



ISSN 2078-7138

АГРОПАНОРАМА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ РАБОТНИКОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

№ 2
апрель
2020

*Разработка системы стабилизации загрузки вальцовой
плющилки-измельчителя фуражного зерна*

*Повышение долговечности стрелчатых лап
паровых культиваторов*

*Теоретическое исследование движения
частицы топлива в топочном
пространстве*

*Методика расчета электрокоагулятора
белков молочной сыворотки*



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Уважаемые коллеги!

***Приглашаем Вас принять участие в работе 12-й
Международной научно-практической конференции***

***«Формирование организационно-
экономических условий эффективного
функционирования АПК»»,***

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

28 - 29 мая 2020 г.

Основные направления работы конференции:

- Повышение конкурентной устойчивости организаций АПК на основе инновационной модернизации производства***
- Информационное обеспечение и системные методы в инновационной деятельности АПК***
- Современные направления менеджмента и маркетинга в условиях развития интеграционных процессов***

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

Контактные телефоны: (+ 375 17) 272-60-64, 373-51-83, 323-42-46

E-mail: conf - 2020@mail.ru

www.bsatu.by

АГРОПАНОРАМА 2 (138) апрель 2020

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
Иван Николаевич Шилов

Заместитель главного редактора
Игорь Степанович Крук

Редакционная коллегия:

Г.И. Гануш	М.А. Прищепов
Л.С. Герасимович	А.С. Сайганов
Е.П. Забелло	В.Н. Тимошенко
П.П. Казакевич	Н.К. Толочко
А.Н. Карташевич	В.П. Чеботарёв
И.П. Козловская	Н.С. Яковчик

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

Компьютерная верстка
В.Г. Леван

Адрес редакции:

Минск, пр-т Независимости, 99/1, к. 220
Тел. (017) 272-47-71 Факс (017) 258-41-16

Прием статей и работа с авторами:

Минск, пр-т Независимости, 99/5, к. 602, 608
Тел. (017) 385-91-02, 355-22-14
Факс (017) 272-25-71
E-mail: AgroP@bsatu.by

БГАТУ, 2020.

Формат издания 60 x 84 1/8.

Подписано в печать с готового оригинала-макета 23.04.2020 г. Зак. № 294 от 20.04.2020 г.

Дата выхода в свет 30.04.2020 г.

Печать офсетная. Тираж 100 экз.

Статьи рецензируются.

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

ЛП № 02330/316 от 30.01.2015 г.

Выходит один раз в два месяца.

Подписной индекс в каталоге «Белпочта» - 74884.

Стоимость подписки на журнал на 1-е п/г 2020 г.:

для индивидуальных подписчиков - 21,06 руб.;

ведомственная - 24,51 руб.;

Цена журнала в киоске БГАТУ - 6,00 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

- Г.И. Гедроить, С.В. Занемонский, А.В. Бобрышов, С.И. Оскирко**
Совершенствование ходовых систем транспортно-технологических сельскохозяйственных машин.....2
- В.В. Поддубицкий, В.Н. Дашков, В.П. Чеботарев**
Теоретическое исследование движения частицы топлива в топочном пространстве.....6
- К.В. Борак, С.М. Герук, И.С. Крук**
Повышение долговечности стрелчатых лап паровых культиваторов.....10

Технологии производства продукции растениеводства и животноводства. Зоотехния

- Е.А. Городецкая, А.Д. Сыч, Ю.К. Городецкий, Е.Т. Титова**
Комбинированная предпосевная обработка семян укропа и кориандра.....15

Энергетика. Транспорт

- Д.И. Кривовязенко, Е.М. Заяц**
Методика расчета электрокоагулятора белков молочной сыворотки.....20
- В.А. Ковалев, А.В. Крутов, Е.А. Ковширко**
Замена реагентной подготовки сточных вод молочных комбинатов в схеме биологической очистки их электрообработкой.....23
- Е.М. Прищепова**
Разработка системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя фуражного зерна.....27
- О.В. Бондарчук**
Моделирование процесса изменения влагосодержания зерна ячменя под действием электрического поля.....40

Технический сервис в АПК. Экономика

- Н.В. Киреенко**
Развитие аграрного бизнеса в контексте обеспечения продовольственной безопасности Республики Беларусь.....45

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Г.И. Гедроить,

зав. каф. тракторов и автомобилей БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.В. Занемонский,

ст. преподаватель каф. тракторов и автомобилей БГАТУ

А.В. Бобрышов,

доцент каф. механики и компьютерной графики ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», канд. техн. наук, доцент (г. Ставрополь, Российская Федерация)

С.И. Оскирко,

доцент каф. тракторов и автомобилей БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье приведены математическая модель и результаты аналитических исследований по обоснованию параметров ходовых систем транспортно-технологических сельскохозяйственных машин.

Ключевые слова: шина, грузоподъемность, деформация почв, сопротивление качению, ширина шин, количество осей.

The article presents the mathematical model and the results of analytical studies to validate the parameters of the drive system of transport and technological agricultural machinery.

Keywords: tire, carrying capacity, soil deformation, rolling resistance, tire width, number of axles.

Введение

В условиях современного сельского хозяйства увеличиваются площади сельскохозяйственных предприятий, расстояния транспортировки продукции, мощность используемых тракторов. У машинно-тракторных агрегатов, работающих с машинами для внесения органических и минеральных удобрений, прицепами, транспортировщиками рулонов, по одному следу проходят 4...5 колес, растет общая масса машин. Поэтому важно оценить показатели взаимодействия ходовых систем таких машин с опорным основанием и разработать рекомендации по их совершенствованию.

При теоретических исследованиях процесса взаимодействия колесных ходовых систем с почвой получили распространение плоские расчетные схемы, при которых колесо рассматривается единичной ширины, а форма проекции поверхности его контакта в плоскости опорного основания – в виде прямоугольника. В действительности процесс сложнее, пневматические шины имеют кривизну в поперечной плоскости, и это необходимо учитывать в расчетах [1, 2].

Цель настоящей работы – разработать рекомендации по совершенствованию ходовой системы для транспортно-технологической машины, агрегируемой с трактором тягового класса 3, на основании математической модели, комплексно учитывающей основные параметры шин и почв.

Основная часть

Поверхность контакта колеса с плоскостью можно представить в виде усеченного эллиптического параболоида [2, 3]. В этом случае поверхность контакта состоит из плоской зоны контакта, являющейся эллипсом или усеченным эллипсом и криволинейной, являющейся частью параболоида.

На рисунке 1 выделены несколько возможных областей в проекции поверхности контакта на плоскость опорного основания движущегося колеса. Принимаемое сочетание областей зависит от соотношения деформации почвы h , радиальной деформации шины λ и стрелы дуги протектора (высоты беговой дорожки) шины Δ . При небольшом погружении шин в почву ($h + \lambda \leq \Delta$) в расчетах учитываются все области (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5), при погружении в почву протектора и частично боковин ($h + \lambda > \Delta$) не учитываются области D_5 , при значительных деформациях шин ($\lambda > \Delta$) и глубине следа учитываются только области D_1 и D_3 .

Расчет глубины следа h и составляющей силы сопротивления качению от деформации почвы $P_{\text{фн}}$ для любого колеса производится исходя из приведенных ниже выражений.

При деформации шин, меньших или равных значению стрелы дуги протектора шин ($\lambda \leq \Delta$), расчетные формулы имеют вид:

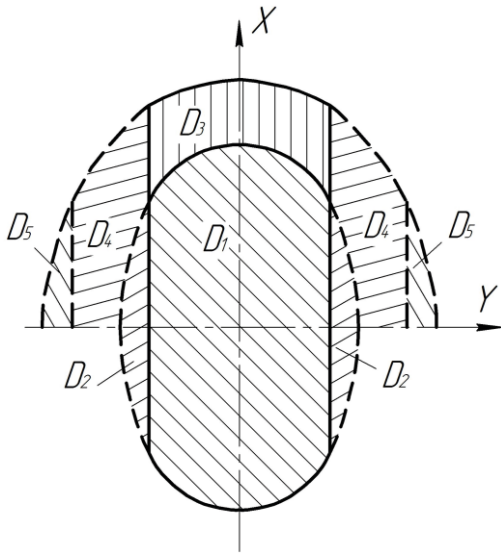


Рисунок 1. Проекция поверхности контакта шин на опорное основание

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{\text{пл}}}{\pi b_0 \sigma_0 \lambda} \sqrt{\frac{\Delta}{2R - \lambda}} - h_{s1}; \quad (1)$$

$$G = \frac{\pi b_0 \sigma_0^2}{2K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{\text{пл}} -$$

$$- b_0 \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}} - 1 \right) \sqrt{(2R - h - \lambda)(h + \lambda - \Delta)} \cdot$$

$$\cdot th \frac{K}{\sigma_0} \left(\frac{5}{9} (h + \lambda - \Delta) + h_{s1} \right); \quad (2)$$

$$P_{f\text{п}} = 2 \frac{b_0 \sigma_0^2}{K} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h + \lambda - \Delta)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} +$$

$$+ \omega K b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}}, \quad (3)$$

где σ_0 – несущая способность почвы, Н/м²;
 K – коэффициент объемного смятия почвы, приведенный к размерам колеса, Н/м³;
 $2b_0$ – ширина беговой дорожки шины, м;
 R – свободный радиус колеса, м;
 h_{s1} – средняя остаточная глубина следа от предшествующих колес, м;
 ω – расчетный коэффициент, зависящий от параметров шины и контакта;

G – нормальная нагрузка на колесо, Н;

$G_{\text{пл}}$ – часть нагрузки, воспринимаемая в плоской части контакта шины с почвой, Н.

При деформации шин больших, чем стрела дуги протектора ($\lambda > \Delta$), расчеты выполняются по формулам:

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{\text{пл}}}{2b_0 \sigma_0 \sqrt{(2R - \lambda)\Delta}} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}} - 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \arcsin \sqrt{\frac{\Delta}{\lambda}} \right) - h_{s1}; \quad (4)$$

$$G = \frac{\alpha b_0 \sigma_0^2}{K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{\text{пл}}; \quad (5)$$

$$P_{f\text{н}} = \frac{2b_0 \sigma_0^2}{K} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}}, \quad (6)$$

где α – расчетный коэффициент, зависящий от параметров шины и контакта.

Соответствующую составляющую силы сопротивления качению и суммарную силу сопротивления качению определяем по формулам:

$$P_{f\text{ш}} = K_{\text{ш}} B_{\text{к}} \lambda, \quad (7)$$

$$P_f = P_{f\text{п}} + P_{f\text{ш}}, \quad (8)$$

где P_f – сила сопротивления качению колеса, Н;

$P_{f\text{п}}$ – составляющая силы сопротивления качению из-за деформации почвы, Н;

$P_{f\text{ш}}$ – составляющая силы сопротивления качению из-за деформации шины, Н;

$B_{\text{к}}$ – ширина плоской зоны контакта шины с почвой, Н;

$K_{\text{ш}}$ – давление шины на дорогу при нулевом значении давления воздуха в шине, Н/м².

При выполнении расчетов по приведенным формулам в первую очередь определяется глубина следа при совместном решении уравнений (1), (2) или (4), (5). Варьируя значениями λ и связанной с ними через характеристику шины на жестком основании нагрузкой $G_{\text{пл}}$, путем последовательных пересчетов, добиваемся равенства левой и правой частей уравнений (2) или (5).

