm_1 , Rm_2 – термoneзависимые сопротивления измерительного моста; PV1 – вольтметр

$$H_{r oc} = -1,31302 \cdot 10^{-4} \cdot x - 4,12754 \cdot 10^{-9} \cdot T_s + 1,25701 \cdot 10^{-10} \cdot T_s^2 + 7,58279 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot T_s, \quad (1)$$

где x – переменная по длине ЭЭН-Д, м;
 T_s – время наработки ЭЭН-Д, ч.

При небольшой разнице температур обрабатываемой среды θ_c и отложений обрабатываемой среды θ_{oc} влияние величины отложений на температуру нагрева обрабатываемой среды j -й секции электронагревателя осуществляется преимущественно за счет снижения величины напряжения $U_{c j}$. Влияние теплотерь на температуру обрабатываемой среды θ_c можно учесть в величине КПД. С учетом приведенных допущений, процесс нагрева среды во времени, с наличием отложений на электродах на элементарном участке δx в ЭЭН-Д описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} C_p \cdot \rho_c \cdot H_{c j} \cdot P \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \\ = \frac{U_{c j}^2 \cdot P \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c j}) \cdot H_{c j}}; \\ C_{p oc} \cdot M_{oc j} \cdot \frac{\partial \theta_{oc}}{\partial \tau} = \frac{U_{oc j}^2 \cdot P \cdot h}{\rho_{t oc}(\theta_{oc j}) \cdot H_{oc j}} - \\ - k_o \cdot F_s \cdot (\theta_{oc j} - \theta_{c j}), \end{cases} \quad (2)$$

где C_p – удельная теплоемкость обрабатываемой среды, Дж/(кг·°C);

ρ_c – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

$H_{c j}$ – межэлектродное расстояние на j -й секции ЭЭН-Д, м;

j – номер секции с начала ЭЭН-Д;

P – ширина электродов ЭЭН-Д, м;

θ_c – текущая температура обрабатываемой среды, °C;

τ – текущее время нагрева, с;

G – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;

$U_{c j}$ – напряжение в межэлектродном пространстве, свободном от отложений, на j -й секции ЭЭН-Д, В;

η – коэффициент полезного действия, о.е.;

ρ_t – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м;

$C_{p oc}$ – удельная теплоемкость отложений на электродах ЭЭН-Д, Дж/(кг·°C);

$M_{oc j}$ – масса отложений на j -й секции ЭЭН-Д, кг;

θ_{oc} – текущая температура отложений на электродах, °C;

$U_{oc j}$ – напряжение на отложениях двух электродов j -й секции ЭЭН-Д, В;

h – длина j -й секции ЭЭН-Д (равна длине элементарного участка δx), м;

$\rho_{t oc}$ – удельное сопротивление отложений на электродах, Ом·м;

$H_{oc j}$ – толщина отложений в межэлектродном пространстве на двух электродах j -й секции ЭЭН-Д ($H_{oc j} = 2 \cdot H_{r oc j}$), м;

k_o – коэффициент теплоотдачи от отложений в обрабатываемую среду, Вт/(м²·°C);

F_s – площадь поверхности теплоотдачи отложений j -й секции электронагревателя в обрабатываемую среду, м².

Во втором уравнении системы (2), описывающем тепловыделения в отложениях, выразим массу отложений на j -й секции нагрева через их плотность ($M_{oc j} = \rho_{oc} \cdot P \cdot h \cdot H_{oc j}$);

где ρ_{oc} – плотность отложений на электродах ЭЭН-Д, полученных при нагреве водопроводной воды, кг/м³).

Площадь теплоотдачи F с поверхности отложений на электродах ЭЭН-Д в обрабатываемую среду межэлектродного пространства выразим через конструктивные размеры электродной системы ($F = 2 \cdot P \cdot h$). Тогда уравнение системы (2), описывающее тепловыделения в отложениях, запишется следующим образом:

$$C_{p oc} \cdot \rho_{oc} \cdot P \cdot H_{oc j} \cdot \frac{\partial \theta_{oc}}{\partial \tau} = \frac{U_{oc j}^2 \cdot P}{\rho_{t oc}(\theta_{oc j}) \cdot H_{oc j}} - 2 \cdot k_o \cdot P \cdot (\theta_{oc j} - \theta_{c j}). \quad (3)$$

В уравнении (3) зависимость удельного сопротивления отложений от температуры запишем через их проводимость и ТКП ($\rho_{t oc}(\theta_{oc j}) = 1/(\gamma_{0 oc} \cdot (1 + \alpha_{П oc}(\theta_{oc j})))$). Для установившегося режима нагрева, при $\partial \theta_{oc} / \partial \tau = 0$, уравнение (3) примет вид:

$$U_{oc j}^2 \cdot \frac{P}{H_{oc j}} \cdot \gamma_{0 oc} \cdot (1 + \alpha_{П oc}(\theta_{oc j})) - 2 \cdot k_o \cdot P \cdot (\theta_{oc j} - \theta_{c j}) = 0. \quad (4)$$

Раскрыв скобки и выполнив арифметические преобразования, из уравнения (4) выразим температуру отложений θ_{oc} :

$$\theta_{oc j} = \left(\frac{U_{oc j}^2 \cdot \gamma_{0 oc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{oc j}} + \theta_{c j} \right) / \left(1 - \frac{U_{oc j}^2 \cdot \gamma_{0 oc} \cdot \alpha_{П oc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{oc j}} \right). \quad (5)$$

Далее запишем систему уравнений, позволяющую найти совместное решение первого уравнения системы (2) и уравнения (5) для определения распределения температуры в обрабатываемой среде θ_c и в отложениях обрабатываемой среды на электродах θ_{oc} :

$$\left\{ \begin{aligned} & C_p \cdot \rho_c \cdot H_{c_j} \cdot \Pi \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \\ & = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}) \cdot H_{c_j}}; \\ & \theta_{ocj} = \left(\frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} + \theta_{c_j} \right) / \\ & / \left(1 - \frac{U_{ocj}^2 \cdot \gamma_{0oc} \cdot \alpha_{П OC}}{2 \cdot k_o \cdot H_{ocj}} \right); \\ & U_{Zk} = \sum_{k=1}^N I \cdot R_{Zk}; \\ & I = U / R; \\ & R = \sum_{k=1}^N R_{Zk}; \\ & H_{rocj} = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot T_S + \\ & + A_4 \cdot T_S^2 + A_5 \cdot x \cdot T_S; \\ & H_{ocj} = 2 \cdot H_{rocj}; \\ & R_{ocj} = H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) / (h \cdot \Pi); \\ & R_{c_j} = H_{c_j} \cdot \rho_t(\theta_{c_j}) / (h \cdot \Pi); \\ & U_{ocj} = U_{Zk} \cdot R_{ocj} \cdot / (R_{c_j} + R_{ocj}); \\ & U_{c_j} = U_{Zk} \cdot R_{c_j} \cdot / (R_{c_j} + R_{ocj}); \\ & R_{Zk} = \int_0^{L_k} \frac{H_{ocj} \cdot \rho_t(\theta_{ocj}) + H_{c_j} \cdot \rho_t(\theta_{c_j})}{h \cdot \Pi} dx, \quad (6) \end{aligned} \right.$$

где U_{Zk} – значение напряжения k -й зоны ЭЭН-Д, В;
 I – значение тока ЭЭН-Д, А;
 R_{Zk} – значение сопротивления k -й зоны ЭЭН-Д, Ом;
 R – значение суммарного сопротивления ЭЭН-Д, Ом;
 R_{ocj} – значение сопротивления отложений на
обоих электродах j -й секции ЭЭН-Д, Ом;

R_{c_j} – значение сопротивления обрабатываемой
среды между электродами на j -й секции ЭЭН-Д, Ом.

Для решения первого уравнения системы (6) за-
пишем его в следующем конечно-разностном виде
согласно [10]:

$$\begin{aligned} & C_p \cdot \rho_c \cdot H_{c_j} \cdot \Pi \cdot \frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_j}^n}{\tau} + C_p \times \\ & \times G \cdot \frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_{j-1}}^{n+1}}{h} = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \Pi \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}^n) \cdot H_{c_j}}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $\theta_{c_j}^{n+1}$ – температуры обрабатываемой среды (во-
ды) на j -й секции, $n+1$ – м расчетном (текущем) шаге, °С;

$\theta_{c_j}^n$ – температуры обрабатываемой среды (воды)
на j -й секции n – м расчетном (предыдущем) шаге, °С;

$\theta_{c_{j-1}}^{n+1}$ – температуры обрабатываемой среды (во-
ды) на $j-1$ -й секции, $n+1$ – м расчетном (текущем)
шаге, °С.

Далее, с учетом скорости обрабатываемой среды
в межэлектродном пространстве на j -й секции ЭЭН-Д
($v_{c_j} = G / (p_c \cdot H_{c_j} \cdot \Pi)$) преобразуем уравнение (7) к сле-
дующему виду:

$$\frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_j}^n}{\tau} + v_{c_j} \cdot \frac{\theta_{c_j}^{n+1} - \theta_{c_{j-1}}^{n+1}}{h} = F_{c_j}^n, \quad (8)$$

$$\text{где } F_{c_j}^n = \frac{U_{c_j}^2 \cdot \eta}{\rho_t(\theta_{c_j}^n) \cdot H_{c_j}^2 \cdot C_p \cdot \rho_c}. \quad (9)$$

После математических преобразований из урав-
нения (8) получим следующее разностное уравнение:

$$\theta_{c_j}^{n+1} = \frac{\tau \cdot h \cdot F_{c_j}^n + h \cdot \theta_{c_j}^n + \tau \cdot v_{c_j} \cdot \theta_{c_{j-1}}^{n+1}}{h + \tau \cdot v_{c_j}}. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) используем итера-
ционный метод. Итерационный процесс прекращает-
ся при выполнении условия:

$$\max_j \left(\frac{|\theta_{c_j}^{m+1} - \theta_{c_j}^m|}{\theta_{c_j}^m} \right) \leq \varepsilon_\theta, \quad (11)$$

где $j = 1..K_{ZN}$; K_{ZN} – номер последней секции N -й

зоны ЭЭН-Д $\left(K_{ZN} = \sum_{k=1}^N L_k / h \right)$;

ε_θ – погрешность вычислений температуры обра-
батываемой среды (воды).

Расчет напряжения разбаланса мостовой измери-
тельной схемы ΔU проводится по формуле [11]:

$$\begin{aligned} \Delta U = & U \cdot R_{pr} \cdot \left((Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1) \times \right. \\ & \times (Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \times \\ & \left. \times Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R) \right)^{-1}, \quad (12) \end{aligned}$$

где R_{pr} – сопротивление измерительного прибора, Ом;

Rm_1, Rm_2 – термнезависимые сопротивления мостовой измерительной схемы, Ом;

Rm_3, Rm_4 – термозависимые сопротивления участков ЭЭН-Д, которые входят в мостовую измерительную схему и вычисляются как сумма сопротивлений зон нагрева, Ом;

$Rm_{12} = Rm_1 + Rm_2$ – сумма термнезависимых сопротивлений мостовой измерительной схемы, Ом.

Для определения времени наработки ЭЭН-Д с момента включения без отложений на электродах до времени остановки для очистки электродов от отложений обрабатываемой среды T_S первоначально моделируем работу ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах. При этом измерительный мост балансируется при установившейся температуре на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$. При увеличении времени наработки ЭЭН-Д T_S происходит увеличение количества отложений на электродах H_{roc} . Поддержание величины температуры на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ на уровне θ_{ZAD} проводится путем увеличения напряжения питания U_N методом Ньютона.

Для расчета функции корректировки напряжения питания ЭЭН-Д $F(U_N)$ рассчитывается разность между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ и требуемой θ_{ZAD} (заданной по требованиям технологического процесса). При этом разность между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ и требуемой θ_{ZAD} должна стремиться к нулю.

$$\theta_{c\text{вых}} - \theta_{ZAD} = F(U_N) \rightarrow 0. \quad (13)$$

При проведении корректировки температуры на выходе ЭЭН-Д новое $(n+1)$ -е приближение напряжения питания ЭЭН-Д U_{N+1} определяется по формуле:

$$U_{N+1} = U_N - F(U_N) / F'(U_N), \quad (14)$$

где производную $F'(U_N)$ определяем численно, используя достаточно малое приращение напряжения питания ЭЭН-Д ε_U , по формуле

$$F'(U_N) = (F(U_N + \varepsilon_U) - F(U_N)) / \varepsilon_U. \quad (15)$$

Реализация алгоритма с определением времени наработки ЭЭН-Д T_S до очистки электродов от отложений обрабатываемой среды приведена на рис. 2.