Используя приведенные формулы, можно рассчитать глубину следа и силу сопротивления качению любого колеса, а путем суммирования составляющих – всего агрегата. Для первого колеса в формулах принимается $h_{s1} = 0$. Определение параметров, применяемых в модели, более подробно изложено в работах [2, 4, 5].

Аналитическое исследование влияния отдельных параметров шин на показатели взаимодействия с почвой показывает, что их улучшение в полевых условиях можно обеспечить как традиционным увеличением габаритов шин, так и улучшением их деформационных характеристик, уменьшением кривизны в поперечной плоскости.

Рассмотрим рациональные направления совершенствования ходовых систем транспортно-технологических машин на примере машин для внесения жидких органических удобрений (МВОУ), агрегируемых с трактором типа «БЕЛАРУС-2022» (тяговый класс 3). В качестве базовой принята машина МЖТ-Ф-11 грузоподъемностью 11 т, массой 3,95 т, которая оборудуется балансирной тележкой с четырьмя шинами 16,5/70-18, мод. КФ-97. Давление воздуха в шинах составляет 370 кПа.

Анализ конструкций МВОУ и возможности применения новых моделей шин типа 24,0/50-22,5, 700/50-22,5 [3, 5] показывает, что наибольший их диаметр составляет 1300 мм. Это ограничено поперечной устойчивостью машин и компоновочными соображениями. Принимаем постоянными: посадочный диаметр шин, стрелу дуги протектора и относительную деформацию шин. Их значения, исходя из проведенного анализа, принимаем равными 0,508 м (20 дюймов), 0,07 м и 0,23 м. Последний параметр, отражающий отношение допустимой деформации шины к высоте ее профиля, больше, чем у шины 16,5/70-18 на 14 %, что отражает указанную ранее целесообразность улучшения деформационных свойств шин.

Наиболее просто при принятых ограничениях варьировать шириной шин, так как это не требует принципиального изменения конструкции МВОУ. Допускаем, что колея машин соответствует колее трактора, а на сцепное устройство передается часть нагрузки от машины, равная 17 кН, отношение веса машины к грузоподъемности составляет 36 %. Последние два значения приняты исходя из параметров серийной машины. При заданных размерах шин и интервале отношения высоты профиля шины H к его ширине B в пределах 0,3...0,8 [6] интервал возможного изменения ширины профиля шин составляет 0,5...1,3 м.

На рисунке 2 приведены расчетные зависимости силы сопротивления качению и глубины следа машин разной грузоподъемности G_r , агрегируемых с трактором «БЕЛАРУС-2022», по слежавшейся зяби ($K = 10 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$; $\sigma_0 = 8,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) от ширины шин. Графики силы сопротивления качению (рис. 2а) построены из расчета движения агрегата на подъем с углом 3° .

Увеличение ширины шин в определенном интервале позволяет снизить силу сопротивления качению. При грузоподъемности 11 т такое снижение наблюдается до $B = 0,85 \text{ м}$, при грузоподъемности 13 т – до $B = 1,25 \text{ м}$, при грузоподъемности 14,5 и 16 т минимум силы сопротивления качению в исследованном интервале не установлен. Минимальное значение силы сопротивления качению машины грузоподъемностью 11 т в 1,6 раза ниже, чем у серийной (на рисун-

ках значения показателей серийной машины ограничены горизонтальной штриховой линией), грузоподъемностью 13 т – в 1,3 раза. Следовательно, для реализации равных тягово-сцепных свойств трактора, машины с ходовыми системами, оборудованными шинами низкого давления, имеют значительный резерв повышения грузоподъемности.

Примем за базовое значение силу сопротивления качению серийной машины, так как коэффициент загрузки двигателя трактора, агрегируемого с серийными МВОУ, составляет 70...90 %. Это в среднем соответствует предельному (80 %) на операции внесения удобрений [7]. Пересечение кривых изменения силы сопротивления качению со штриховой линией на рисунке 2а позволяет определить ширину шин и грузоподъемность МВОУ, обеспечивающих силу сопротивления качению, равную силе сопротивления качению серийной машины. Например, при $G_r = 14,5 \text{ т}$ ширина шины должна быть около 0,95 м. При максимальной ширине шины $B = 1,3 \text{ м}$ трактор «БЕЛАРУС-2022» можно агрегировать с машиной грузоподъемностью около 15,0 т. Следовательно, благодаря совершенствованию ходовой системы, грузоподъемность

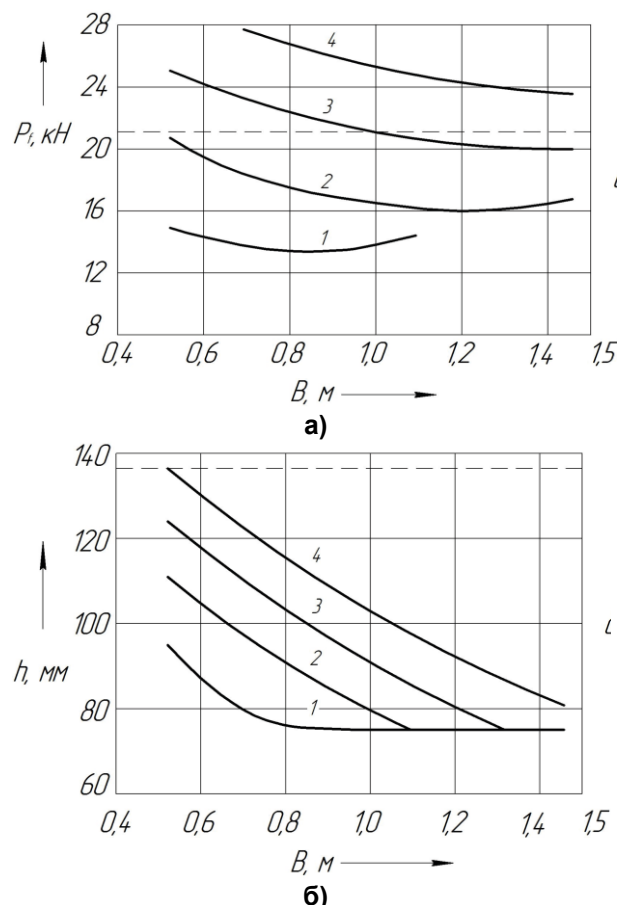


Рисунок 2. Зависимости силы сопротивления качению (а) и глубины следа (б) двухосной МВОУ, агрегируемой с трактором «БЕЛАРУС-2022» по слежавшейся зяби, от ширины шин и грузоподъемности машины: 1 – $G_r = 11 \text{ т}$; 2 – $G_r = 13 \text{ т}$; 3 – $G_r = 14,5 \text{ т}$; 4 – $G_r = 16 \text{ т}$

машины с традиционной компоновкой может быть увеличена в 1,3...1,4. Одновременно снижается деформация почвы в следах (рис. 2б). Так, при указанных выше грузоподъемности 14,5 т и ширине шин 0,95 м значение глубины следа составляет 0,092 м. Это ниже, чем у агрегата с серийной машиной в 1,5 раза. При ширине шин свыше одного метра, глубина следа для всех предлагаемых вариантов в основном определяется движителями трактора. Однако отметим, что ширина следов машины превышает ширину следа трактора (ширина шин 0,58 м).

С увеличением ширины шины увеличивается ее объем и, следовательно, заданная допустимая деформация шин обеспечивается при меньшем давлении воздуха. Выполненные расчеты показывают, что если в шинах шириной 0,5 м давление воздуха должно составлять 200 кПа, то в шинах шириной 1,3 м – 90 кПа. В связи с этим, по оценке авторов, значение коэффициента сопротивления качению МБОУ на дороге с асфальтированным покрытием составит соответственно 0,021 и 0,030. Для серийных машин в этих условиях значение указанного коэффициента составит 0,014. Однако определяющими являются почвенные условия.

Реализация предлагаемых технических решений ограничена компоновкой машин и нормативной документацией. Так, при выполнении транспортных работ по дорогам общего пользования, габарит машин по ширине не должен превышать 2,55 м. Обеспечить это возможно при внесении изменений в ходовую систему машин при ширине шин 0,55...0,70 м. Поэтому целесообразно рассмотреть изменение показателей взаимодействия с почвой ходовых систем с увеличенным количеством осей.

Результаты расчетов при заданных ранее параметрах для трехосных и четырехосных МБОУ приведены на рис. 3. В сравнении с двухосным вариантом трехосный и четырехосный позволяют снизить деформации почвы при всех нагрузках и ширине шин. При грузоподъемности четырехосной машины 16 т отмечается отсутствие дополнительных деформаций почвы по отношению к деформациям колесами трактора. В действительности они присутствуют из-за разрушения почвы после почвозацепов, перетирания почвы и др. [8]. Рост силы сопротивления качению для четырехосной МБОУ отмечается уже при значениях ширины колес, близких к 0,5 и 0,8 м, соответственно, при грузоподъемности машин 16 и 17,5 т. Это связано с тем, что глубина следов после прохода трактора теоретически не увеличивается. Основной рост силы сопротивления качению обусловлен возрастанием внутренних потерь в шинах и дополнительной деформацией из-за превышения ширины следов машины по отношению к следу трактора.

Можно предположить, что при принятых ограничениях в эксплуатации машин, наиболее рационально модернизировать ходовую систему серийной машины путем применения шин, шириной около 0,6 м в трехосном варианте грузоподъемностью до 16 т. При этом значение силы сопротивления качению машин в средних полевых условиях будет соответство-

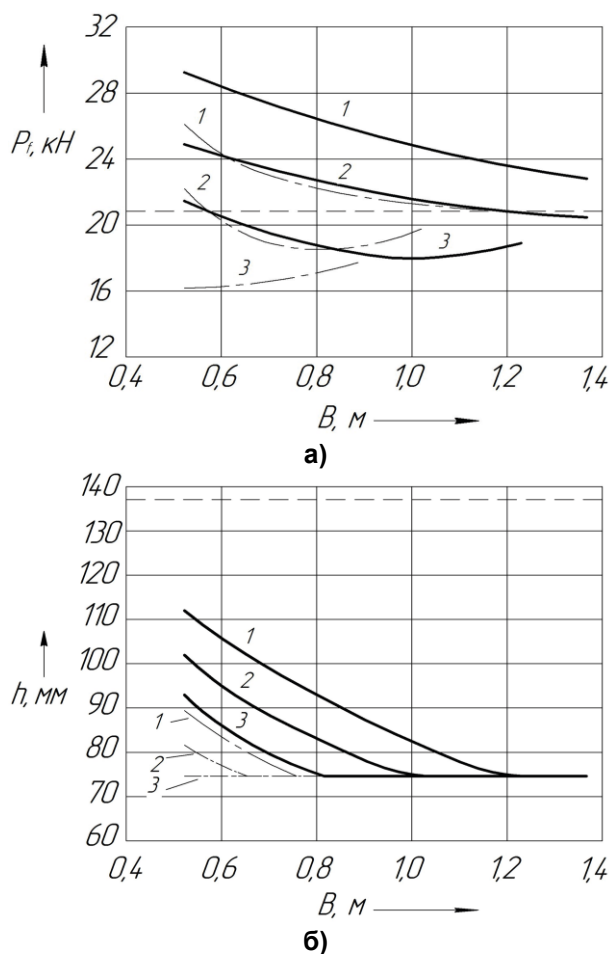


Рисунок 3. Зависимость силы сопротивления качения (а) и глубины следа (б) трехосной (---) и четырехосной (—) МБОУ, агрегируемых с трактором «БЕЛАРУС-2022», по слежавшейся язби от ширины колес и грузоподъемности:

1 – $G_r = 19$ т; 2 – $G_r = 17,5$ т; 3 – $G_r = 16$ т

вать серийным. Незначительно возрастают деформации почвы после трактора, не увеличивается уплотняемая площадь поля из-за разности ширины шин машины и трактора. Другие параметры шин должны соответствовать заданным: диаметр шин – 1,3 м; относительная деформация шин – 23 %; стрела дуги протектора – до 0,07 м.

Приведенная методика может быть применена для расчета любых транспортно-технологических машин в соответствующих условиях эксплуатации при заданных параметрах шин.

Заключение

Предложенные математические модели (1) – (6) позволяют рассчитать показатели взаимодействия с почвой многоосных агрегатов при различных размерах и конструктивных особенностях шин и нагрузках на колеса.

Модернизация двухосных ходовых систем МБОУ, агрегируемых с трактором тягового класса 3 путем увеличения ширины шин и снижения давле-

ния воздуха в них, эффективна. При этом обеспечивается уменьшение глубины следов при одновременном повышении грузоподъемности машин и сохранении коэффициента загрузки двигателя трактора.

Для минимизации уровня воздействия на почву ходовых систем указанных МВОУ рекомендуется создание четырех- и трехосных ходовых систем при грузоподъемности машин около 16 т. Ориентировочные значения параметров шин: диаметр – 1300 мм, ширина – 500...600 мм, посадочный диаметр – 0,508 м (20 дюймов), стрела дуги протектора – 70 мм, относительная деформация – 23 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 242 с.
2. Гедроить, Г.И. Взаимодействие с почвой многоколесных ходовых систем / Г.И. Гедроить, А.Г. Гедроить, А.Д. Четкин // Агропанорама. – 2012. – № 5. – С. 2-7.
3. Гедроить, Г.И. Совершенствование профиля пневматических шин для сельскохозяйственной техни-

ники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 2-5.

4. Гедроить, Г.И. Сопротивление качению ведомых пневматических колес / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2010. – № 1. – С. 26-30.

5. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009. – № 4. – С. 23-27.

6. Гедроить, Г.И. Расчет нормируемых показателей воздействия колесных движителей на почву на стадии проектирования машин / Г.И. Гедроить // Современная сельскохозяйственная техника. Исследование, проектирование, применение: матер. Междунар. научно-практич. конф., Минск, 26-28 мая 2010 г.: в 2-х ч. – Минск: БГАТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 126-129.

7. Трепененков, И.И. Об использовании мощности сельскохозяйственных тракторов / И.И. Трепененков, В.И. Мининзон // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – № 3. – С. 13-15.

8. Скотников, В.А. Проходимость машин / В.А. Скотников, А.В. Пономарев, А.В. Климанов. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 328 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 30.01.2020

УДК 631.365.22:62.662.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ТОПЛИВА В ТОПОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В.В. Поддубицкий,

*науч. сотр. сектора «Технологии утилизации отходов» ГП «Институт энергетики НАН Беларуси»,
магистр техн. наук*

В.Н. Дашков,

докт. техн. наук, профессор

В.П. Чеботарев,

зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье представлены результаты теоретических исследований движения топливной частицы после отрыва ее от винтовой поверхности рабочего органа распределителя топлива в слоевой топке воздухонагревателя зерносушилки.

Ключевые слова: винтовая поверхность, топливные частицы, силы, оси, скорость.

The article presents the results of theoretical studies of the fuel particle movement after detaching it from the screw surface of the fuel distributor in a layer furnace of a grain dryer air heater.

Keywords: screw surface, fuel particles, forces, axes, speed.

Введение

Одной из важнейших операций послеуборочной обработки зерна является его сушка. Для обеспечения качественной и своевременной сушки применяются зерносушилки, работающие на природном газе, дизельном топливе и твердых видах местного топлива. С целью экономии бюджетных средств при закупке углеродного топлива, в последнее время были разработаны твердотопливные воздухонагреватели зерносушилок

различной конструкции. Одной из принципиально новых конструкций твердотопливных топков воздухонагревателей является слоевая топка с неподвижной колосниковой решеткой и распределителями топлива. В таких топках мелкофракционное топливо подается гравитационным способом, и после распределения падает и частично сгорает в топочном пространстве.

Горению мелкофракционного топлива в топочном пространстве посвящены работы выдающихся советских ученых в области физики и химии горения:

Л.Н. Хитрина [1] и Б.В. Канторовича [2, 3]. В них подробно описывается горение топливной частицы в ламинарном и турбулентном воздушных потоках, однако не уделено внимание движению топливной частицы с заданными начальными условиями скорости движения. Поэтому целью настоящей работы является изучение зависимости движения горящей топливной частицы, получившей начальную скорость и направление при сходе с винтовой поверхности рабочего органа распределителя топлива.

Основная часть

После отрыва частицы топлива от винтовой поверхности, она начинает движение в топочном пространстве. Начальная скорость частицы $\vec{v}_{q0}$ равна скорости движения ее в момент отрыва от поверхности витка. Проекция скорости $\vec{v}_{q0}$ на оси имеет вид:

$$OX : v_{q0X} = \frac{\omega S}{2\pi}; \quad (1)$$

$$OY : v_{q0Y} = \omega r_{omp} \operatorname{tg} \alpha; \quad (2)$$

$$OZ : v_{q0Z} = -2\pi\omega r_{omp}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения шнека, с⁻¹;

S – шаг витка, м;

α – угол подъема винтовой линии, град.

Принимая, что при $r_{кр}$ отрыв топливной частицы от винтовой поверхности невозможен, радиус отрыва r_{omp} будет лежать в пределах $r_{кр} > r_{omp} > r$.

В полете (рис. 1.) на частицу действует ряд сил: сила тяжести G , сила Архимеда F_A , реактивная сила F_R , сила подпора F_{Π} (сила сопротивления воздушной среды или сила лобового сопротивления), подъемная сила $F_{под}$ и сила присоединенных масс F_m . В некоторых конструкциях твердотопливных топок воздушно-нагревателей предусмотрен дымоход с естественной или искусственной тягой, а также она может оснащаться устройством поддува вторичного воздуха под колосники. В этом случае на частицу топлива будет действовать сила тяги $F_{тяги}$ и сила поддува $F_{поддув}$.

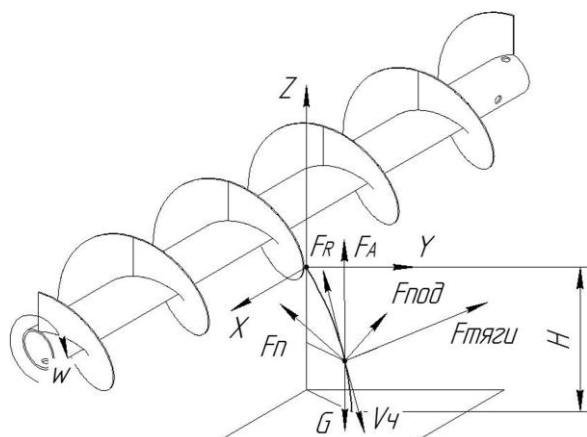


Рисунок 1. Траектория движения топливной частицы в пространстве после взаимодействия с винтовой поверхностью

Принимается, что в топке принудительного дутья нет. Закон сохранения движения для топливной частицы будет иметь вид:

$$m_q \frac{dv_q}{dt} + \vec{v}_q \frac{dm_q}{dt} = \vec{G} + \vec{F}_A + \vec{F}_R + \vec{F}_{тяги} + \vec{F}_{\Pi} + \vec{F}_{под} + \vec{F}_m, \quad (4)$$

где v_q – скорость частицы, м/с;

t – время, с;

m_q – масса частицы, кг.

После расположения центра прямоугольной системы координат в точке отрыва частицы от винтовой поверхности, ось OZ примет направление вертикально вверх, ось OX – вдоль оси вращения винтовой поверхности, которая лежит в продольном сечении топочного пространства. Ось OY находится в этой же плоскости перпендикулярно к оси OX.

Сила тяжести равна:

$$\vec{G} = m_q \vec{g}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Значения ее проекций на оси OX и OY равны нулю.

Сила Архимеда в случае полета частицы с воздействием сдвига воздушного потока действует по оси OZ и направлена в противоположную сторону действию силы тяжести. В векторной форме сила Архимеда имеет вид [4]:

$$\vec{F}_A = -m_q \frac{\rho}{\rho_q} \vec{g}, \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха в нормальных условиях, кг/м³;

ρ_q – плотность топлива, кг/м³.

После исключения собственного вращения частицы и при условии, что она выгорает несимметрично [2], скорость выгорания в фронтальной полусфере выше, чем выгорание в задней, а скорость отделения продуктов сгорания зависит от вида и химического состава топлива и ориентировочно составляет 140...200 м/с [1]. Возникающая результирующая реактивная сила F_R будет противоположна вектору скорости движения частицы. Создающийся огненный след окутывает боковые и тыльную поверхности частицы, препятствуя подводу кислорода, отделение газов происходит только из фронтальной полусферы [1].

Реактивная сила F_R описывается уравнением:

$$\vec{F}_R = -\vec{v}_{газ} \frac{dm_q}{dt}, \quad (7)$$

где $v_{газ}$ – скорость отделения газов (скорость отделения продуктов сгорания), м/с.

Сила тяги направлена в сторону выходного отверстия, расположенного в торцевой стенке прямоугольной топки, через которое истекают дымовые газы. Относительно направления движения топливной частицы и направления вращения винтовой поверхности, сила тяги может быть направлена по ходу движения топливной частицы или против ее хода. Следовательно, $F_{тяги}$ будет либо увеличивать скорость полета частицы, уменьшая время нахождения

ее в зоне горения, либо затормаживать частицу, что позволяет более эффективно сжечь ее в полете.

В векторной форме сила тяги $F_{тяги}$ равна [3]:

$$\vec{F}_{тяги} = k_x \gamma_z S_q \frac{\vec{\omega}_v |\vec{\omega}_v|}{2\vec{g}}, \quad (8)$$

где ω_v – относительная скорость частицы, м/с [5];

γ_z – удельный вес газа, н/м³;

k_x – коэффициент лобового сопротивления,

$$k_x = \frac{24\mu g}{\omega_v d_q \gamma_z};$$

d_q – диаметр частицы, м;

μ – коэффициент динамической вязкости среды, Па · с;

$$S_q = \pi r_q^2 – \text{площадь миделевого сечения, м}^2.$$

Относительная скорость частицы равна $\vec{\omega}_v = \vec{U} - \vec{v}_q$;

где U – скорость воздушного потока, м/с;

Так как соотношение длины и ширины топki больше 1, принимается, что воздушные потоки, проходящие через колосниковые решетки, отверстия на лицевой стороне топki (конструктивные отверстия в дверцах) и через топливный бункер над винтовой поверхностью, перемешиваются и действуют только в направлении оси OX.