В разработанной математической модели и в блок-схеме алгоритма (рис. 2) приняты следующие обозначения: K_{zk} – номер последней секции k -й зоны

$$\text{ЭЭН-Д} \left(K_{zk} = \sum_{kp=1}^k L_{kp} / h \right),$$

где kp – номер зоны ЭЭН-Д, от начала до k -й расчетной;

$N_{zk} = K_{zk-1} + 1, (k=2..N)$ – номер первой секции k -й зоны ЭЭН-Д (для 1-й зоны $K_{z1}=1$);

ΔT_S – шаг моделирования суммарного времени наработки ЭЭН-Д, ч;

ε_N – погрешность вычислений разности между фактической температурой на выходе ЭЭН-Д $\theta_{c\text{вых}}$ и требуемой θ_{ZAD} (заданной по требованиям технологического процесса);

ΔU_{ZAD} – напряжение разбаланса мостовой измерительной схемы при достижении толщины отложений на электродах определенной величины, после которой необходимо отключить ЭЭН-Д для очистки электродов;

$\theta_{pcj}, \theta_{rocj}$ – температуры обрабатываемой среды (воды) и отложений обрабатываемой среды на j -й секции, n – m расчетном (предыдущем) шаге, °С.

В блоке 8 блок-схемы алгоритма (рис. 2) проводится расчет электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах, а в блоках 13 и 17 – с отложениями обрабатываемой среды на электродах. Реализация этих расчетов показана на рисунке 3. При этом для проведения расчета электротепловых процессов в ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах, в блоке 6 блок-схемы алгоритма (рис. 3) расчет сопротивлений обрабатываемой среды R_{cj} , напряжений на секциях U_{cj} (равных напряжению на соответствующей зоне нагрева $U_{cj} = U_{zk}$) и температур в межэлектродном пространстве θ_{cj} проводится по блок-схеме алгоритма (рис. 4а), а с отложениями – расчет сопротивлений R_{cj} и R_{rocj} , напряжений U_{cj} и U_{rocj} и температур θ_{cj} и θ_{rocj} в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -й секции ЭЭН-Д проводится по блок-схеме алгоритма (рис. 4б).

В разработанной математической модели и в блок-схеме алгоритма (рис. 3) приняты следующие обозначения:

$\theta_{cj}, \theta_{rocj}$ – температуры обрабатываемой среды (воды) и отложений обрабатываемой среды на j -й секции, $n+1$ -м расчетном (текущем) шаге, °С;

FPR – переменная, определяющая окончание итерационного расчета температуры обрабатываемой среды при достижении требуемой точности ε_θ ;

PR – переменная точности расчета на каждой секции ЭЭН-Д;

$\theta_{c\text{KZ}/Nj}$ – температура на последней расчетной секции N -й зоны ЭЭН-Д, °С.

При этом сопротивления зон ЭЭН-Д (рис. 3, блок 1) определяются сопротивлением параллельно соединенных секций R_{cj} и рассчитываются по формуле:

$$R_{zk} = \int_0^{L_k} \frac{\rho_t(\theta_{cj}) \cdot H_{cj}}{h \cdot \Pi} dx. \quad (16)$$

При работе ЭЭН-Д с отложениями обрабатываемой среды на электродах в блоке 1 блок-схемы алгоритма (рис. 3) проводится расчет сопротивлений зон нагрева R_{zk} , тока нагревателя I и напряжений зон U_{zk} по формулам (12), (3), (4) и системы (6). В блоке 14 блок-схемы алгоритма (рис. 3) приводится расчет напряжения разбаланса мостовой измерительной схемы ΔU по формуле (12). В блоках 8 и 9 блок-схемы алгоритма (рис. 4б) приводится расчет температур θ_c и θ_{oc} и по выражениям (10) и (5).

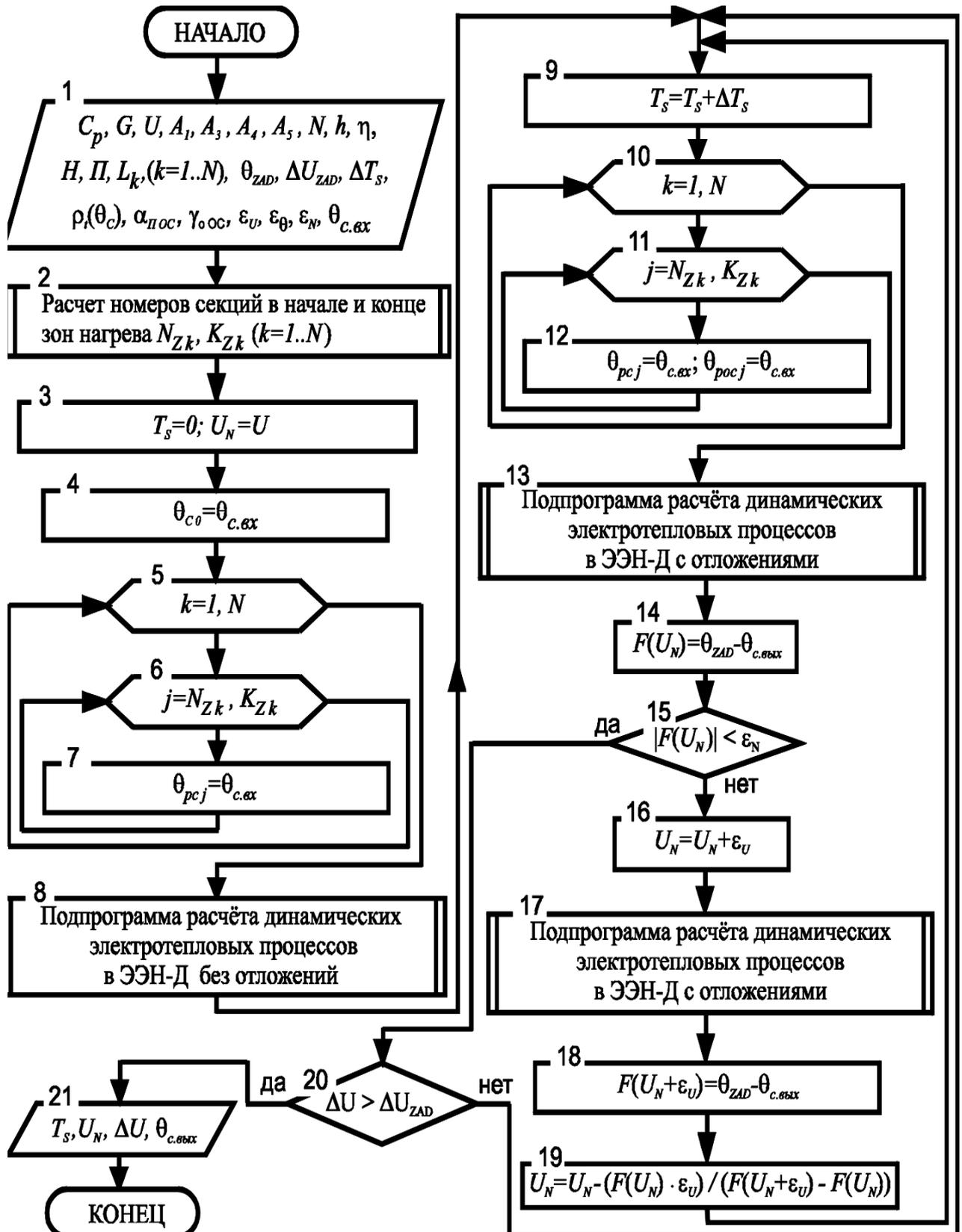


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма расчета времени наработки T_s до отключения ЭЭН-Д для очистки электродов от отложений

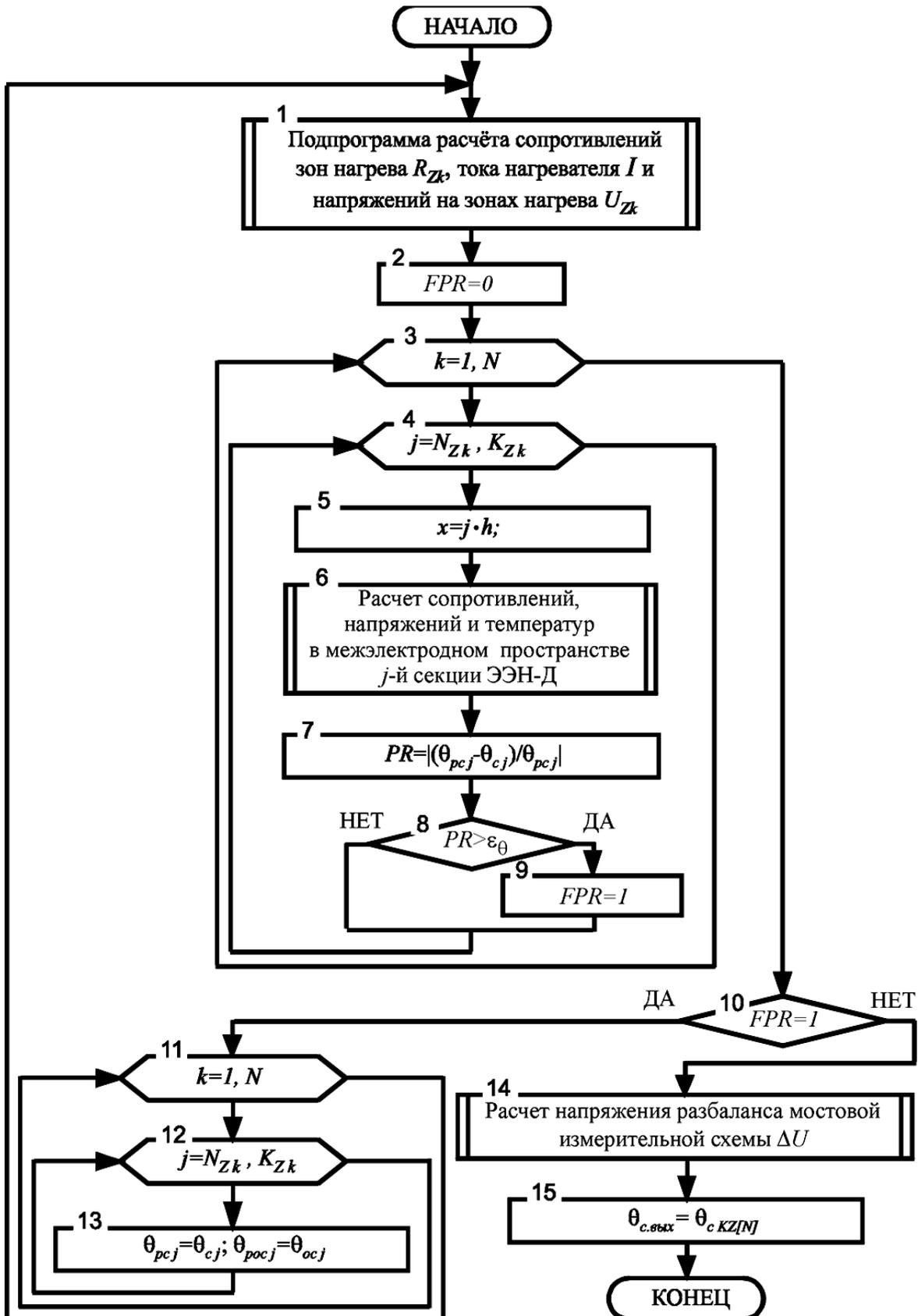


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма расчета температуры $\theta_{c.вых}$ на выходе ЭЭН-Д при его работе с отложениями обрабатываемой среды на электродах

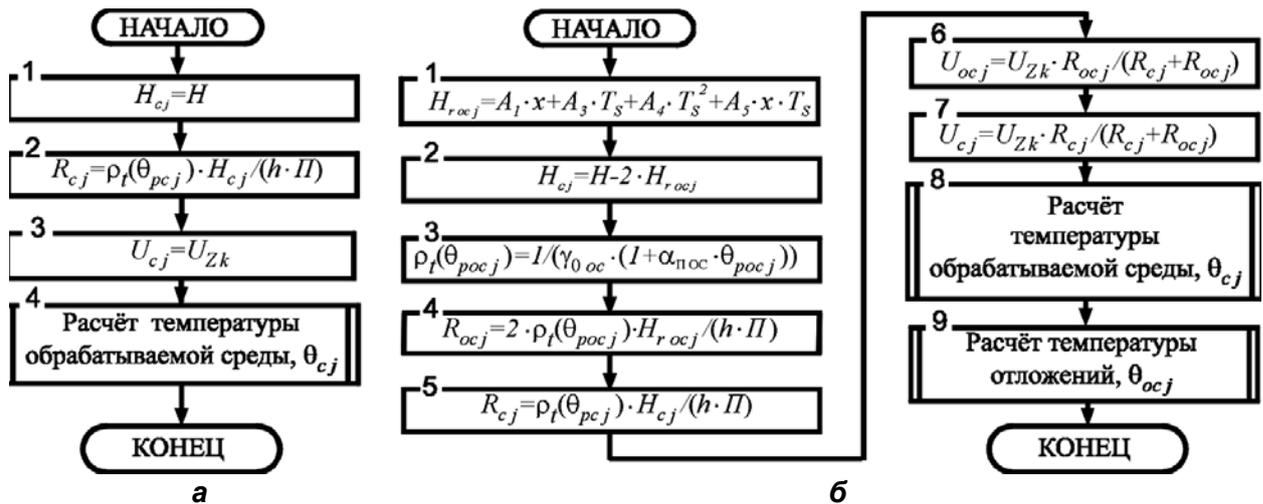


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма подпрограммы расчета сопротивлений R_{c_j} , напряжений U_{c_j} и температур θ_{c_j} в обрабатываемой среде j -й секции ЭЭН-Д: при работе ЭЭН-Д без отложений обрабатываемой среды на электродах (а) и сопротивлений R_{c_j} и R_{ocj} , напряжений U_{c_j} и U_{ocj} и температур θ_{c_j} и θ_{ocj} в обрабатываемой среде и отложениях на электродах j -й секции ЭЭН-Д, при работе ЭЭН-Д с отложениями обрабатываемой среды на электродах (б)

Графики экспериментальных и расчетных значений ИС во времени $\Delta U = f(\tau)$, при образовании отложений обрабатываемой среды на электродах, в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д, характеризуемого следующими параметрами: $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,14$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,12$ м; $\gamma_{0c} = 0,02149$ Ом·м; $\alpha_{noc} = 0,0274$ 1/°C; $\gamma_{0oc} = 0,02386$ Ом·м; $\theta_{c_{вых}} = 70$ °C; $\alpha_{noc} = 0,01069$ 10/°C; $G = 0,003$ кг/с; ; $\theta_{c_{ex}} = 20$ °C; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $\rho_c = 1000$ кг/м³; $\eta = 0,95$ приведены на рис. 5.