Сила подпора действует в противоположном направлении направлению движения частицы. Так как частица движется не только под действием силы тяжести, но и имеет горизонтальный снос воздушным потоком, то сила подпора будет действовать по двум плоскостям:

в вертикальной плоскости, совпадая с осью OZ [4, 6]

$$\vec{F}_{Iz} = k_x \gamma_z S_q \frac{\vec{\omega}_s |\vec{\omega}_s|}{2\vec{g}}, \quad (9)$$

$$\text{где } \omega_s = \sqrt{\frac{4\gamma_z d_q g}{3\gamma_z k_x}} = \sqrt{\frac{8\gamma_z r_q g}{3\gamma_z k_x}} – \text{скорость вита-}$$

ния, м/с;

в горизонтальной плоскости [4, 7, 8, 9, 10]

$$\vec{F}_{Ixy} = C_T \frac{\rho \vec{\omega}_v |\vec{\omega}_v|}{2} S_q, \quad (10)$$

где C_T – коэффициент лобового сопротивления.

Коэффициент лобового сопротивления можно

$$\text{записать в виде: } C_T = \frac{24}{Re} = \frac{12\mu}{\rho r_q \vec{\omega}_v},$$

где Re – число Рейнольдса.

Подъемная сила $F_{под}$ действует перпендикулярно направлению движения топливной частицы [7, 8, 9]:

$$F_{под} = C_Y \frac{\rho \vec{v}_q |\vec{v}_q|}{2} S_q, \quad (11)$$

где C_Y – коэффициент подъемной силы, зависящий от ориентации частицы в пространстве (угла атаки).

При нестационарном движении, на частицу дополнительно действует сила присоединенных масс,

направленная противоположно вектору ускорения частицы [4, 11]

$$\vec{F}_m = -\frac{2}{3} \rho \pi r_q^3 \frac{d\vec{v}_q}{dt}. \quad (12)$$

Так как подъемная сила имеет незначительное влияние на движение частицы, а плотность частицы многократно выше плотности среды, то при расчетах подъемной силой и силой присоединенных масс можно пренебречь [6].

Таким образом, с учетом вышеизложенного, уравнения движения топливной частицы вдоль осей будут иметь вид [10, 12]:

$$OX: m_q \frac{dv_{qx}}{dt} + v_{qx} \frac{dm_q}{dt} = -F_{Rx} + F_{тягиx} - F_{Ix}; \quad (13)$$

$$OY: m_q \frac{dv_{qy}}{dt} + v_{qy} \frac{dm_q}{dt} = -F_{Ry} + F_{тягиy} - F_{Iy}; \quad (14)$$

$$OZ: m_q \frac{dv_{qz}}{dt} + v_{qz} \frac{dm_q}{dt} = G - F_A - F_{Rz} - F_{Iz}, \quad (15)$$

где v_x, v_y, v_z – проекции скоростей движения топливной частицы, соответственно на оси OX, OY и OZ.

После преобразования и подстановки в уравнения (13-15) значения сил, система уравнений будет равна:

$$\left. \begin{aligned} OX: m_q \frac{dv_{qx}}{dt} - v_{qx} \frac{dm_q}{dt} &= v_{zaz} \frac{dm_q}{dt} + 6\mu\pi(U - v_{qx})[r_q - 1]; \\ OY: m_q \frac{dv_{qy}}{dt} - v_{qy} \frac{dm_q}{dt} &= v_{zaz} \frac{dm_q}{dt} - 6\mu\pi v_{qy}(r + 1); \\ OZ: m_q \frac{dv_{qz}}{dt} - v_{qz} \frac{dm_q}{dt} &= m_q \frac{\rho}{\rho_q} g + v_{zaz} \frac{dm_q}{dt}; \\ \frac{dm_q}{dt} &= -4\pi\rho_q \sqrt{\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}} \cdot \frac{k'Mc_0}{\gamma_q} \cdot \left[1 - \frac{1}{\alpha_T} + \frac{\sqrt{\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}}}{r_{q0}\varepsilon} - \frac{\sqrt{\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}}}{r_{q0}\varepsilon\alpha_T} + \frac{3m_q}{r_{q0}^3\alpha_T} + \frac{\left(\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}\right)^2}{r_{q0}^4\varepsilon\alpha_T} \right]; \\ \frac{dx}{dt} &= v_{qx}; \\ \frac{dy}{dt} &= v_{qy}; \\ \frac{dz}{dt} &= v_{qz}. \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

где α_T – коэффициент избытка воздуха, кг/кг (м³/м³);

ε – отношение внешней реакционной поверхности к внутренней;

c_0 – начальная весовая концентрация газа, кг/м³;

M – стехиометрический коэффициент реакции;

k' – суммарная константа скорости реакции процесса, моль/с.

После решения системы уравнений (16) методом Рунге-Кутты, в программе VBA был построен график изменения траектории движения топливной частицы в топочном пространстве (рис. 2).

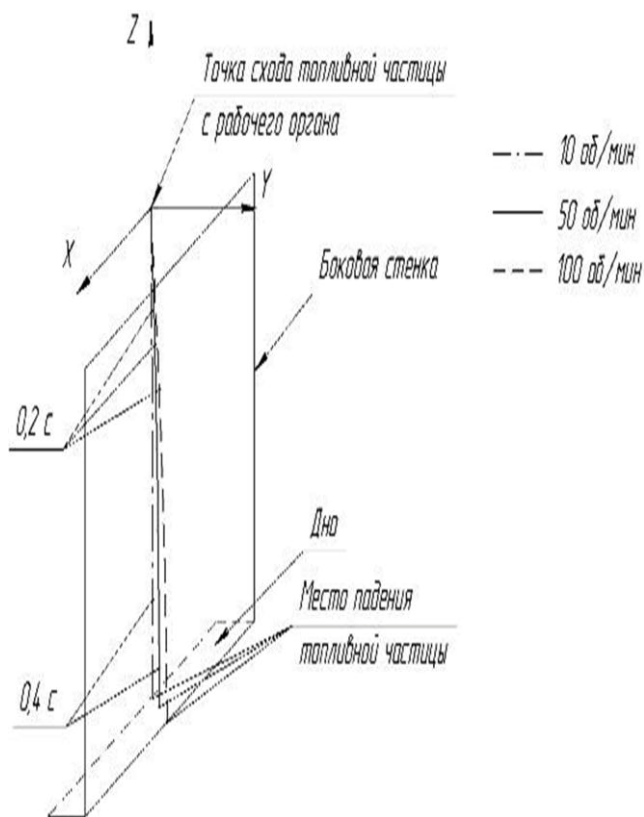


Рисунок 2. График изменения траектории движения топливной частицы

Анализ графика показал, что основное перемещение топливной частицы происходит по осям OX и OZ .

При изменении частоты вращения рабочих органов удалось достичь улучшения равномерности распределения топлива от 34 до 69 %, в зависимости от топлива.

Заключение

В результате теоретических исследований установлено, что конструктивно-кинематические параметры рабочих органов распределителей топлива существенно влияют на параметры движения горячей топливной частицы в топочном пространстве. Так, изменяя частоту вращения рабочих органов и учитывая количество подаваемого в топочное пространство воздуха и его скорость, можно добиться улучшения распределения топлива, полноты его сгорания и уменьшить тепловое и весовое воздействие на колосниковую решетку.

При экспериментальном подтверждении теоретических исследований, при частоте вращения рабочих органов 50 об/мин, было достигнуто снижение неравномерности распределения от 34 до 69 % в зависимости от вида топлива. Это позволило уменьшить химический и механический недожог топлива и, соответственно, снизить вредные выбросы в окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хитрин, Л.Н. Горение углерода / Л.Н. Хитрин, О.А. Цуханова // Успехи физических наук: вып. 3. – М, 1950. – Т. 41. – С. 312-330.
2. Канторович, Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М: Государственное науч.-технич. издат-во литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 362 с.
3. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива: монография / Б.В. Канторович. – М.: Издат-во академии наук СССР, 1958. – 601 с.
4. Архипов, В.А. Движение частицы дисперсной фазы в несущей среде: учеб. пос./ В.А. Архипов, А.С. Устинина. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с.
5. Рудаков, О.А. Определение параметров турбулентности потока газа в камере сгорания на основе интегрирования и преобразований уравнения Рейнольдса и Навье-Стокса / О.А. Рудаков, В.А. Митрофанов // Вестник Самарского гос. аэрокосмического университета. – 2002. – № 2. – С. 92-96.
6. Финягин, А.П. Влияние давления воздуха на процесс горения твердого топлива / А.П. Финягин, Н.И. Баринев, М.Н. Коробова // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1969. – С. 20-24.
7. Иванов, С.А. Газовая динамика: лабораторный практикум / С.А. Иванов. – Самара: Самар. гос. техн. университет, 2014. – 61 с.
8. Стариков, Ю.Н. Основы аэродинамики летательного аппарата: учеб. пос. / Ю.Н. Стариков, Е.Н. Коврижкин. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – 151 с.
9. Соболев, А.А. Движение частицы в воздушном потоке / А.А. Соболев, П.А. Мельников, А.О. Тютюнник // Вектор науки ТГУ. – Томск: ТГУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 82-86.
10. Пирумов, А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации / А.И. Пирумов. – М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 124 с.
11. Гольдштик, М.А. Элементарная теория концентрированных дисперсных систем / М.А. Гольдштик, Б.Н. Козлов // Прикладная механика и теоретическая физика. – Новосибирск: Сибирское отделение Академии наук СССР, 1973. – № 4. – С. 67-77.
12. Мещерский, И.В. Работы по механике тел переменной массы / И.В. Мещерский. – М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1952. – 281 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 14.01.2020

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП ПАРОВЫХ КУЛЬТИВАТОРОВ

К.В. Борак,

зам. директора Житомирского агротехнического колледжа, канд. техн. наук (г. Житомир, Украина)

С.М. Герук,

*зав. каф. агроинженерии Житомирского агротехнического колледжа,
канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. (г. Житомир, Украина)*

И.С. Крук,

проректор по научной работе – директор НИИМЭСХ БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье приведены результаты экспериментальных исследований износостойкости и долговечности стрельчатых лап паровых культиваторов. Определены рациональные конструктивные, технологические и эксплуатационные методы повышения долговечности стрельчатых лап культиваторов с учетом почвенно-климатических условий их эксплуатации.

Ключевые слова: стрельчатая лапа, изнашивание, сталь, долговечность, упрочнение.

The article presents the results of experimental studies of wear resistance and durability of cultivator sweeps for broadcast tillage. Rational constructive, technological and operational methods have been determined to increase the durability of cultivator sweeps taking into account the soil and climatic operating conditions.

Keywords: cultivator sweep, wear, steel, durability, hardening.

Введение

В результате абразивного износа потери ВВП в развитых странах мира составляют от 1 до 4 % [1]. В агропромышленном комплексе наибольшему абразивному износу подвергаются рабочие органы почвообрабатывающих машин вследствие взаимодействия с почвенной средой. Почвообрабатывающие машины занимают одно из ведущих мест в структуре машинно-тракторного парка современных сельскохозяйственных предприятий. Потеря их работоспособного состояния во время проведения полевых работ вследствие нарушения сроков выполнения операций может существенно повлиять на урожайность. Поиск путей повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин имеет большое значение для агропромышленного комплекса. Имеющаяся тенденция повышения рабочих скоростей машин, снижение их металлоемкости и повышение долговечности неразрывно связаны с проблемой износостойкости, влияющей на качество выполняемого технологического процесса [2].

Цель настоящей работы – поиск методов повышения долговечности и износостойкости стрельчатых лап культиваторов для сплошной обработки почвы с учетом почвенно-климатических условий и режимов их эксплуатации.

Основная часть

Многофункциональные возможности стрельчатых лап привели к созданию большого количества их конструкций, отличающихся спецификой износа [3]. Процесс изнашивания культиваторных лап характеризу-

ется высокой интенсивностью из-за непосредственного контакта со сложной абразивной массой – почвой.

Основной причиной потери работоспособного состояния стрельчатых лап является износ носка и крыльев по ширине (рис. 1а). Возможны также и другие выбраковочные показатели (обламывания крыльев, износ крепежной части (рис. 1б), трещины и т.п.). Несмотря на то, что стрельчатые лапы – это симметричные рабочие органы, возможен неравномерный износ крыльев (рис. 1а), что связано с неправильной подготовкой агрегата к работе.

При эксплуатации стрельчатых культиваторных лап износ поверхности носит неоднородный характер. Носок лапы испытывает наибольшую нагрузку, соответственно и интенсивность его изнашивания будет выше, чем изнашивание других частей. При изготовлении культиваторных лап из стали 65Г, 70Г, 40ХС выбраковка лапы происходит из-за преждевременного износа носка. В процессе работы уменьшается его толщина и снижается прочность, что приводит к изгибу и обламыванию кончика носка (рис. 2).

В работе [4] установлено, что достижение предельного состояния стрельчатыми лапами, изготовленными из высококачественных износостойких сталей, определяется износами на 97 %, а изгибами, скручиваниями, трещинами и изломами – на 3 %. Зайцев С.А. в работе [5] приводит другую закономерность распределения предельного состояния для лап, изготовленных из сталей 65Г, 70Г, 40ХС, утверждая, что 60 % определяются износами, а 40 % приходится на изгибы, скручивания, трещины и изломы.



а)



б)

Рисунок 1. Причины потери работоспособного состояния стрелчатых лап: а – износ носка и крыльев по ширине (на примере новой и изношенной лап); б – износ крепежной части

Как известно, повысить долговечность и износостойкость деталей машин возможно тремя группами методов: конструктивными, технологическими и эксплуатационными. В результате обобщения информации по проблеме повышения долговечности стрелчатых лап, сделаны выводы, что свыше 90 % работ посвящены технологическим [3-10], около 8 % конструктивным [4, 9] и приблизительно 2 % – эксплуатационным методам повышения долговечности. Работы, которые посвящены конструктивным методам, рассматриваются в комплексе с технологическими методами.



Рисунок 2. Носок культиваторной лапы после изгиба и обламывания

Анализ работ по повышению долговечности и износостойкости показал, что все они направлены на решение определенной локальной задачи, и не рассматривают системно вопрос повышения долговечности. Проблема повышения долговечности стрелчатых лап культиваторов должна решаться комплексным путем с разработкой технологических и конструктивных методов, которые будут учитывать как почвенно-климатические условия, так и применение научно обоснованных методов эксплуатации. Для внедрения комплексного подхода необходимо исследовать влияние на долговечность стрелчатых лап культиваторов всех значимых факторов (материал и способ упрочнения лапы, тип и состояние почвы, режимы эксплуатации).

Исследования особенностей изнашивания и долговечности стрелчатых лап проводили на трех типах почв на протяжении 2015-2018 годов. Опытные образцы лап устанавливались на паровом культиваторе John Deere 2210 (рис. 3), предназначенном для предпосевной и сплошной обработки почв.



Рисунок 3. Культиватор John Deere 2210

Стрелчатые лапы были изготовлены из высокоизносостойкой борсодержащей стали 28MnB5 и стали 65Г с различными вариантами упрочнения (табл. 1). Выбор

Таблица 1. Условия проведения экспериментов

Почвообрабатывающая машина	Тип почвы	Рабочий орган	Материал рабочего органа + износостойкий материал
Культиватор John Deere 2210	Супесчаная	15/5000 стрельчатая лапа	28MnB5
			65Г
	Среднесуглинистая		65Г+Т-620
			65Г+Т-590
	Легкая глина		65Г+М-Fe 6

стали 28MnB5 был обоснован широким использованием мировыми лидерами сельскохозяйственного машиностроения для производства рабочих органов почвообрабатывающих машин и ее повышенной стойкостью к абразивному изнашиванию [11].

Стрельчатые лапы, изготовленные из стали 28MnB5, эксплуатировались без изменения физико-механических свойств, заложенных заводами-изготовителями. Рабочие органы, изготовленные из стали 65Г, подвергались объемной закалке при температуре 810...830 °С и средним отпускком с очень точной выдержкой при температуре 460...480 °С. Износостойкое покрытие наносилось на лицевую сторону, ширина нанесенного слоя на носке была в 2,5...3 раза шире, чем на крыльях стрельчатой лапы. Покрытия наносили ручной дуговой сваркой электродами Т-620 и Т-590 в условиях мастерских сельскохозяйственных предприятий.

Поскольку в процессе изнашивания в почве рабочие органы изменяют свои размеры по длине и ширине, для объективной оценки износостойкости стрельчатых лап определяли интенсивность массового износа при наработке 10 га на одну лапу (рис. 4).

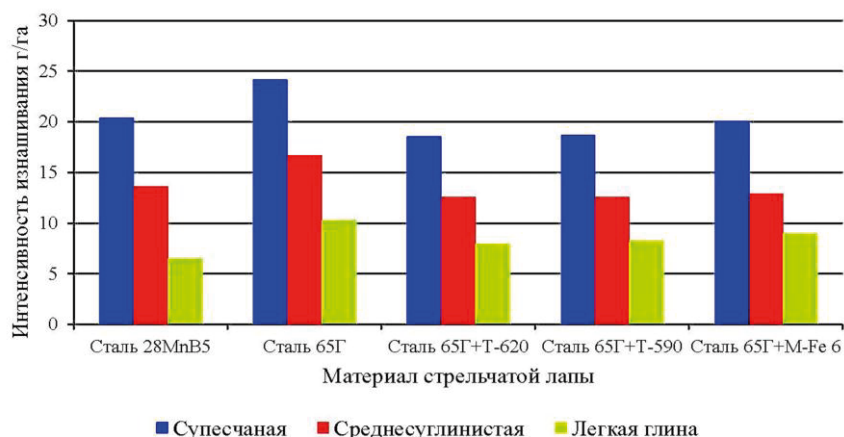


Рисунок 4. Интенсивность изнашивания стрельчатых лап культиватора John Deere 2210 (наработка на одну лапу 10 га)

Износостойкость стрельчатых лап культиваторов, изготовленных из стали 28MnB5, выше износостойкости стрельчатых лап, изготовленных из стали 65Г, на 18 % при эксплуатации в условиях супесчаных почв, на 23 % — в условиях суглинистой почвы и на 57 % — в условиях легкой глины. Нанесенные защитные покрытия существенно повышают износостойкость культиваторных лап. Так, в результате нанесения слоя электро-

дом Т-620 износостойкость повышается на 29...32 %, электродом Т-590 — на 25...32 % и М-Fe 6 — на 15...29 %. При износе защитного покрытия интенсивность изнашивания становится равной интенсивности изнашивания серийной стрельчатой лапы.

Следует отметить, что интенсивность изнашивания стрельчатых лап в первом ряду на 14,5...21,2 % больше интенсивности изнашивания лап во втором ряду. Это связано с уменьшением степени закрепления абразивных частиц в результате частичного разрушения слоя почвы. Увеличение интенсивности изнашивания на 24,2...38,4 % выше наблюдалось у стрельчатых лап, которые работают по следам трактора или сельскохозяйственной машины. Все это необходимо учитывать при установке стрельчатых лап на культиватор, для обеспечения устойчивости движения агрегата.

Возрастание скорости движения почвообрабатывающего агрегата приводит к увеличению интенсивности изнашивания [2]. Исследования износа стрельчатых лап были проведены при рабочих скоростях 8 км/ч, 10 км/ч и 13 км/ч (границы проведения исследований регламентируются техническими характеристиками культиватора John Deere 2210). Исследования проводились на супесчаных почвах, наработка на одну лапу составила 10 га. В результате было установлено отсутствие влияния изменения скорости движения агрегата на интенсивность изнашивания. Это объясняется незначительным увеличением скорости движения агрегата. Так, в работе [2] установлено, что с увеличением скорости движения в 4,7 раза износ на супесчаной почве возрастает только в 1,118 раза.

В результате проведенных испытаний обламывание крыльев и другие механические повреждения наблюдались при обработке супесчаных почв у всех экспериментальных образцов, кроме стрельчатых лап, изготовленных из стали 28MnB5. Механические повреждения связаны с большим количеством каменистых включений в почве. Поврежденные стрельчатые лапы не учитывались при расчете ресурса (рис. 5).

Использование стрельчатой лапы из высококачественной борсодержащей стали 28MnB5 позволило повысить ее долговечность по отношению к стрель-

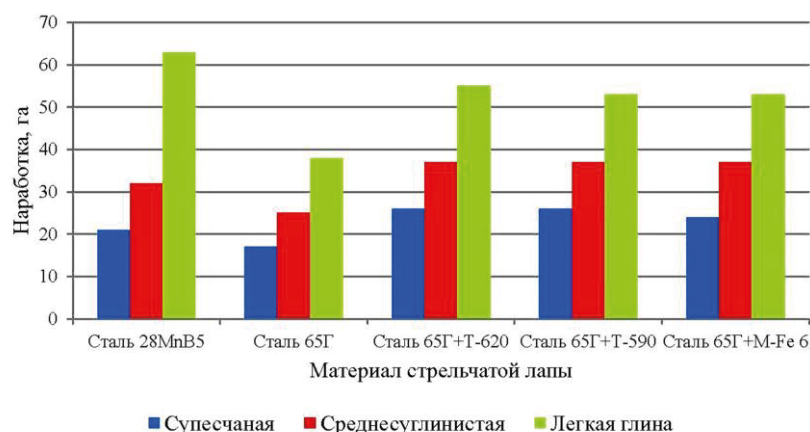


Рисунок 5. Ресурс стрелчатых лап

чатой лапе из стали 65Г при эксплуатации на супесчаных почвах на 24 %, средних суглинках – на 28 % и легкой глине – на 66 %.

Высокую эффективность увеличения долговечности стрелчатых лап при эксплуатации на супесчаных и суглинистых почвах показали износостойкие покрытия, нанесенные ручной дуговой сваркой электродами Т-590 и Т-620 (табл. 2).

Таблица 2. Повышение долговечности стрелчатых лап культиваторов

Почва	Величина повышения долговечности при использовании различных электродов, × раз		
	Т-620	Т-590	М-Fe 6
Супесчаная	1,53	1,53	1,41
Среднесуглинистая	1,48	1,48	1,48
Легкая глина	1,44	1,39	1,39

Следует отметить, что долговечность культиваторных лап из стали 28MnB5 выше долговечности упрочненных культиваторных лап при эксплуатации на глинистых почвах. При эксплуатации на супесчаных и среднесуглинистых почвах упрочненные лапы имеют большую долговечность, в сравнении с лапами из стали 28MnB5.