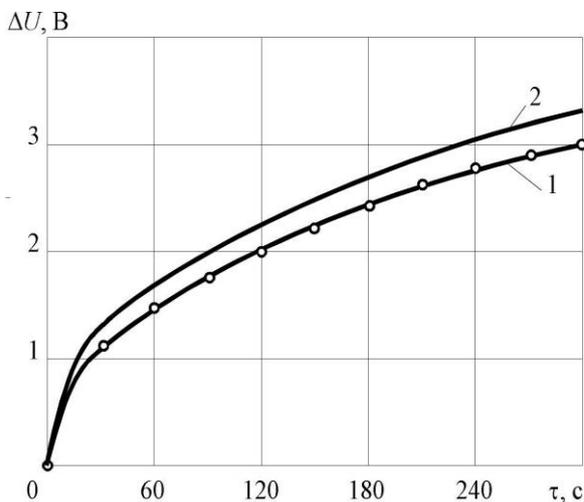


Рисунок 5. Экспериментальный (1) и расчетный (2) графики изменения ИС $\Delta U = f(\tau)$ (ΔU_s и ΔU_p) в измерительной диагонали моста во времени, при $H = 0,006$ м; $\Pi = 0,04$ м; $L_1 = 0,14$ м; $L_2 = 0,126$ м; $L_3 = 0,12$ м; $\gamma_{0c} = 0,02149$ Ом·м; $\alpha_{noc} = 0,0274$ 1/°C; $\gamma_{0oc} = 0,02386$ Ом·м; $\alpha_{noc} = 0,01069$ 1/°C; $\rho_c = 1000$ кг/м³; $C_p = 4174$ кДж/(кг·°C); $G = 0,003$ кг/с; $\theta_{c_{ex}} = 20$ °C; $U = 220$ В; $\eta = 0,95$; $R_{m1} + R_{m2} = 6700$ Ом; $R_{pr} = 10000$ Ом

Таким образом, контролируя сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы, можно определять количество отложений на электродах. При относительно небольшом количестве отложений, их влияние на уменьшение мощности ЭЭН-Д можно компенсировать путем изменения напряжения питания ЭЭН-Д. Корректировка напряжения питания проводится по температуре на выходе из последней зоны нагрева (на последней секции) ЭЭН-Д таким образом, чтобы питающее напряжение обеспечивало необходимую мощность нагрева и температуру на выходе ЭЭН-Д. Очистку электродов ЭЭН-Д от отложений обрабатываемой среды необходимо проводить в то время, когда толщина отложений на электродах достигнет определенной величины, не влияющей на качество обрабатываемой среды и не нарушающей режим обработки.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что предложенная математическая модель с достаточной точностью (расчетная погрешность по сигналу $\Delta U = f(\tau)$ в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д – 12,76%) описывает электротепловые процессы, происходящие в ЭЭН-Д во времени, при образовании отложений обрабатываемой среды на электродах. Некоторое расхождение экспериментальных и расчетных значений объясняется погрешностью измерения толщины отложений обрабатываемой среды на электродах, изменением коэффициента теплоотдачи, а также парообразованием при повышении температуры воды. Результаты моделирования показывают возможность работы ЭЭН-Д с соблюдением технологических требований к режиму электротепловой обработки, при наличии допустимого количества отложений обрабатываемой среды на электродах, а также возможность контроля процесса образования отложений обрабатываемой среды и своевременного отклю-

чения электронагревательной установки (ЭНУ) с ЭЭН-Д для очистки электродов от отложений обрабатываемой среды. При этом величина напряжения разбаланса моста ЭЭН-Д в 3,0 В позволяет использовать более простые системы контроля и регулирования, что снижает их стоимость и повышает информативность системы управления и надежность работы ЭНУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов, А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей / А.М. Маслов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1980. – 208 с.

2. Васильева, Л.В. Формирование элементного и фазового состава отложений в теплоэнергетическом оборудовании в условиях различных схем водоподготовки и способы их удаления: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 03.02.08 / Л.В. Васильева. – Краснодар, 2017. – 24 с.

3. Карницкий, Н.Б. Теплофизические свойства и структура отложений на поверхностях нагрева энергетического оборудования / Н.Б. Карницкий, А.В. Нерезько, В.А. Чиж // Известия ВУЗов и энергетических объединений стран СНГ. Энергетика: международ. науч.-технич. и производственный журнал. – 2007. – № 1. – С. 55-60.

4. Sohail, M.A. Concentration control of silica in water chemical regime for natural circulation high pressure drum boiler unit of thermal power station / M.A. Sohail, A.I. Mustafa // Indian Journal of Chemical Technology. – 2007. – № 14. – P. 195-199.

5. Зимняков, А.М. Анализ химических отложений теплового оборудования и способы их очистки / А.М. Зимняков, Р.В. Наумов // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. – 2010. – Т. 21. – № 17. – С. 104-108.

6. Experimental investigation of CaSO₄ crystallization on a flat plate / M.G. Mwaba [et al.] // Heat Transfer Eng. – 2006. – V. 27. – № 3. – P. 42-54.

7. Балабан-Ирменин, Ю.В. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения (обзор) / Ю.В. Балабан-Ирменин [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – Т. 30. – № 3. – С. 10-16.

8. Bahadori, A. Prediction of silica carry-over and solubility in steam of boilers using simple correlation / A. Bahadori, H.B. Vuthaluru // Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30. – P. 250-253.

9. Прищепов, М.А. Моделирование образования отложений на электродах проточных многозонных электродных электронагревателей / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-технич. конференции / Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – Минск, 2022. – С. 228-231.

10. Турчак, Л.И. Основы численных методов / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.

11. Прищепов, М.А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства / М.А. Прищепов. – Минск: БАТУ, 1999. – 295 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 09.10.2023

Система микропроцессорного автоматизированного регулирования положения распределительной штанги относительно обрабатываемой поверхности

Предназначена для повышения равномерности внесения рабочего раствора пестицидов штанговыми опрыскивателями, снижения времени на подготовку агрегата к работе и его регулировки в процессе работы.

Система обеспечивает соблюдение постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью в процессе работы опрыскивателя, как на склонах, так и на равнинной местности.



Основные технические данные

Тип механизма изменения угла наклона штанги	Гидравлический
Тип системы	Микропроцессорная
Тип датчиков	Ультразвуковые
Диапазон измерения, м	0,4 – 2,0
Погрешность измерения расстояния между штангой и обрабатываемым объектом, м	0,040
Время готовности системы к работе, мин.	до 1
Напряжение питающей сети, В	=12 ± 2,5
Продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, с	2
Масса, кг, не более	40

УДК 621.313

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-159-5-32-37>

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК «ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК С ЗИГЗАГОМ» ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ

В.М. Збродыга,

доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

М.А. Прищепов,

зав. каф. электроснабжения сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

А.И. Зеленкевич,

и.о. зав. каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук

И.В. Протосовицкий,

декан агроэнергетического факультета БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Н.Е. Шевчик,

зам. директора РНПУП «Институт энергетики НАН Беларуси», канд. техн. наук, доцент

В статье рассмотрены особенности работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» при нелинейном характере нагрузки, в том числе принцип компенсации высших гармоник, кратных трем.

Ключевые слова: трансформатор, высшие гармоники токов и напряжений, магнитодвижущая сила, магнитный поток.

Specific features of transformer operation with the winding connection scheme "star-delta with zigzag" at nonlinear character of load, including the principle of compensation of ultra-harmonics multiple of three, are considered in the article.

Key words: transformer, ultra-harmonics of current and voltage, magnetomotive force, magnetic flux.

Введение

В системах электроснабжения, наряду с их основной функцией, имеет место генерирование, распространение и воздействие высших гармоник токов и напряжений на электроприемники. Высшие гармоники снижают эффективность процессов генерации, передачи и использования электроэнергии. Уменьшение уровней высших гармоник можно обеспечить рациональным построением схемы электрической сети и применением специальных корректирующих устройств: линейных дросселей, пассивных и активных фильтров высших гармоник, питающих трансформаторов со специальными схемами соединения обмоток. В сельских электроустановках для этой цели авторы рассматривают возможность использования трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» (рис. 1), которые могут применяться для питания выпрямительных схем, полупро-

водниковых преобразователей и других специальных потребителей [1-10].

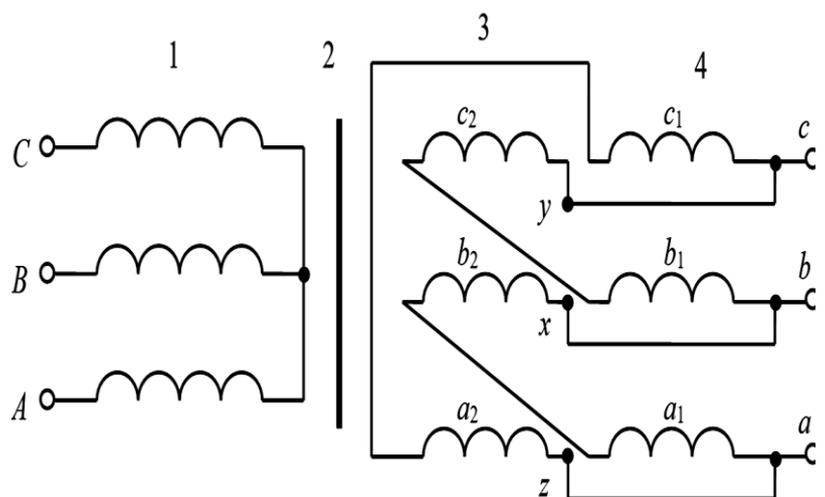


Рисунок 1. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом»: 1 – обмотки высшего напряжения; 2 – магнитопровод; 3-4 – половины фазных обмоток низшего напряжения

Основная часть

При работе трансформатора «звезда-треугольник с зигзагом» на нелинейную нагрузку фазные напряжения его первичной обмотки могут содержать гармоники прямой (первая, четвертая, седьмая и т. д.), обратной (вторая, пятая, восьмая и т. д.) и нулевой (третья и кратные трем) последовательностей:

$$\begin{aligned}
 u_A &= \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 u_B &= \sum U_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 u_C &= \sum U_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{mA(3n+e)}, U_{mB(3n+e)}, U_{mC(3n+e)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений фаз «А», «В», «С» первичной обмотки соответственно, В;

ω_1 – угловая частота основной гармоники, рад/с;

φ – угол смещения гармоники по отношению к началу отсчета, рад;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$;

e – индекс принадлежности гармоники к определенной последовательности (1 – прямая, 2 – обратная, 3 – нулевая).

Токи третьей и кратных трем гармоник в первичной обмотке, соединенной в звезду без нулевого провода, отсутствуют. Фазные токи равны сумме основных гармоник и высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательности:

$$\begin{aligned}
 i_A &= \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum I_{mA(3n+2)} \times \\
 &\times \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}]; \\
 i_B &= \sum I_{mB(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mB(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}]; \\
 i_C &= \sum I_{mC(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mC(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}],
 \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{mA(3n+e)}, I_{mB(3n+e)}, I_{mC(3n+e)}$ – амплитуды гармоник токов фаз «А», «В», «С» первичной обмотки соответственно, А.