Следует отметить, что нанесение слоя на тыльную сторону способствует самозатачиванию и повышает ресурс стрелчатой лапы на 18 % в сравнении с нанесением износостойкого слоя на лицевую сторону [7]. В результате испытаний установлено, что долговечность культиваторных лап с нанесенным упрочняющим слоем с тыльной стороны выше долговечности культиваторных лап с упрочняющим слоем с ли-

цевой стороны только при эксплуатации на глинистых почвах. Величина увеличения находилась в пределах статистической погрешности и составляла 2,8 %. При эксплуатации таких лап на супесчаных и суглинистых почвах в результате быстрого износа материала основы наблюдались выступы упрочненного слоя, который при взаимодействии с твердыми элементами почвы обламывался. Долговечность таких лап оказалась в 1,6...1,9 раза меньше долговечности серийных лап.

Соотношение геометрических показателей нанесенного износостойкого слоя на носок и крылья стрелчатой лапы должно основываться на соотношении интенсивности изнашивания этих частей. Соотношение интенсивности изнашивания носка и крыльев определяли на серийной культиваторной лапе из стали 65Г (табл. 3).

Полученные результаты позволяют определить схему нанесения износостойких покрытий на стрелчатые лапы, учитывая почвенные условия их эксплуатации. При эксплуатации культиваторных лап на глинистых и среднесуглинистых почвах необходимо, чтобы износостойкий слой был в 2,5 раза шире и толще слоя, нанесенного на крылья лап. На супесчаных почвах геометрические размеры износостойкого слоя на носке и крыльях должны иметь соотношение 1,25/1. Достижение таких соотношений может быть реализовано не только нанесением износостойких покрытий, но и установлением съемного наконечника на носок стрелчатой лапы.

Исследования влияния степени закрепления абразивных частиц в почве на интенсивность изнашивания носка и крыльев проводились на супесчаной почве при различных условиях (табл. 4):

- участок после уборки озимой пшеницы;
- участок после уборки озимой пшеницы и вспашки (на следующий день после вспашки);
- участок после уборки озимой пшеницы и вспашки (на 48-й день после вспашки).

При использовании культиваторов только для предпосевной обработки (после вспашки) интенсивность изнашивания носка и крыльев будет отличаться только на 8 %, что необходимо учитывать при упрочнении стрелчатых лап.

В процессе эксплуатации, для качественного выполнения операции культивации, важно, чтобы

Таблица 3. Соотношение интенсивности изнашивания носка и крыльев культиваторных лап (наработка на одну лапу – 10 га, поле после рапса)

Место проведения замеров	Интенсивность изнашивания мм/га		
	Супесчаная	Среднесуглинистая	Легкая глина
Носок	0,85	0,57	0,37
Крылья	0,68	0,23	0,15
Соотношение между интенсивностью изнашивания носка и крыльев культиваторной лапы			
Носок/крылья	1,25	2,48	2,46

Таблица 4. Соотношение интенсивности износа носка и крыльев стрелчатой лапы в условиях песчаной почвы при различных степенях закреплении абразивных частиц

Условия проведения исследований	Соотношение между интенсивностью износа носка и лезвия
Участок после уборки озимой пшеницы	1,28
Участок после уборки озимой пшеницы и вспашки (на следующий день после вспашки)	1,08
Участок после уборки озимой пшеницы и вспашки (на 48-й день после вспашки)	1,21

стрелчатая лапа самозатачивалась. Соотношение толщины износостойкого покрытия и основного металла можно определить, используя результаты данных исследований, по разработанной А.Ш. Рабиновичем [12] методике.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

- характер абразивного износа стрелчатой лапы культиваторов зависит от типа почвы, ее агрегатного состояния и режимов эксплуатации;
- нанесение износостойкого покрытия на лицевую сторону стрелчатой лапы культиваторов существенно увеличивает их долговечность, а нанесение на тыльную сторону целесообразно только при эксплуатации на глинистых почвах без каменистых включений;
- соотношение геометрических параметров износостойкого покрытия должно основываться на условиях и режимах эксплуатации;
- при эксплуатации культиваторов на глинистых почвах рекомендуется использовать стрелчатые лапы из стали 28MnB5, а на супесчаных и суглинистых – стрелчатые лапы из стали 65Г с износостойким покрытием на лицевой стороне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tylczak, J.H. Abrasive wear / J.H. Tylczak // ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. – 1992. – № 18 – P. 184-190.
2. Севернев, М.М. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М.М. Севернев, Н.Н. Подлекарев, В.Ш. Сохадзе; под. общ. ред. М.М. Севернева. – Минск: Бел. навука, 2011. – 333 с.
3. Рыбалко, И.Н. Анализ напряженного состояния и технологические способы повышения ресурса

стрелчатых лап культиваторов / И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, А.Д. Мартыненко, А.В. Сайчук // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2016. – № 6. – С.118-131.

4. Фесько, С.А. Разработка технологии восстановления стрелчатых лап культиваторов для посева семян зерновых культур по подготовленной почве: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / С.А. Фесько. – Брянск, 2018. – 172 с.

5. Зайцев, С.А. Повышение износостойкости рабочих поверхностей лап культиватора газопламенным напылением с последующим оплавлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / С.А. Зайцев. – Москва, 2013. – 164 с.

6. Влияние параметров лезвия на долговечность лап культиватора / А. Козаченко [и др.] // Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. – Vol. 15. – № 7 – С. 61-66.

7. Новиков, В.С. Повышение долговечности стрелчатых лап культиваторов / В.С. Новиков, Д.И. Петровский // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высш. проф. образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2017. – № 4. – С. 49-55.

8. Виноградов, В.В. Повышение износостойкости стрелчатых лап почвообрабатывающих орудий карбовибродуговым упрочнением их режущих поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / В.В. Виноградов. – Орел, 2017. – 156 с.

9. Скобло, Т.С. Анализ способов изготовления, упрочнения и восстановления стрелчатых лап культиватора / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, А.Д. Мартыненко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2019. – № 15. – С. 60-85.

10. Бобрицкий, В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: дис. канд. тех. наук: 05.02.04 / В.М. Бобрицкий. – Кіровоград, 2007. – 182 с.

11. Kalacska, A. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines / A. Kalacska, P. De Baets, D. Fauconnier, F. Schramm, L. Frerichs, J. Sukumaran // Wear. – 2020. – Vol. 442-443.

12. Рабинович, А.Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машин / А.Ш. Рабинович. – М.: ГОСНИТИ, 1962. – 106 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 02.04.2020

УДК 534.838.7: 631.56

КОМБИНИРОВАННАЯ ПРЕДПОСЕВНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН УКРОПА И КОРИАНДРА

Е.А. Городецкая,

доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.Д. Сыч,

ассистент каф. электроснабжения БГАТУ

Ю.К. Городецкий,

аспирант РУП «НПЦ НАН Беларуси по продовольствию»

Е.Т. Титова,

начальник Международного отдела БРФФИ, канд. биол. наук

*Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований комбинированной (диэлектрическая сепарация и ультразвук) предпосевной обработки семян семейства *Apiaceae*, направленной на повышение всхожести и энергии прорастания.*

Ключевые слова: семена пряно-ароматических растений, предпосевная стимуляция, диэлектрическая сепарация, ультразвуковая обработка.

*The article presents the results of analytical and experimental studies of combined (dielectric separation and ultrasound) pre-sowing treatment of seeds of *Apiaceae* family aimed at germination increasing.*

Keywords: savoury herbs seeds, pre-sowing stimulation, dielectric separation, ultrasonic treatment.

Введение

Скороспелость и относительная холодостойкость однолетних зеленных и пряно-вкусовых растений, таких, как укроп и кориандр, обуславливает широкие границы их выращивания и позволяет многократно высевать в открытом и защищенном грунте, создавая непрерывный конвейер поступления свежей продукции. Современный уровень развития мощностей растениеводческой отрасли Республики Беларусь позволяет получать свежую продукцию этих культур круглый год. К сожалению, в настоящее время обеспеченность населения нашей страны зелеными и пряно-вкусовыми овощами составляет всего 30...34 % от рекомендованной нормы (20,4 кг в год на одного человека) и то за счет частного сектора. Произрастающие в диком виде и возделываемые в культуре, они являются дополнительным резервом снабжения населения свежей зеленью в весенний и раннелетний периоды года, а также осенью для консервирования продукции. О введении в меню этих наименований можно говорить, как о круглогодичном ингредиенте.

Абиотические факторы при посеве семян не всегда благоприятны для нормального развития зародыша, особенно в начальный период. Полевая всхожесть семян часто составляет 60-70 %, поэтому перед посевом их необходимо специально готовить для повышения всхожести, энергии прорастания и продуктивности [1].

В нашей стране, в Институте экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси, под руководством академика Ламана Н.А. группой уче-

ных (Калацкая Ж.Н. и др.) [2] ведется разработка препаратов на основе элиситоров (индукторов устойчивости растений к болезням и стрессорным факторам окружающей среды). Наиболее известными углеводными элиситорами являются поли- и олигосахаридные фрагменты клеточных стенок грибов, включая олигомеры хитозана, а также пектиновые фрагменты клеточных стенок растений – олигосахариды. По-прежнему исследуются салициловая, янтарная и оксикоричная кислоты. На основе смеси последних в Российской Федерации из эхинацеи пурпурной (*Echinaceae purpurea* L.) выпускают препарат «Циркон» иммуномодулирующего действия для предпосевного замачивания в нем семян.

Развитие и применение ультразвуковых (УЗ) технологий открывает перспективы не только в создании новых веществ и материалов в придании известным материалам и средам нужных технологических свойств, но и в экологизации растениеводства [3].

Цель работы заключается в изучении изменения агробиологических особенностей семян пряно-ароматических (мелкосемянных) культур в условиях комбинированного электрофизического воздействия энергией электрического и ультразвукового полей.

Основная часть

Обзор применяемых средств для просеивания и очистки семян выполнен ранее на основании работ, приведенных в источниках [1-4].

На сепарацию семян укропа и кориандра должны поступать в здоровом негнущемся состоянии, а

также иметь желтовато-бурый цвет (возможен зеленоватый оттенок) и пряно-ароматический запах, свойственный им.

К сорной примеси относят: весь проход, который можно получить при просеивании через сито с отверстиями диаметром 1,5 мм, в остатке на сите с отверстиями диаметром 1,5 мм; минеральную примесь (комочки земли, шлак, песок, камешки и т.п.); органическую примесь (частицы стеблей, листьев, плодовые оболочки и т.п.); семена всех дикорастущих и культурных растений, кроме плодов и семян других эфиромасличных растений. К эфиромасличной примеси данного растения относят плоды и полуплодики укропа и кориандра с почерневшим ядром, заплесневевшие, проросшие, раздавленные, лишенные плодовых оболочек, поврежденные вредителями, плоды с трещинами по линии соединения полуплодиков.

Первой операцией предпосевной подготовки была диэлектрическая сепарация семян с получением фракций чистых выравненных по размеру сухих семян при предварительно установленном лучшем напряжении на рабочем органе в диапазоне 0,9 ... 1,5 кВ. При сортировании семян пряно-ароматических культур сепаратор работает с подачей 70...230 и более кг/ч на 1 м длины барабана, потребляемая мощность – $0,7 \pm 0,2$ кВт, энергоемкость – 0,14 кВт/кг. При очистке и сортировке семян в электрических сепараторах на семена действуют не только силы поля, но и оказываются электрофизические воздействия: поверхностное обеззараживание [3, 4], возбуждение жизнедеятельности семян за счет поляризации.

Устройство, принципиальная электрическая схема и принцип работы УЗУ-0,25 описаны в источнике [3]. В наших опытах с семенами средой распространения ультразвука выбрана чистая вода. Для размещения семян в ванне использовали капроновую сеточку, начальная температура воды была 22 °С. Время воздействия устанавливали пропорционально размеру семян, учитывая предыдущий удачный опыт [3], в пределах до 300 с шагом 50 с. Объем ванны – $0,21 \times 0,17 \times 0,20 = 0,00714 \text{ м}^3$, объем рабочей среды (воды) – $0,21 \times 0,17 \times 0,05 = 0,001785 \text{ м}^3$, т.е. 1,78 л = 1,78 кг; масса семян – 0,1 кг. После обработки в УЗ ванне семена не просушивали, а раскладывали на увлажненной фильтровальной бумаге в чашках Петри, накрывали крышечной чашкой Петри и выставляли на проращивание.

Эксплуатация и ДСУ и УЗ-установок требует повышенного внимания и осторожности, так как это установки высокого напряжения, имеет место действие слышимых и неслышимых шумов, распространяющихся в воздухе. Все манипуляции с загрузкой и выгрузкой семян производились при отключенном из сети питания и сепаратора и УЗ-генератора.

При прохождении УЗ в жидкостях, а также биологических объектах, частицы среды совершают интенсивные колебательные движения с большими ускорениями. Воздействие УЗ характеризуется разделением молекул и ионов с различной массой, искажением формы волны, появлением переменного электрического поля, капиллярно-акустическим и тепловым эффектами, активацией диффузии. Большим

ограничением ультразвуковой обработки семян являются два факта: стимулирующий эффект выявляется только при обработке семян в водной среде [5, 6] и обработка сопровождается акустическим эффектом. Кроме этого, следует устанавливать персональные дозы обработок для каждой культуры, ведь биологическое проявление ультразвука заключается во влиянии его на скорость протекания физиологических процессов, которые недопустимо необратимо повредить (отмирание тканей) [7].

Тем не менее, ультразвуковая предпосевная обработка семян имеет неоспоримое преимущество, которое повышает ее ценность. После ультразвуковой обработки, пустые, невсхожие семена остаются плавать на поверхности жидкости, а всхожие семена оседают на дно, так осуществляется еще и флотация семян.

Ультразвуковая кавитация – эффективное средство концентрации энергии акустической волны низкой плотности в высокую ее плотность, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. Кавитация интересна тем, что в момент схлопывания пузырьков давление и температура среды достигают значительных величин (по некоторым данным, до 100 МПа и 1000 °С) [6], в результате чего в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве, но температура всего объема среды едва ли поднимается на несколько градусов. Кавитационный нагрев проявляется высокой температурой в точках кавитационных полостей и совершенно незначительным нагревом всего объема воды. Интенсивность и характер проявления кавитационных эффектов зависят от частоты и интенсивности колебаний, а также от свойств самих сред. Вода остается непревзойденной средой для предпосевного озвучивания семян.

Энергия УЗ поля, идущая на образование кавитационной области, затрачивается в течение всей фазы расширения кавитационного пузырька и представляет собой своеобразный трансформатор мощности, в котором сравнительно медленно накапливаемая энергия освобождается в течение очень короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область. Воздействие кавитации на водные растворы сводится к расщеплению молекул воды в кавитационных пузырьках. Независимо от природы растворенных веществ, воздействие УЗ энергии на воду приводит к изменению ее физико-химических свойств – увеличению pH, электропроводности воды, увеличению числа свободных ионов и активных радикалов, структуризации и активации молекул [5, 6].

В предпосевной УЗ обработке использовались семена укропа (*Anethum graveolens*) и кориандра (*Coriandrum sativum*), как модельных растений пряно-ароматического семейства *Apiaceae*. Пробы по 100 семян, помещенные в сеточки из капроновой нити, обрабатывали в УЗ ванне с водой при разных экспозициях (100, 150, 200, 250, 300 с), с пятикратной повторностью. Для проращивания образцы помещали в чашки Петри с увлажненной фильтровальной бумагой и выдерживали в термостатических условиях при температуре 21 °С в

соответствии с ГОСТ 30556-98. Проросшим считается семя с длиной ростка, равной половине длины семени.

Физические и энергетические параметры технологической УЗ установки рассчитывали по формулам [3]:

$$P_{ак} = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau\eta}; \eta_{ак} = \frac{P_{ак}}{P_г}; W = \frac{mc(t_2 - t_1)}{V};$$

$$I = vW; \cos \varphi = \frac{P_1}{UI_p}, \quad (1)$$

где $P_{ак}$ – акустическая мощность, Вт (без учета теплотер в конструкциях установки);

m, c – соответственно, масса, кг и удельная теплоемкость воды в ванне, Дж/кг $^{\circ}$ С;

t_1, t_2 – начальная и конечная температура, $^{\circ}$ С;

τ – время обработки, с;

η – коэффициент полезного действия преобразователя;

$\eta_{ак}$ – акустический КПД;

$P_г$ – мощность генератора, Вт;

W – плотность энергии, Дж/м 3 ;

V – объем воды в ванне, м 3 ;

I – интенсивность УЗ, Дж/м 2 ·с;

v – скорость распространения УЗ колебаний в воде, м/с;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности установки;

P_1 – мощность, потребляемая из сети, Вт;

U – питающее напряжение, В;

I_p – рабочий ток, А.

Следующее явление распространения ультразвуковой волны в воде – это акустическое течение – стационарный однонаправленный поток массы, образующийся вблизи препятствий (семян) из-за инерционных потерь. Такие течения носят вихревой характер и хорошо изучены [8]. Следует отметить их важное интенсифицирующее значение во всех процессах с ультразвуком.

Лишь незначительное внимание уделяется постоянному – радиационному давлению, действующему на отражающую или поглощающую поверхность, которой являются семена. При распространении ультразвука, в межфазной твердожидкостной системе возникает ультразвуковой капиллярный эффект [8]. Это мощное увеличение глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярные каналы в момент прохождения через систему ультразвука. Вероятно, такая «пропитка» семенных покровов объясняет интенсифицирующий прорастание эффект ультразвуковой обработки семян.

Все проявляющиеся эффекты ультразвука носят нерезонансный характер (кавитация, нагрев, потоки) и не требуют создания специальных устройств или подбора точнейших доз ультразвука как такового. Поэтому использовалось стандартное устройство с практически одной частотой ультразвука.

Сравнимость геометрических размеров излучающего рабочего элемента и объема технологической

установки с длиной УЗ волны обуславливает ряд интерференционных явлений. Так, УЗ – поле на расстояниях, сравнимых с длиной волны, характеризуется рядом максимумов и минимумов, расположенных на различных удалениях от излучателя.

Количественные характеристики воздействующего фактора – УЗ колебаний на систему «жидкость-семена», рассчитанные по уравнениям (1), приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические и энергетические параметры технологической установки

Показатели	длительность УЗ обработки, с		
	100	200	300
Акустическая мощность, $P_{ак}$, Вт	16,4	24,7	49,4
Плотность энергии, W , 10^3 Дж/м 3	2500	6672	8000
Интенсивность УЗ, I , кВт/м 2	4760	8 139	11960
Акустический КПД, $\eta_{ак}$, о.е.	0,1	0,15	0,2
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$, о.е.	0,38	0,50	0,68

Обработанные в УЗ поле с различной экспозицией, семена укропа и кориандра были поставлены на проращивание.

Во всех опытных партиях наблюдался положительный эффект стимуляции всхожести семян: первые ростки укропа и кориандра появились на шестые сутки (рис. 1), устойчивое и дружное прорастание – на восьмые сутки. В ходе исследований было проведено сравнение основных показателей семян энергии прорастания и всхожести трех партий семян:

- 1) контрольные и отсепазированные семена;
- 2) контрольные и обработанные в ультразвуке;
- 3) контрольные и семена после комбинированного воздействия – диэлектрической сепарации и ультразвука.

Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Изменение агрономических показателей семян после диэлектрической сепарации и ультразвуковой обработки

Культура	Посевные качества семян, %				Напряжение сепарации, кВ
	энергия прорастания до сепарации	энергия прорастания после сепарации и УЗ	всхожесть до сепарации	всхожесть после сепарации и УЗ	
Укроп	68,8 $\pm$ 3,0	74,5 $\pm$ 3,0	76,5 $\pm$ 2,0	84,5 $\pm$ 2,0	0,9... 1,5
Кориандр	71,0 $\pm$ 2,0	75,0 $\pm$ 2,0	74,2 $\pm$ 2,5	77,3 $\pm$ 2,5	1,1... 1,5

В результате исследований установлено, что диэлектрическая сепарация определенно способствует повышению основных агрономических показателей семян – всхожести и энергии прорастания в размере 5-7 %, что является хорошим показателем для мелко-семянных труднопрорастаемых пряно-ароматических культур. Наблюдалось ускорение всхожести и энергии прорастания обработанных семян в среднем на

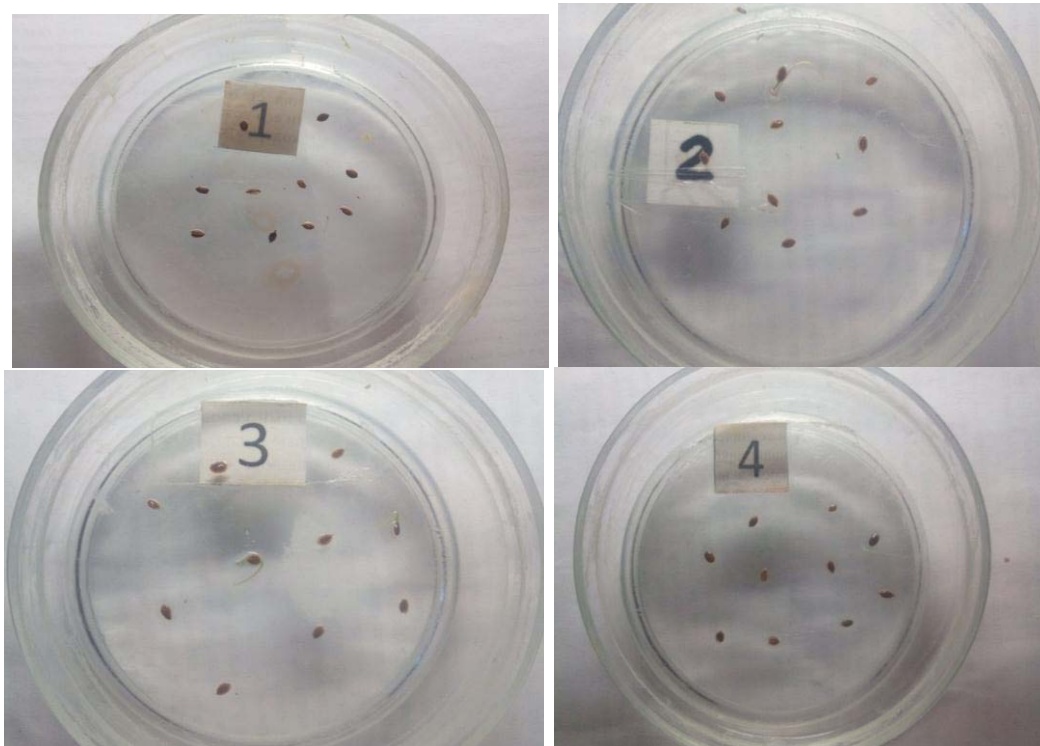


Рисунок 1. Семена укропа на шестые сутки проращивания после комбинированной обработки: 1 – после диэлектрической сепарации при напряжении 1,5 кВ; 2 – после ультразвуковой обработки при экспозиции 300 с; 3 – после интегрированной электрофизической обработки (диэлектрической сепарации и ультразвукового воздействия с указанными параметрами); 4 – контрольные семена

2-3 дня в сравнении с контрольными семенами. Также и ультразвуковое воздействие ожидаемо повысило исследуемые показатели. Из таблицы 2 видно, что комбинированное действие электрического и ультразвукового (высокоэнергетического) полей дает суммирующий эффект, скромный, но недостижимый ранее отдельными перечисленными воздействиями.