Токи трех фаз каждой из этих гармоник создают симметричную трехфазную систему. Они протекают по первичным фазным обмоткам, замыкаясь через источник питания, а их сумма в нейтральной точке первичной стороны равна нулю.

Фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора могут содержать гармоники всех последовательностей:

$$\begin{aligned}
 u_a &= \sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 u_b &= \sum U_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 u_c &= \sum U_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum U_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],
 \end{aligned} \quad (3)$$

где $U_{ma(3n+e)}, U_{mb(3n+e)}, U_{mc(3n+e)}$ – амплитудные значения гармоник напряжений фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки соответственно, В.

Фазные токи вторичной обмотки могут содержать гармоники всех последовательностей, включая третью и кратные трем:

$$\begin{aligned}
 i_a &= \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 i_b &= \sum I_{mb(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mb(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]; \\
 i_c &= \sum I_{mc(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 &+ \sum I_{mc(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 &+ \sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}],
 \end{aligned} \quad (4)$$

где $I_{ma(3n+e)}, I_{mb(3n+e)}, I_{mc(3n+e)}$ – амплитуды гармоник токов фаз «а», «b», «с» вторичной обмотки соответственно, А.

Первые и все высшие гармоники токов трех фаз вторичной обмотки прямой и обратной последовательностей образуют симметричную трехфазную систему. Они протекают по вторичным фазным обмоткам, замыкаясь через нагрузку, а их сумма равна нулю. Фазные токи третьей и кратных трех гармоник могут протекать по вторичным фазным обмоткам внутри треугольника, минуя нагрузку (рис. 2). Они равны и одинаково направлены во всех трех фазах в любой момент времени.

На основании второго закона Кирхгофа напряжение фазы «А» первичной обмотки:

$$\begin{aligned}
 u_A = & -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 & -\sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\
 & -\sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] + \\
 & + \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\
 & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)},
 \end{aligned} \quad (5)$$

где $E_{mA(3n+1)}, E_{mA(3n+2)}, E_{mA(3n+3)}$ – амплитудные значения ЭДС высших гармоник, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «А» первичной обмотки, В;

$Z_{1(3n+1)}, Z_{1(3n+2)}$ – полные сопротивления фаз первичной обмотки токам высших гармоник прямой последовательности и обратной последовательности соответственно, Ом.

С учетом выражений (1) и (5) сумма высших гармоник прямой и обратной последовательностей напряжения фазы «А» первичной стороны:

$$\begin{aligned}
 & \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\
 & + \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\
 & = -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\
 & -\sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\
 & + \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\
 & + \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Для третьей и кратных трех высших гармоник напряжения:

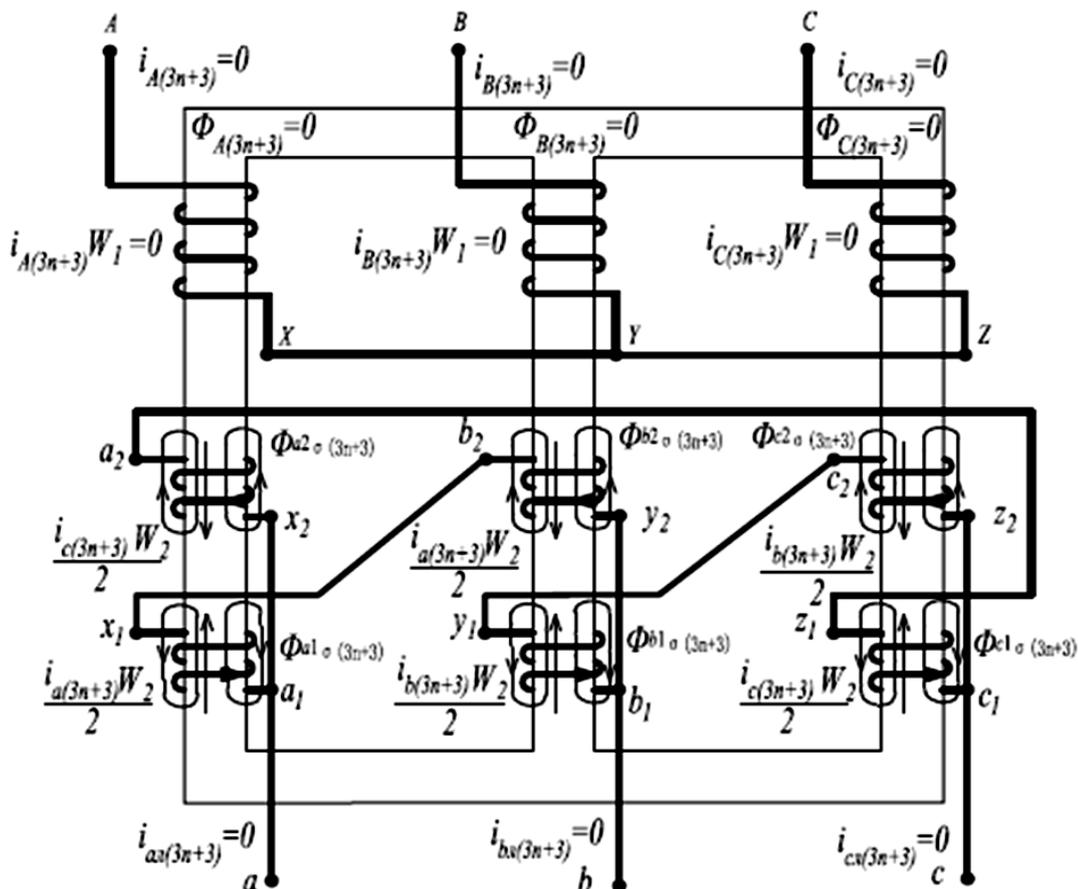


Рисунок 2. Схема распределения магнитодвижущих сил (МДС) и магнитных потоков высших гармоник, кратных трем, в трехфазном трансформаторе «звезда-треугольник с зигзагом»

$$\sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = -\sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}]. \quad (7)$$

Напряжение фазы «а» вторичной обмотки:

$$u_a = \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-3(3n+1)} - \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-3(3n+2)} - \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}, \quad (8)$$

где $E_{ma(3n+1)}$, $E_{ma(3n+2)}$, $E_{ma(3n+3)}$ – амплитудные значения ЭДС высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности фазы «а» вторичной обмотки, В;

$Z_{2-3(3n+1)}$, $Z_{2-3(3n+2)}$, $Z_{2-3(3n+3)}$ – полные сопротивления фаз вторичной обмотки токам высших гармоник прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, Ом.

$$\begin{aligned} Z_{2-3(3n+1)} &= Z_{2(3n+1)} + Z_{3(3n+1)}; \\ Z_{2-3(3n+2)} &= Z_{2(3n+2)} + Z_{3(3n+2)}; \\ Z_{2-3(3n+3)} &= Z_{2(3n+3)} + Z_{3(3n+3)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $Z_{2(3n+1)}$, $Z_{2(3n+2)}$, $Z_{2(3n+3)}$ – полные сопротивления половин a_1 , b_1 , c_1 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом;

$Z_{3(3n+1)}$, $Z_{3(3n+2)}$, $Z_{3(3n+3)}$ – полные сопротивления половин a_2 , b_2 , c_2 вторичных фазных обмоток токам высших гармоник, соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности, Ом.

На основании выражений (3) и (8) сумма высших гармоник прямой и обратной последовательности напряжения фазы «а» вторичной стороны:

$$\begin{aligned} &\sum U_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ &= \sum E_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum E_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] - \\ &- \sum I_{ma(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{2-3(3n+1)} - \\ &- \sum I_{ma(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{2-3(3n+2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для третьей и кратных трех высших гармоник фазы «а» вторичной стороны:

$$\begin{aligned} &\sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] = \\ &= \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] - \\ &- \sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Так как фазные токи кратных трех высших гармоник первичной обмотки $i_{A(3n+3)}$, $i_{B(3n+3)}$, $i_{C(3n+3)}$ равны нулю, то создаваемые ими МДС также равны нулю (рис. 2):

$$\begin{aligned} i_{A(3n+3)} W_1 &= 0; \\ i_{B(3n+3)} W_1 &= 0; \\ i_{C(3n+3)} W_1 &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где W_1 – количество витков в одной фазе первичной обмотки, шт.

Токи кратных трех гармоник равны по величине и имеют одинаковое направление во всех трех фазах вторичной обмотки в любой момент времени (рис. 2):

$$i_{a(3n+3)} = i_{b(3n+3)} = i_{c(3n+3)}. \quad (13)$$

Протекая по вторичным фазным обмоткам, они создают соответствующие МДС. С учетом выражения (17) МДС половин обмоток a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 равны между собой по величине:

$$i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} = i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2}, \quad (14)$$

где W_2 – количество витков в одной фазе вторичной обмотки, шт.

С учетом направления намотки и маркировки выводов токи гармоник нулевой последовательности обтекают половины фаз вторичных обмоток a_1 , b_1 , c_1 и a_2 , b_2 , c_2 , расположенных на каждой из стержней магнитопровода, в противоположных направлениях (рис. 2).

Учитывая выражения (13) и (14), МДС гармоник нулевой последовательности в стержнях фаз «А», «В», «С» будут равны:

$$\begin{aligned} f_{A(3n+3)} &= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2} = \\ &= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = 0; \\ f_{B(3n+3)} &= i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = \\ &= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = 0; \\ f_{C(3n+3)} &= i_{c(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{b(3n+3)} \frac{W_2}{2} = \end{aligned}$$

$$= i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} - i_{a(3n+3)} \frac{W_2}{2} = 0. \quad (15)$$

Происходит компенсация МДС гармоник нулевой последовательности, а их магнитные потоки в стержнях магнитопровода будут равны нулю:

$$\begin{aligned} \Phi_{A(3n+3)} &= \frac{f_{A(3n+3)}}{R_{A\mu(3n+3)}} = 0; \Phi_{B(3n+3)} = \\ &= \frac{f_{B(3n+3)}}{R_{B\mu(3n+3)}} = 0; \Phi_{C(3n+3)} = \frac{f_{C(3n+3)}}{R_{C\mu(3n+3)}} = 0, \quad (16) \end{aligned}$$

где $R_{A\mu(3n+3)}$, $R_{B\mu(3n+3)}$, $R_{C\mu(3n+3)}$ – сопротивления магнитных цепей соответствующих фаз потокам высших гармоник нулевой последовательности, Гн⁻¹.

Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы гармоник нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода, что уменьшает магнитные потери в трансформаторе и повышает его КПД.

Токи гармоник нулевой последовательности вторичной обмотки могут создавать только потоки рассеяния $\Phi_{a1\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{a2\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{b1\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{b2\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{c1\sigma(3n+3)}$, $\Phi_{c2\sigma(3n+3)}$ (рис. 2). Причем поля рассеяния будут тем меньше, чем ближе расположены друг к другу части обмотки.

Так как магнитные потоки гармоник нулевой последовательности в стержнях равны нулю, то и ЭДС, создаваемые ими в обмотках, также будут равны нулю:

$$\begin{aligned} e_{A(3n+3)} &= -W_1 \frac{d\Phi_{A(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{B(3n+3)} &= -W_1 \frac{d\Phi_{B(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{C(3n+3)} &= -W_1 \frac{d\Phi_{C(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{a(3n+3)} &= -W_2 \frac{d\Phi_{A(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{b(3n+3)} &= -W_2 \frac{d\Phi_{B(3n+3)}}{dt} = 0; \\ e_{c(3n+3)} &= -W_2 \frac{d\Phi_{C(3n+3)}}{dt} = 0. \quad (17) \end{aligned}$$

Следовательно, трансформатор не будет генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть, так как

$$\begin{aligned} \sum U_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum E_{mA(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum U_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum E_{mB(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum U_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum E_{mC(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0. \quad (18) \end{aligned}$$

Фазные напряжения первичной обмотки будут содержать только гармоники прямой и обратной последовательности:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum U_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] + \\ &+ \sum U_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] = \\ &= -\sum E_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] - \\ &- \sum E_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] + \\ &+ \sum I_{mA(3n+1)} \sin[(3n+1)\omega_1 t + \varphi_{(3n+1)}] \cdot Z_{1(3n+1)} + \\ &+ \sum I_{mA(3n+2)} \sin[(3n+2)\omega_1 t + \varphi_{(3n+2)}] \cdot Z_{1(3n+2)}. \quad (19) \end{aligned}$$

Для фаз «В», «С» соотношения аналогичные.

Для вторичных фазных обмоток:

$$\begin{aligned} \sum E_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum E_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0; \\ \sum E_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= 0. \quad (20) \end{aligned}$$

Высшие гармоники напряжений нулевой последовательности вторичной обмотки будут вызваны только падениями напряжений от соответствующих токов на сопротивлениях фаз:

$$\begin{aligned} \sum U_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum I_{ma(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}; \\ \sum U_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum I_{mb(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}; \\ \sum U_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] &= \\ = -\sum I_{mc(3n+3)} \sin[(3n+3)\omega_1 t + \varphi_{(3n+3)}] \cdot Z_{2-3(3n+3)}. \quad (21) \end{aligned}$$

Для фаз «В», «С» соотношения аналогичные.

Заключение

1. Искажение синусоидальности напряжений трансформатора обусловлено высшими гармониками прямой и обратной последовательности, которые трансформируются с первичной на вторичную сторону и наоборот, а также падениями напряжений от токов высших гармоник прямой и обратной последовательности на сопротивлениях обмоток.

2. Улучшение формы кривой напряжения происходит вследствие компенсации кратных трем высших гармоник, а их остаточные значения обусловлены падениями напряжений от соответствующих токов на активных сопротивлениях фаз вторичной обмотки. Трансформатор не будет генерировать высшие гармоники напряжений нулевой последовательности, обусловленные нелинейной нагрузкой, в питающую сеть.

3. Вторичная обмотка самостоятельно уравнивает свои намагничивающие силы гармоник нулевой последовательности, устраняя процесс дополнительного подмагничивания ими магнитопровода, что уменьшает магнитные потери в трансформаторе и повышает его КПД. При этом магнитная система трансформатора уравновешена относительно всех гармоник.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трехфазный трансформатор: пат. 2244 Респ. Беларусь / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А. Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № 950299; заявл. 06.09.95; опубл. 30.09.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 3 (18). – С. 216-217.

2. Збродыга, В.М. Улучшение показателей несинусоидальности и несимметрии напряжений в электроустановках сельскохозяйственного назначения применением трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом»: автореф. ...дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / В.М. Збродыга; Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск, 2010. – 20 с.

3. Збродыга, В.М. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / В.М. Збродыга, М.А. Прищепов, А.И. Зеленкевич, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2022. – № 5. – С. 25-33.

4. Прищепов, М.А. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – № 5. – С. 29-33.

5. Прищепов, М.А. Технико-экономическая оптимизация параметров трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, Г.И. Янукович // Агропанорама. – 2010. – № 6. – С. 24-30.

6. Збродыга, В.М. К вопросу повышения качества электроэнергии / В.М. Збродыга, Г.И. Янукович, А.П. Сердешнов // Агропанорама. – 2006. – № 2. – С. 9-12.

7. Янукович, Г.И. Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Δ с зигзагом / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, Н.Г. Королевич // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 16-17 мая 2012 г.: в 5 ч. / ГНУ ВИЭСХ; редкол. А.А. Артюшин [и др.]. – Москва, 2012. – Ч. 1. – С. 141-145.

8. Збродыга, В.М. Анализ работы трансформатора Y/Δ с зигзагом при нелинейном характере нагрузки / В.М. Збродыга // Агропанорама. – 2005. – № 6. – С. 10-14.

9. Янукович, Г.И. Трансформатор Y/Δ с зигзагом как источник питания нелинейных электроприемников / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, А.П. Сердешнов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 16-17 мая 2006 г.: в 5 ч. / ГНУ ВИЭСХ; редкол. А.А. Артюшин [и др.]. – Москва, 2006. – Ч. 1. – С. 274-277.

10. Янукович, Г.И. О возможности применения трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник с зигзагом» для повышения качества напряжения / Г.И. Янукович, В.М. Збродыга, Н.Г. Королевич, М.П. Збродыга // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23-24 октября 2014 г. / Белор. гос. аграр. техн. ун-т; редкол. И.Н. Шило [и др.]. – Минск, 2014. – С. 183-184.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.09.2023

ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ТОПЛИВА В МОТОРНОМ МАСЛЕ

В.К. Корнеева,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.М. Капцевич,

зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

И.В. Закревский,

ст. преподаватель каф. технологии металлов БГАТУ

И.А. Литвинов,

студент агромеханического факультета БГАТУ

В статье установлена экспериментальная зависимость количественного содержания топлива в моторном масле от температуры его вспышки. Определено количество содержания топлива в работающих моторных маслах. Доказана возможность дублирования оценки наличия топлива другими экспресс-методами.

Ключевые слова: моторное масло, экспресс-методы, топливо, температура вспышки, вязкость, «капельная проба»

In this article, the experimental dependence of the quantitative fuel content of engine oil on its flash point has been established. The fuel content of engine oils has been determined. The possibility of duplicating the assessment of fuel availability with other express methods is proven.

Key words: engine oil, express methods, fuel, flash point, engine oil viscosity, «Blotter Spot».

Введение

Одним из загрязнителей, попадающих в моторное масло в процессе работы ДВС, является топливо.

Дизельное топливо может попадать в моторное масло различными способами: во-первых, при прорыве газов из камеры сгорания из-за износа поршневых колец или нарушения сопряжений цилиндропоршневой группы; во-вторых, вследствие неисправности топливных форсунок; в-третьих, в результате выхода из строя топливного насоса из-за износа плунжерных пар или нарушения его уплотнений [1]. Можно отметить и ряд других факторов попадания топлива в масло, относящихся непосредственно к режимам и условиям эксплуатации самого ДВС, таких как низкие температуры, длительные периоды простоя, частые поездки на короткие расстояния и другие.

Попадание топлива в моторное масло приводит к снижению вязкости и, соответственно, смазывающей способности, приводящей к нарушению целостности масляной пленки между трущимися парами, а также к разрушению и потере функциональной способности присадок (детергентов и диспергаторов), способствующих возрастанию скорости окисления масла.

Вышеприведенные факторы свидетельствуют о необходимости проведения регулярного контроля за

наличием топлива в моторном масле непосредственно в процессе работы ДВС.

В настоящее время для определения наличия топлива в моторном масле используется несколько методов. Так, в стандартах ASTM [2-4] для определения наличия и содержания топлива в моторном масле используются методы инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье [2] и газовой хроматографии [3, 4]. Такие методы основаны на использовании дорогостоящего узкоспециализированного оборудования, требуют для работы на нем высококвалифицированных специалистов и не могут быть использованы в условиях АПК.

Для контроля наличия топлива в моторных маслах сельскохозяйственной техники необходимо использовать экспресс-методы, характеризующиеся простотой и низкой трудоемкостью, и обеспечивающие:

- возможность выполнения их непосредственно в полевых условиях;
- применение измерительных и нагревательных устройств, способных работать без необходимости подключения в сеть 230 В;
- получение качественной и количественной оценки за короткий промежуток времени;
- применение универсальных методов и средств;

– возможность дублирования различными методами оценки наличия топлива для обеспечения однозначного распознавания его содержания.

В работах Власова Ю.А. [5] предложен экспресс-тест оценки содержания топлива в моторном масле резонансным методом колебательного контура. По заявлению самих авторов, для моторных масел, разбавленных дизельным топливом, этот метод дает погрешность между теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями, равную 16,57 %, в отличие от масел, разбавленных бензином, для которых эта погрешность составляет 2,37 %.

В работе Нигматуллина Р.Г. [6] предложено судить о наличии топлива по изменению вязкости работающего моторного масла по сравнению со свежим. При попадании топлива в масло его вязкость снижается и повышается из-за загрязнения механическими примесями, добавления масла большей вязкости, попадания воды и охлаждающей жидкости, а также в результате температурной деструкции масла при его перегреве. В этой связи оценка наличия топлива в моторном масле по изменению вязкости не является однозначной и требует дополнительного экспресс-тестирования другими методами.

Присутствие топлива в моторном масле можно также определять методом «капельной пробы» [7], по наличию светлого ореола на границе масляного пятна, который хорошо различим при просмотре хроматограммы «на просвет». Увеличение ширины ореола свидетельствует об увеличении содержания топлива в моторном масле. Однако данный метод не позволяет количественно оценить содержание топлива в моторном масле и поэтому требует дополнительного экспресс-тестирования другими методами.

Для оценки работоспособности моторного масла по содержанию в нем топлива Гурьянов Ю.А. [8] предлагает использовать метод, основанный на определении температуры вспышки в закрытом тигле. Автор источника [8] считает, что при температуре вспышки масла, равной 200 °С, его состояние «годное», при 180 °С – «допускаемое», при 150 °С – «предельное» и при 120 °С – «аварийное», а содержание топлива при таких температурах составляет, соответственно, 0 %, не более 3 %, не более 7 % и более 7 %. Данный метод позволяет оценить работоспособность моторного масла, но проследить количественное изменение содержания в нем топлива непосредственно в процессе эксплуатации ДВС не представляется возможным.

Цель работы – установить количественную зависимость содержания топлива в моторном масле от температуры его вспышки, а также показать возможность дублирования оценки наличия топлива другими экспресс-методами для обеспечения однозначного распознавания его содержания.

Основная часть

Для контроля наличия и количества топлива в моторном масле по температуре вспышки использо-

вали разработанный авторами закрытый электротигель малого размера (рис. 1) [9].



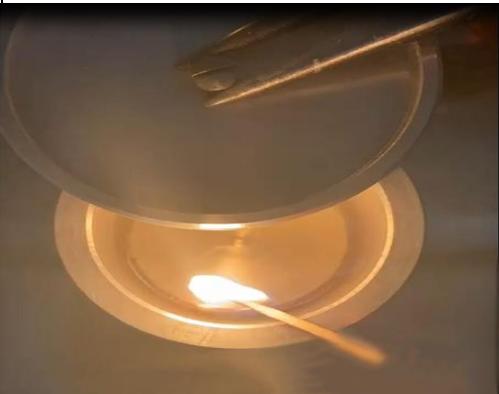
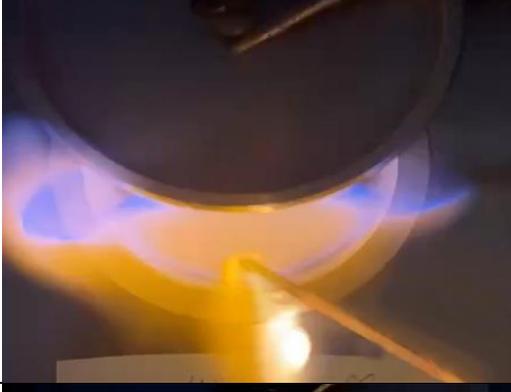
Рисунок 1. Электротигель для реализации экспресс-теста определения наличия и количества топлива в моторном масле

Для обоснования метода определения содержания топлива в моторном масле были проведены экспериментальные исследования, заключающиеся во введении в чистое масло (Лукойл Авангард 10W40) различного количества топлива (1, 2, 4 и 6 %) и в определении температуры вспышки полученных смесей.

Для установления зависимости температуры вспышки моторного масла от количественного содержания в нем топлива, первоначально определяли температуру вспышки чистого масла. Для этого закрытый электротигель нагревали до температуры 220 °С, соответствующей температуре вспышки в открытом тигле для чистого масла Лукойл Авангард. Затем открывали крышку электротигля, заливали в него 5 мл смеси моторного масла при помощи шприца и закрывали электротигель. Выдерживали одну минуту для прогрева масла до температуры электротигля. Приоткрывали крышку, подносили к поверхности масла пламя зажженной спички и фиксировали присутствие/отсутствие воспламенения. При данной температуре (220 °С) воспламенение присутствовало. Далее температуру электротигля снижали с 220 °С с интервалом в 5 °С до таких температур, при которых фиксировали интервал присутствия/отсутствия вспышки. Так, для чистого масла при температуре 210 °С вспышка присутствовала, а при 205 °С – отсутствовала. Этот температурный интервал (210-205 °С) принимали за интервал вспышки в закрытом тигле для чистого моторного масла Лукойл Авангард 10W40.

Далее, проводя аналогичные испытания моторного масла с различной концентрацией топлива, определяли температурные интервалы вспышки полученных смесей (таблица).

Таблица. Зависимость температурного интервала вспышки моторного масла от содержания топлива

Топливо, %	Температурный интервал вспышки, °С и наблюдаемые результаты			
	присутствие вспышки		отсутствие вспышки	
0	210	–	205	–
1	190		185	
2	175		170	
4	155		150	
6	140		135	

По результатам экспериментальных данных, представленных в таблице, построены графические зависимости (диагностические кривые) (рис. 2) и получены математические выражения с достоверностью $R^2 = 0,9996$, описывающие зависимости температуры вспышки моторного масла от содержания в нем топлива:

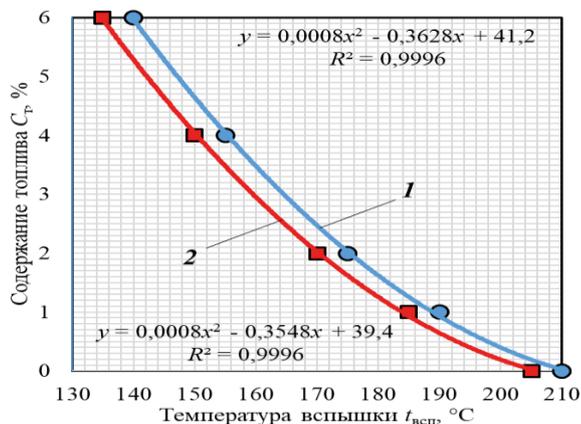


Рисунок 2. Зависимость содержания топлива от температуры вспышки моторного масла: 1 – присутствие вспышки; 2 – отсутствие вспышки

$$C_{т.н} = 0,0008 t_{всп.н}^2 - 0,3628 t_{всп.н} + 41,2; \quad (1)$$

$$C_{т.к} = 0,0008 t_{всп.к}^2 - 0,3548 t_{всп.к} + 39,4; \quad (2)$$

где $C_{т.н}$ и $C_{т.к}$ – концентрации топлива, соответствующие температуре присутствия вспышки и температуре отсутствия вспышки, соответственно;

$t_{всп.н}$ и $t_{всп.к}$ – температура присутствия вспышки и температура отсутствия вспышки, соответственно.

Результаты экспериментальных данных определения температуры вспышки моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 146, 215 и 250 ч, пробы

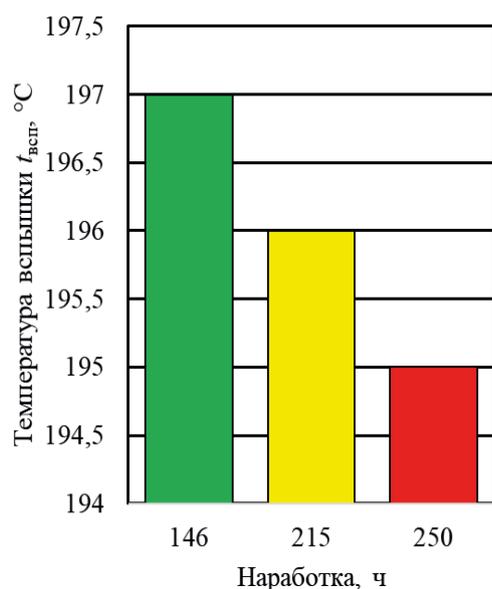


Рисунок 3. Температура вспышки моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой

которых были взяты из ДВС Д-260.4S2 трактора БЕЛАРУС-2022.3 во время весенне-полевых работ (2023 г.) в ПРУП «Экспериментальная база им. Котовского», представлены на рисунке 3, а рассчитанные значения содержания топлива по выражению (1) – на рисунке 4.

Полученные экспериментальные и расчетные данные (рис. 3, 4) показывают, что с увеличением наработки моторного масла температура вспышки падает, а, соответственно, содержание топлива в нем увеличивается. Такое количество топлива в моторном масле является допустимым, однако рост его содержания свидетельствует о нарушении работы топливной системы ДВС.

Наличие топлива в моторном масле также было подтверждено другими экспресс-тестами, такими как экспресс-метод изменения вязкости, проводимый с помощью компаратора вязкости [10], а также экспресс-метод «капельной пробы» [9; 11, 12].

На рисунке 5 представлены экспериментальные данные изменения значений вязкости моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 146, 215 и 250 ч по сравнению со свежим.

Наблюдаемое снижение вязкости моторного масла с увеличением его наработки (рис. 5) подтверждает факт разжижения его топливом.

Анализ хроматограмм, полученных методом «капельной пробы», при рассмотрении «на просвет», для моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 146, 215 и 250 ч показал наличие светлого ореола на границе масляного пятна (рис. 6), что также подтверждает наличие топлива в моторном масле.

Использование электротигля малого размера для проведения экспресс-методов определения температуры вспышки и «капельной пробы» позволяет получать качественную и количественную оценку содержания топлива в моторном масле [9].

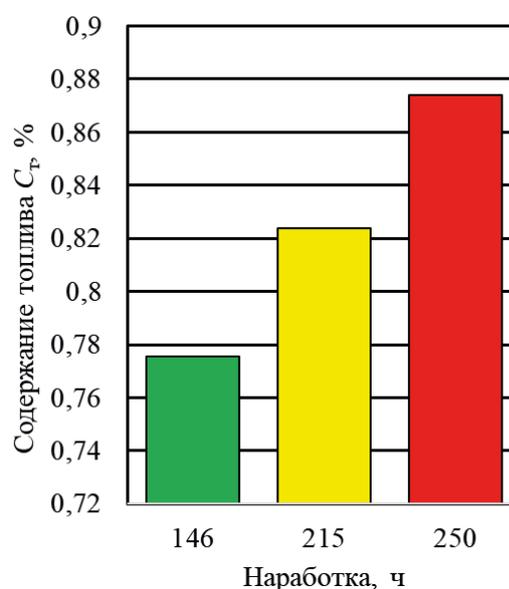


Рисунок 4. Содержание топлива в моторных маслах Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой

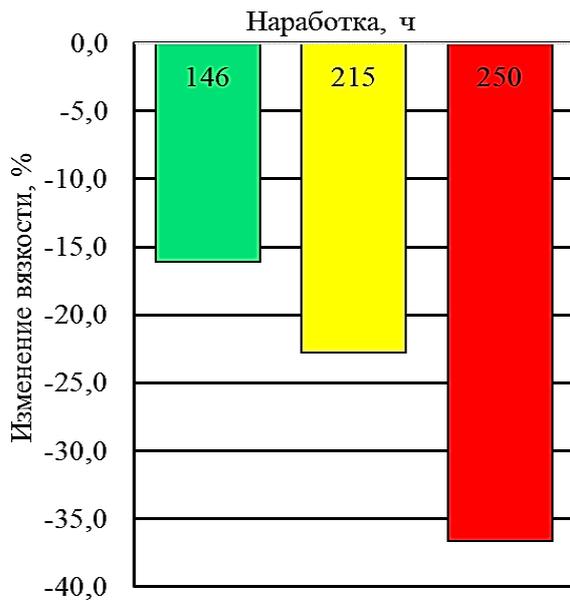


Рисунок 5. Изменение вязкости моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой

Заключение

В результате проведенных экспериментов установлена зависимость количественного содержания топлива в моторном масле от температуры его вспышки, что позволило получить диагностическую кривую и аналитические зависимости этих величин, на основании которых определено количество содержания топлива в работающих моторных маслах.

Показана возможность дублирования оценки наличия топлива другими экспресс-методами, такими как метод оценки изменения вязкости и метод «капельной пробы».

Рассмотренные экспресс-методы, характеризующиеся простотой и низкой трудоемкостью, возможностью выполнения непосредственно в полевых условиях с применения устройств, способных работать без подключения в сеть 230 В, позволяют получать качественную и количественную оценку свойств работающих моторных масел за короткий промежуток времени непосредственно в условиях АПК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шевченко, И.А. Дизельное топливо в моторном масле / И.А. Шевченко, Н.Г. Макаренко // АВТОДВОР. – 2016. – № 5 (198). – С. 2021.
2. Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry: ASTM E2412-10. – ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2018. – 24 p.
3. Standard Test Method for Diesel Fuel Diluent in Used Diesel Engine Oils by Gas Chromatography: ASTM D3524-14 (2020). – ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2020. – 6 p.
4. Standard Test Method for Determination of Fuel Dilution for In-Service Engine Oils by Gas Chromatography: ASTM D7593-22. – ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2022. – 9 p.
5. Ляпина, О.В. Метод идентификации моторного топлива в смазочном масле автомобильных агрегатов / О.В. Ляпина, Ю.А. Власов, А.Н. Ляпин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 1637-1641.
6. Устройство для определения степени разжижения моторных масел топливом и выявления износа двигателя / Р.Г. Нигматуллин [и др.] // Мир измерений. – 2011. – Вып. № 4. – С. 38-39.
7. Хорстмейер, Г. Способ и устройство для анализа масел и технических рабочих жидкостей и для квалифицированной оценки рабочих состояний элементов: пат. RU 2 649 095/ Г. Хорстмейер. – Опубл. 29.03.2018.
8. Гурьянов, Ю.А. Экспресс-методы и средства диагностирования агрегатов машин по параметрам масла: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Ю.А. Гурьянов. – Челябинск, 2007. – 371 л.
9. Универсальный электротигель для проведения экспресс-контроля показателей качества моторных масел в условиях предприятий АПК / В.К. Корнеева [и др.] // Агропанорама. – 2023. – № 2. – С. 31-37.
10. Корнеева, В.К. Определение вязкости моторного масла в условиях АПК / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, И.В. Закревский, П.М. Спиридович // Аграрное образование и наука для агропромышленного ком-

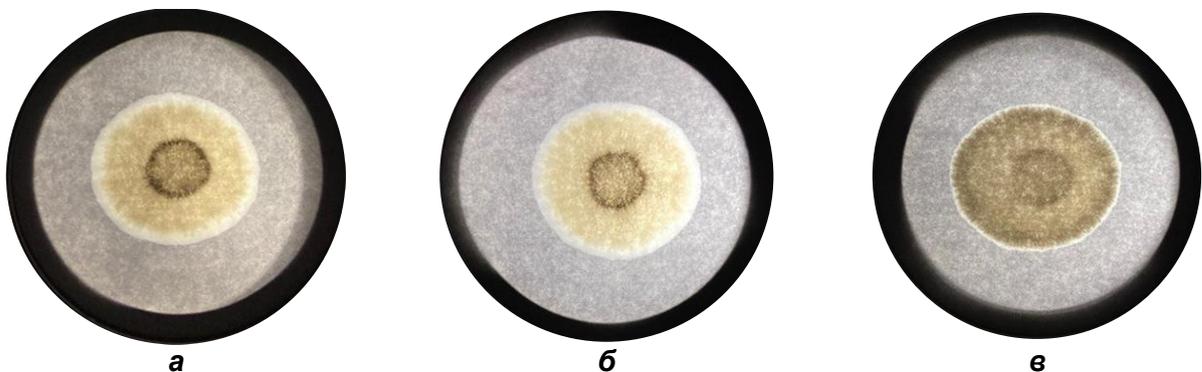


Рисунок 6. Хроматограммы «на просвет» моторных масел марки Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой: а – 146 ч; б – 215 ч; в – 250 ч

плекса: материалы республиканской науч.-практич. конференции / Белорусская агропромышленная неделя «БЕЛАГРО-2022» / редкол.: В.А. Самсонович (гл. ред.) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2022. – С. 119-124.

11. Корнеева, В.К. Метод «Капельной пробы» – основной полевой тест оценки качества моторного масла / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, И.В. Закревский // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России: материалы II Международной науч. конференции / Красноярский гос. аграрн. ун-т. – Красноярск, 2022. – С. 77-82.

12. Корнеева, В.К. Формирование ядра и концентрических зон при оценке моюще-диспергирующих свойств моторного масла / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, И.В. Закревский, В.В. Остриков // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XIV Международной науч.-практич. конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова / Новосибирский гос. аграрн. ун-т. – Новосибирск, 2022. – С. 82-87.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.10.2023

Устройство для разделки и поверхностной обработки почвенного пласта к плугу для гладкой вспашки

Предназначено для качественной обработки верхнего пласта почв различного механического состава и ее подготовки под посев почвообрабатывающими посевными агрегатами.

Устройство УП-2,0 использовалось в конструкции плуга для гладкой вспашки ПО-4+1-40К, выпускаемого ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод».



Основные технические данные

Выполняемые технологические процессы

Марка машины

Применяется с плугом

Рабочая ширина захвата, м

Рабочая скорость движения, км/ч

Дорожный просвет, мм

Основные показатели качества выполнения технологического процесса:

- глубина обработки, см, не более

- гребнистость поверхности поля, см

- плотность почвы (на глубине 5-8 см), г/см³

- крошение почвы (содержание фракции до 50 мм), %, не менее

Производительность за 1 час времени, га:

- сменного

- эксплуатационного

Удельный расход топлива, кг/га

Диаметр дисков, м

Масса, кг

Габаритные размеры, мм, не более

крошение, рыхление, выравнивание, уплотнение верхнего слоя почвы

УП-2,0

ПО-4+1-40К

2,0

6-9

300

15

3

1,0...1,3

90

1,26

1,25

14

0,46

250

3200x3100x1400

УДК 338.436.33

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-159-5-44-48>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ СБАЛАНСИРОВАННЫМ РАЗВИТИЕМ АПК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

А.Л. Косова,

ведуш. науч. сотр. ГП «Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси», канд. экон. наук

В статье обоснован действующий механизм управления сбалансированным развитием отраслей АПК Республики Беларусь с учетом достижения целевых критериев устойчивости производства. Проанализированы основные показатели развития сельского хозяйства, обрабатывающей (пищевой) промышленности, торговли, а также определена результативность их взаимодействия на всех уровнях управления.

Ключевые слова: механизм, управление, сбалансированное развитие, отрасли АПК, устойчивость, критерии, эффективность.

The article substantiates the current mechanism of managing the balanced development of the agro-industrial complex of the Republic of Belarus, taking into account the achievement of target criteria of production sustainability. The main indicators of farming development, manufacturing (food) industry and trade are analysed, and the effectiveness of their interaction at all levels of management is determined.

Key words: mechanism, management, balanced development, agro-industrial complex, sustainability, criteria, efficiency.

Введение

Современное развитие агропромышленного комплекса (АПК) Республики Беларусь осуществляется в рамках Государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг., что способствует достижению на национальном уровне целей устойчивого развития (ЦУР), содержащихся в резолюции Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 г. № 70/1 «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», в том числе по ликвидации голода, обеспечению продовольственной безопасности и улучшению питания, содействию устойчивому развитию сельского хозяйства [1-3].

В теории и практике отечественными и зарубежными учеными выделяются теоретико-методические подходы управления сбалансированным развитием АПК (процессный, системный, ситуационный, стратегический, инновационный), обеспечивающие повышение эффективности производственно-экономической и сбытовой деятельности аграрных субъектов на разных уровнях хозяйствования. Как показали проведенные исследования, наиболее эффективным является инновационный подход, базирующийся на выделении аграрных бизнес-направлений, оценке их перспективности, формировании бизнес-портфеля, разработке альтернатив развития организации и самой стратегии.

В то же время для практического подтверждения результатов вышеуказанных теоретических и методических исследований необходимо провести анализ

эффективности действующего механизма управления сбалансированным развитием отраслей АПК Республики Беларусь с учетом достижения целевых критериев устойчивости производства. При этом планируется проанализировать основные показатели развития сельского хозяйства, обрабатывающей (пищевой) промышленности, торговли, а также определить результативность их взаимодействия на всех уровнях хозяйствования, что и определяет цель данной работы.

Материалы и методы

Исследование базировалось на изучении и обобщении специальных литературных источников отечественных и зарубежных авторов, данных Национального статистического комитета Республики Беларусь. В ходе исследований применялись методы: монографический, системного и сравнительного анализа, графический, факторного анализа, экспертных оценок.

Основная часть

Для проведения комплексного анализа структурно обоснован механизм управления сбалансированным развитием отраслей АПК Республики Беларусь, представляющий совокупность целей, задач, ключевых направлений, целевых критериев устойчивости производства, применение которых на всех уровнях управления национальной системы АПК обеспечивает интеграцию участников экономической деятельности, а также способствует достижению заявленных целей (рисунок).

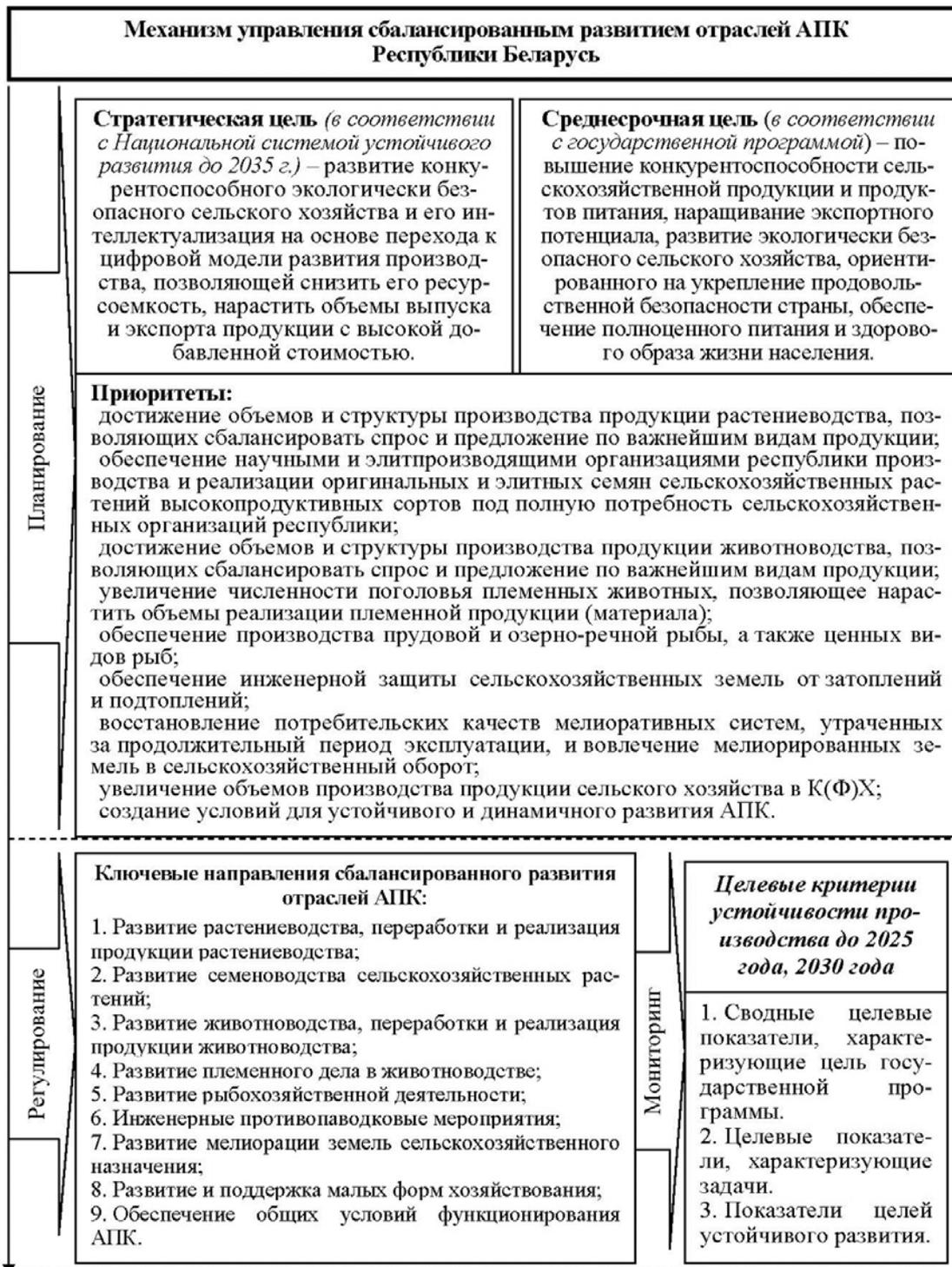


Рисунок. Механизм управления сбалансированным развитием отраслей АПК Республики Беларусь
Примечание. Выполнен автором на основе собственных исследований.

В рамках заявленных целей и приоритетов ключевыми направлениями сбалансированного развития отраслей АПК Республики Беларусь являются: развитие растениеводства, переработки и реализация продукции растениеводства; семеноводства сельскохозяйственных растений; животноводства, переработки и реализация продукции животноводства; племенного

дела в животноводстве; рыбохозяйственной деятельности; мелиорации земель сельскохозяйственного назначения; малых форм хозяйствования; реализация инженерных противопаводковых мероприятий и обеспечение общих условий функционирования АПК. Для каждого из вышеуказанных направлений в рамках Государственной программы «Аграрный биз-

нес» на 2021-2025 годы определен целевой показатель, характеризующий поставленные задачи, и его значение. Анализ эффективности действующего механизма управления сбалансированным развитием отраслей АПК Республики Беларусь с учетом достижения целевых критериев устойчивости производства проведен на основе сводных целевых показателей, характеризующих цель государственной программы, и в сравнении с предыдущей программой (табл. 1).

Так, за текущий период наблюдается выполнение двух из трех показателей, а именно: темп роста экспорта продовольственных товаров и сельскохозяйственного сырья; рентабельность продаж в сельском хозяйстве. Отношение кредиторской задолженности и задолженности по кредитам и займам к выручке от реализации продукции, товаров, работ, услуг сельскохозяйственных организаций не выполняется. При этом запланированные значения данного показателя как целевого по Государственной программе развития аграрного бизнеса в Республики Беларусь на 2016-2020 гг. также не были достигнуты.

По 10 целевым показателям, характеризующим задачи действующей государственной программы, по итогу 2021 г. отмечается выполнение на 70 %. Невыполнение касается объема производства рыбных ресурсов в водных объектах республики; индекса производства продукции сельского хозяйства в К(Ф)Х; индекса валовой добавленной стоимости в сопоставимых ценах. Сравнительный анализ с завершенной государственной программой показывает, что за 2016-2020 гг. не в полном объеме выполнены доведенные показатели производства продукции растениеводства и животноводства, а также по подпрограмме 9 «Структурные преобразования в агропромышленном комплексе». Всего за анализируемый период реализовано 183 мероприятия, из них выполнено 176 или 96,2 %.

Для дальнейшего обоснования эффективности действующего механизма управления сбалансированным развитием отраслей АПК Республики Беларусь автором проанализированы основные показатели развития сельского хозяйства, обрабатывающей (пищевой) промышленности, торговли, а также вы-

полнена оценка результативности их взаимодействия на всех уровнях хозяйствования.

Полученные результаты показали [4; 6], что в 2022 г. в хозяйствах всех категорий производство продукции сельского хозяйства в текущих ценах составило 31,8 млрд руб. или в сопоставимых ценах – 103,6 % к уровню 2021 г. При этом отмечается варьирование объемов производства и урожайности основных сельскохозяйственных культур. В республике собрано 8 701,1 тыс. т зерновых и зернобобовых, что составляет 118,9 % к уровню 2021 г. Увеличение производства основных сельскохозяйственных культур обусловлено ростом их урожайности, которая в 2022 г. составила 34,5 ц/га.

В отношении производства основных видов животноводческой продукции в хозяйствах всех категорий можно констатировать неустойчивость. Так, производство (выращивание) скота и птицы (в живом весе) в сельскохозяйственных организациях в 2022 г. снизилось на 2,2 % по сравнению с 2021 г., яиц – на 1,6 %, производство молока увеличилось на 1 %. Снижение производства скота и птицы обусловлено уменьшением производства свиней на 7,9 % и крупного рогатого скота – на 2,9 %.

Реализация скота и птицы на убой (в живом весе) в сельскохозяйственных организациях в 2022 г. снизилась на 32,3 тыс. т (2 %) по сравнению с предыдущим годом. Удельный вес реализованного на убой крупного рогатого скота в общем объеме реализации составил 34,6 % (в 2021 г. – 34,4 %), свиней – 25,1 % (26,5 %), птицы – 40,3 % (39,1 %).

Сельскохозяйственными организациями реализовано 6 930,6 тыс. т молока, что на 1,4 % больше, чем в 2021 г. Удельный вес реализованного молока в общем объеме его производства по республике составил 90,4 % (в 2021 г. – 90,1 %).

Однако увеличение валовых показателей не обеспечило снижение финансовой задолженности сельскохозяйственных организаций (в 2020 г. – 14 910,5 млн руб.; в 2021 г. – 16 119,4; в 2022 г. – 17 303,0 млн руб.). Удельный вес просроченной суммарной задолженности в общей суммарной задол-

Таблица 1. Анализ выполнения сводных целевых показателей, характеризующих цель Государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 гг.

Показатель	Ед. изм.	Значение показателей по годам				
		2021	2022	2023	2024	2025
Государственная программа						
Темп роста экспорта продовольственных товаров и сельскохозяйственного сырья						
план	в процентах к 2020 г.	104,3	108,6	112,8	117,1	121,5
факт		115,6	123,9	-	-	-
Рентабельность продаж в сельском хозяйстве						
план	проценты	6,6	7,3	8,1	8,9	10,0
факт		7,8	11,2	-	-	-
Отношение кредиторской задолженности и задолженности по кредитам и займам к выручке от реализации продукции, товаров, работ, услуг сельскохозяйственных организаций						
план	коэффициент	-	0,99	0,95	0,92	0,91
факт		-	1,08	-	-	-
<i>Примечание. Составлена на основе источников [2; 4, 5].</i>						

женности сохраняется на уровне 17,7 % (в 2020 г. – 18,9 %; в 2021 г. – 18,4 %). Соотношение суммарной задолженности и выручки от реализации продукции, товаров, работ и услуг по итогу 2022 г. составило 84,4% и за 2020-2021 гг. имеет тенденцию к снижению. Тем не менее, финансовое положение сельскохозяйственных организаций не обеспечивает устойчивое производство и доходность субъектов.

За последние годы производство основных продуктов обрабатывающей (пищевой) промышленности увеличилось. Данная отрасль представлена производством продуктов питания, напитков, табачных изделий, и занимает 23,2 % в общем объеме промышленного производства. В 2021 г. индекс производства в сопоставимых ценах составил 101,9 % к уровню 2020 г., что подтверждает устойчивое функционирование вида экономической деятельности. Основную долю в структуре производства занимают – производство молочных продуктов – 29,2 %, переработка и консервирование мяса – 23,2 %. На протяжении 2016-2021 гг. производство промышленных видов пищевой продукции росло стабильно, за исключением плодоовощных консервов, сухих молочных продуктов, сахара и макаронных изделий.

В 2022 г. розничный товарооборот на 93,3 % формировался организациями торговли и на 6,7 % индивидуальными предпринимателями и физическими лицами (в 2021 г. – соответственно, 92,8 % и 7,2 %). Организации торговли в 2022 г. продано продовольственных товаров на 32,7 млрд руб. (99,9 % к

уровню 2021 г.). Удельный вес продовольственных товаров, реализованных организациями торговли, составил 96,8 % от всей продажи продовольственных товаров (в 2020 г. – 96,1 %; в 2021 г. – 96,4 %). При этом доля продажи данной категории товаров отечественного производства в розничном товарообороте организаций торговли в 2022 г. повысилась на 0,2 п. п. и составила 76,8 % (в 2020 г. – 77,1 %; в 2021 г. – 76,6 %). По ряду товаров (мясо, молочная продукция, сливочное масло, яйца, сахар) спрос покупателей практически полностью удовлетворялся за счет продукции белорусских товаропроизводителей.

Оценка результативности и взаимодействия сельского хозяйства, обрабатывающей (пищевой) промышленности и торговли определена на основе достижения показателей по ЦУР 2 «Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшение питания, и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства» (табл. 2).

Анализ данных таблицы 2 показывает, что действующий механизм управления сбалансированным развитием отраслей АПК Беларуси ориентирован на сельское хозяйство. В то же время отмечаются определенные проблемы в достижении целевых критериев устойчивости производства в сельском хозяйстве, обрабатывающей (пищевой) промышленности и торговле, которые заключаются в следующем:

– при увеличении объемных показателей в сельском хозяйстве наблюдается невысокий уровень за-

Таблица 2. Отдельные показатели национального перечня показателей по ЦУР 2 «Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшение питания, и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства», 2016-2021 гг.

Индекс	Наименование показателя	Год					
		2016	2017	2018	2019	2020	2021
2.3.1	Объем производства на производственную продукцию в разбивке по классам размера предприятий фермерского хозяйства, долл. США	18,9	18,7	18,4	...
2.3.2.1	Средний доход мелких производителей продовольственной продукции, долл. США	733	839	895	904
2.5.1	Количество генетических ресурсов растительного и зоологического происхождения, предназначенных для производства продовольствия и сельского хозяйства, которые хранятся на специальных объектах либо среднесрочного, либо долгосрочного характера						
	из них ресурсы:						
	растительного происхождения, ед.	28 838	29 800	38 406	41 089	43 965	46 722
	зоологического происхождения, тыс. доз	...	21 100	21 105	24 594	25 377	28 980
2.а.1	Индекс ориентированности на сельское хозяйство, определяемый по структуре государственных расходов	1,1	0,8	0,8	0,9	0,7	1,0

Примечание. Составлена автором на основе [6].

груженности производственных мощностей перерабатывающих предприятий, в первую очередь, подведомственных Министерству сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. Так, например, на протяжении 2016-2021 гг. загруженность производственных мощностей по выпуску мяса и мясопродуктов находилась на уровне 66-73 %, цельномолочная продукция в пересчете на молоко – 63-72 %;

– в сельском хозяйстве прибыльным является производство только отдельных видов растениеводческой (зерно, сахарная свекла, овощи защищенного грунта) и животноводческой продукции (молоко, мясо птицы, яйцо куриное);

– в обрабатывающей (пищевой) промышленности отмечается высокая доля постоянных издержек в структуре затрат на производство и реализацию продукции, что снижает уровень ее конкурентоспособности, как на внутреннем, так и на внешнем рынке;

– уровень рентабельности продаж в сельском хозяйстве, обрабатывающей (пищевой) промышленности и торговле отличается. В сельском хозяйстве фактическое значение показателя еще не позволяет обеспечить расширенное воспроизводство отрасли (2022 г. – 11,2 %, а без учета господдержки – 4,5 %). Рентабельность продаж в обрабатывающей (пищевой) промышленности находилась на уровне 10,5 % (2021 г.) и в торговле – 3,5 % (2022 г.);

– значительно разнятся показатели финансового состояния. Так, удельный вес просроченной суммарной задолженности сельского хозяйства в общей суммарной задолженности находится на уровне 17,7 %, а в торговле – 3,4 %. Соотношение суммарной задолженности и выручки от реализации продукции, товаров, работ, услуг в сельском хозяйстве составило 84,4 %, в торговле – 25,6 %. В обрабатывающей (пищевой) промышленности также отмечается значительный объем заемных средств, в том числе полученных через инновационные фонды облисполкомов и кредиты ОАО «Банк развития Республики Беларусь»;

– наблюдается (в сельском хозяйстве) дефицит собственных финансовых средств, необходимых для своевременного выполнения текущей деятельности и обновления на качественно новой основе основных фондов.

Заключение

Таким образом, механизм управления сбалансированным развитием отраслей АПК, применяемый в Республике Беларусь, основывается на целях, задачах и принципах текущей государственной аграрной политики, направленной на стимулирование повышения эффективности агропромышленного комплекса на базе совершенствования специализации сельскохозяйственного производства и его организационно-экономической структуры, рационального использо-

вания земель и государственной поддержки АПК. Достижение целевых критериев устойчивости производства обеспечивается комплексом мероприятий, утвержденных Государственной программой «Аграрный бизнес» на 2021-2025 гг. и Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 г. Механизм управления сбалансированным развитием отраслей АПК Беларуси ориентирован на сельское хозяйство, что позволяет обеспечивать высокий уровень продукции собственного производства и эффективное взаимодействие сельскохозяйственного производства, обрабатывающей промышленности, торговой сферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. О государственной аграрной политике: Указ Президента Респ. Беларусь, 17 июля 2014 г., № 347 [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31400347&p1=1>. – Дата доступа: 25.05.2023.

2. О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг. [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 1 февр. 2021 г., № 59 (в ред. от 21 декабря 2022 г., № 893) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100059>. – Дата доступа: 25.05.2023.

3. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года [Электронный ресурс] / Министерство экономики Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/N SUR-2035-1.pdf>. – Дата доступа: 25.04.2023.

4. Социально-экономическое положение Республики Беларусь: январь-декабрь 2022 г. / Национальный стат. комитет Респ. Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-tatistika/publications/izdania/public_bulletin/index_62266/. – Дата доступа: 20.05.2023.

5. Социально-экономическое положение Республики Беларусь: январь 2023 г. [Электронный ресурс] / Национальный стат. комитет Респ. Беларусь. – Режим доступа: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-tatistika/publications/izdania/public_bulletin/index_64534/. – Дата доступа: 20.05.2023.

6. Сельское хозяйство Республики Беларусь: буклет / Национальный стат. комитет Респ. Беларусь. – Минск, 2022. – 35 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.07. 2023.

Правила для авторов

1. Журнал «Агропанорама» помещает достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной, способствуют повышению экономической эффективности агропромышленного производства, носят законченный характер. Статьи публикуются на русском языке.

Приказом ВАК от 4 июля 2005 г. № 101 (в редакции приказа ВАК от 2.02.2011 г. № 26) журнал «Агропанорама» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным (зоотехния) наукам.

2. Объем научной статьи, учитываемой в качестве публикации по теме диссертации, должен составлять, как правило, не менее 0,35 авторского листа (14000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.), что соответствует 8 стр. текста, напечатанного через 2 интервала между строками (5,5 стр. в случае печати через 1,5 интервала).

Рукопись статьи, представляемая в редакцию, должна удовлетворять основным требованиям современной компьютерной верстки. К набору текста и формул предъявляется ряд требований:

1) рукопись, подготовленная в электронном виде, должна быть набрана в текстовом редакторе Word версии 6.0 или более поздней. Файл сохраняется в формате «doc»;

2) текст следует сформатировать без переносов и выравнивания правого края текста, для набора использовать один из самых распространенных шрифтов типа Times (например, Times New Roman Cyr, Times ET);

3) знаки препинания (.,!?:;...) не отделяются пробелом от слова, за которым следуют, но после них пробел обязателен. Кавычки и скобки не отделяются пробелом от слова или выражения внутри них. Следует различать дефис«-» и длинное тире «—». Длинное тире набирается в редакторе Word комбинацией клавиш: Ctrl+Shift+«-». От соседних участков текста оно отделяется единичными пробелами. Исключение: длинное тире не отделяется пробелами между цифрами или числами: 1991-1996;

4) при наборе формул необходимо следовать общепринятым правилам:

а) формулы набираются только в редакторе формул Microsoft Equation. Размер шрифта 12. При длине формулы более 8,5 см желательнее продолжение перенести на следующую строчку;

б) буквы латинского алфавита, обозначающие переменные, постоянные, коэффициенты, индексы и т.д., набираются курсивом;

в) элементы, обозначаемые буквами греческого и русского алфавитов, набираются шрифтом прямого начертания;

г) цифры набираются шрифтом прямого начертания;

д) аббревиатуры функций набираются прямо;

е) специальные символы и элементы, обозначаемые буквами греческого алфавита, использованные при наборе формул, вставляются в текст только в редакторе формул Microsoft Equation.

ж) пронумерованные формулы пишутся в отдельной от текста строке, а номер формулы ставится у правого края.

Нумеруются лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.

3. Рисунки, графики, диаграммы необходимо выполнять с использованием электронных редакторов и вставлять в файл документа Word. Изображение должно быть четким, толщина линий более 0,5 пт, размер рисунка по ширине: 5,6 см, 11,5 см, 17,5 см и 8,5 см.

4. Цифровой материал должен оформляться в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь заголовок и номер (если таблиц несколько). Рекомендуется установить толщину линии не менее 1 пт. В оформлении таблиц и

графиков не следует применять выделение цветом, заливку фона.

Фотографии и рисунки должны быть представлены в электронном виде в отдельных файлах формата *.tif или *.jpg с разрешением 300 dpi.

Научные статьи, публикуемые в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, должны включать:

индекс УДК;

название статьи;

фамилию и инициалы, должность, ученую степень и звание автора (авторов) статьи;

аннотацию на русском и английском языках;

ключевые слова на русском и английском языках;

введение;

основную часть, включающую графики и другой иллюстративный материал (при их наличии);

заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

список цитированных источников;

дату поступления статьи в редакцию.

В разделе «Введение» должен быть дан краткий обзор литературы по данной проблеме, указаны не решенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована цель работы.

Основная часть статьи должна содержать описание методики, аппаратуры, объектов исследования и подробно освещать содержание исследований, проведенных авторами.

В разделе «Заключение» должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения.

Дополнительно в структуру статьи может быть включен перечень принятых обозначений и сокращений.

5. Литература должна быть представлена общим списком в конце статьи. Библиографические записи располагаются в алфавитном порядке на языке оригинала или в порядке цитирования. Ссылки в тексте обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

6. Статьи из научно-исследовательских или высших учебных заведений направляются вместе с сопроводительным письмом, подписанным директором и приложенной экспертной справкой по установленной форме.

7. Статьи принимаются в электронном виде с распечаткой в одном экземпляре. Распечатанный текст статьи должен быть подписан всеми авторами. В конце статьи необходимо указать полное название учреждения образования, организации, предприятия, ученую степень и ученое звание (если есть), а также полный почтовый адрес и номер телефона (служебный или домашний) каждого автора.

8. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, опубликованных ранее или принятых к печати другими изданиями.

9. Плата за опубликование научных статей не взимается.

10. Право первоочередного опубликования статей предоставляется лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения.

Авторские материалы для публикации в журнале «Агропанорама» направляются в редакцию по адресу:

*220012, г. Минск, пр-т Независимости, 99,
корп. 5, к. 602; 608. БГАТУ*

Система управления электроприводом дробилки зерна

Предназначена для автоматизированного управления загрузкой дробилки зерна по измеренной мощности электродвигателя.

Применение системы управления электроприводом позволяет автоматизировать технологический процесс дробления по загрузке электродвигателя. Система управления корректирует режим работы электропривода в зависимости от исходной влажности зерна.



Основные технические данные

Диапазон регулирования загрузки дробилки зерна	20... 100 %
Диапазон контролируемой влажности зерна	9... 40 %
Погрешность измерения влажности, не более	0,5 %
Мощность электродвигателя дозатора	до 3 кВт
Контроллер имеет унифицированный аналоговый выход 4-20 мА и интерфейс RS-485	