В процессе УЗ обработки семена очищаются как от механических загрязнений, так и от бактериальных инфекций. Дополнительный бактерицидный и стерилизующий эффекты оказывают проявления ультразвука – кавитацию, диспергирование, термические и физико-химические действия [9]. Таким образом, УЗ обработка оказывает комплексное биологическое воздействие – активацию жизнедеятельности семян и подавление нежелательной микрофлоры.

Заключение

Диэлектрическое сепарирование семян укропа и кориандра при напряжении на рабочем органе СДЛ-1 0,9...1,5 кВ, однократном пропуске семян и последующем ультразвуковом озвучивании, при соблюдении параметров (акустическая мощность – 16,4...50 Вт; температура воды – 21...24 °С и экспозиция до 300 с) дает ускорение прорастания семян на 2 дня, всхожесть и энергию прорастания повышает на 5...7 % в сравнении с контрольными партиями. Таким образом, при всхожести контрольных семян, равной в среднем 60...70 %, опытные семена показали всхожесть до

74...80 %, что является предпосылкой получения дополнительного урожая.

Наряду с тепловыми эффектами, в ультразвуковом поле в биологических средах наблюдаются механические, электрические и физико-химические эффекты, сочетание которых обеспечивает уникальность ультразвука, как активирующего и дезинфицирующего фактора. При предпосевной УЗ обработке происходит обеззараживание семян, выведение их из состояния покоя, возбуждение жизненных сил зародыша, ведущих к повышению всхожести и энергии прорастания. Нельзя обойти диффузионный эффект ультразвука: он ускоряет процессы диффузии через клеточные оболочки, пористые мембраны и фильтры. Интенсивное перемешивание жидкости под действием кавитации и акустических течений ведет к уменьшению эффективной толщины пограничного слоя на поверхности раздела «жидкость – семена», и скорость диффузии увеличивается.

Определенный режим ультразвукового воздействия на семена пряно-ароматических культур, реализующий ускорение «пробуждения» (всхожести и энергии прорастания) семян укропа и кориандра должен осуществляться после диэлектрического сепарирования.

Анализ результатов проведенных исследований дает основание утверждать, что диэлектрическая сепарация в комбинации с ультразвуковой обработкой оказывает синергетический эффект ускорения прорастания семян укропа и кориандра, выступая, таким

образом, неинвазивным экзогенным экологичным стимулятором начальных ростовых процессов. При этом не нарушается биохимическая картина семян и их нативные и потребительские свойства, как представителей пряно-ароматической коллекции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корко, В.С. Электрофизические методы стимуляции растительных объектов: монография / В.С. Корко, Е.А. Городецкая. – Минск: БГАТУ, 2013. – 232 с.
2. Влияние плазменно-радиоволновой обработки семян кукурузы и последующего их хранения в неблагоприятных условиях на физиолого-биохимические особенности проростков / Ж.Н. Калацкая [и др.] // Вести НАН Беларуси: серия биологических наук. – 2018. – Т. 63. – № 1. – С. 7-19.
3. Активация жидких сред и предпосевная обработка семян ультразвуковым полем / В.С. Корко [и др.] // Агропанорама. – № 3. – 2017. – С. 21-25.

4. Изучение физиолого-биохимических свойств и агрономических качеств мелкосемянных культур в условиях диэлектрической сепарации: отчет о НИР / Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т; рук темы Е.А. Городецкая. – № ГР 20142846.

5. Шиляев, А.С. Физические основы применения ультразвука в медицине и экологии: учеб.-методич. пос. / А.С. Шиляев; под общ. ред. проф. С.П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. – 110 с.

6. Шиляев, А.С. Ультразвук в науке, технике и технологии / А.С. Шиляев. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 412 с.

7. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежгунов, Г.Е. Коновалов. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 135 с.

8. Rui Li, Hui Zhong // Ultrasound in Medicine and Biology, V. 35. – 2014. – P. S235-S236.

9. Khokhlova T.O., Canney M.S. [et. al.] // Journ. Acoust. Soc. Am., V. 130. – 2011. – P. 3498.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.01.2020

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	$\pm 12 \pm 2,5$
Продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, с	2
Масса, кг, не более	40

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯТОРА БЕЛКОВ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Д.И. Кривовязенко,

ст. преподаватель каф. электротехнологии БГАТУ

Е.М. Заяц,

профессор каф. электротехнологии БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье предложена методика расчета электрокоагулятора молочной сыворотки, которая позволяет определить геометрические размеры электродной системы и потребляемую мощность с учетом изменения ее свойств.

Ключевые слова: электрореактор, расчет параметров, электродная система, конструкция, электрическая проводимость, молочная сыворотка.

The article describes the calculation method of whey electrocoagulator which makes it possible to determine the geometry of electrode system and the coagulator power consumption taking into account the features updates.

Keywords: electroreactor, calculation of parameters, electrode system, design, electrical conductivity, whey.

Введение

В Республике Беларусь ежегодно производится более 7 млн тонн молока. Побочный продукт переработки молока – молочная сыворотка составляет до 3 млн тонн в год. Это ценный пищевой продукт, содержащий до 1 % белков и других полезных веществ, в то же время и сильный загрязнитель сточных вод молочных предприятий. Коагуляция и выделение белков – одно из направлений повышения эффективности использования сыворотки и защиты окружающей среды.

Известные методики расчета электродных систем [1-3] справедливы в условиях существенного влияния температуры среды на потребляемую мощность при отсутствии значительного изменения кислотности (pH). Предлагаемая методика позволяет провести расчет параметров электрореактора с учетом изменения ионного состава среды при незначительном изменении температуры.

Цель работы разработать методику расчета электрокоагулятора белков коллоидных растворов, основанную на изменении ионного состава коагулируемой среды, и в первую очередь, pH -показателя.

Основная часть

Задача расчета электрокоагулятора состоит в определении конструктивных размеров электрореактора, напряжения питания и мощности. Основными расчетными размерами являются: площадь поверхности электродов, межэлектродное расстояние в анодной и катодной зоне, число электродных камер. Электрореактор должен обеспечивать необходимое изменение водородного показателя молочной сыворотки и, как следствие, коагуляцию белков.

Расчетная схема электрореактора показана на рисунке 1. Молочная сыворотка с начальным $pH_n = 4,7...4,9$ входит в анодную зону А, опускается

вниз, подвергаясь воздействию электрического тока. Ее pH снижается до $3,0...3,5$ в зоне перехода из анодного в катодное пространство. Далее сыворотка протекает вверх вдоль катода, при этом pH изменяется от $3,0...3,5$ до $9...10$. Эти изменения pH охватывают весь диапазон изоэлектрических точек, в которых белки коагулируют.

Площадь поверхности электродов можно найти из уравнения баланса количества электричества на коагуляцию белков сыворотки

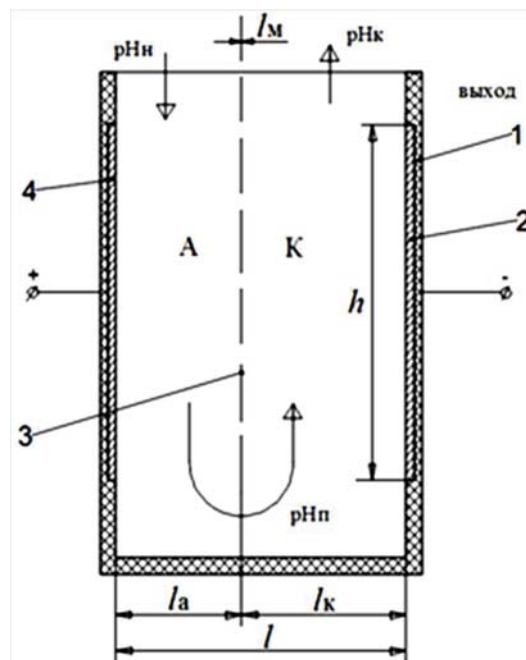


Рисунок 1. Расчетная схема электрореактора:
1 – корпус; 2, 4 – токоподводящие электроды;
3 – мембрана; А – анодная зона; К – катодная зона

$$Q = Q_3 + Q_n, \quad (1)$$

где Q, Q_3, Q_n – количество электричества, соответственно, подведенное к электроореактору, полезно затраченное на электрообработку и потерянное на нагревание окружающей среды, Кл.

Количество электричества, подведенное к электроореактору

$$Q = \gamma_3(pH) E_c S d \tau, \quad (2)$$

где $\gamma_3(pH)$ – зависимость эквивалентной электрической проводимости сывортки от водородного показателя, См/м;

E_c – средняя напряженность электрического поля между анодом и катодом, В/м;

S – площадь электрода, м²;

τ – продолжительность обработки, с.

Примем, что температура изменяется за время обработки незначительно и ее влияние на проводимость сывортки не учитываем.

Удельная эквивалентная электрическая проводимость сывортки применительно к расчетной схеме (рис. 1)

$$\gamma_3(pH) = \frac{l_a + l_k + l_m}{\frac{l_a}{\gamma_V^A(pH)} + \frac{l_k}{\gamma_V^K(pH)} + \frac{l_m}{\gamma_V^M} + 2\rho_k}, \quad (3)$$

где l_a, l_k, l_m – соответственно, расстояния от анода до мембраны, от катода до мембраны и толщина мембраны, м;

$\gamma_V^A(pH), \gamma_V^K(pH), \gamma_V^M$ – удельная объемная электрическая проводимость сывортки в анодной, катодной области и мембраны, См/м;

ρ_k – удельное контактное сопротивление, Ом/м².

Межэлектродное расстояние l в электроореакторе коагулятора белков сывортки следует принимать примерно 0,02 м. Соотношение расстояний $l_a/l_k=0,8\dots0,9$, по исследованиям авторов. Различные расстояния обусловлены разной скоростью реакций в анодной и катодной зонах. Толщина мембраны l_m соответствует толщине материала, используемого для этих целей (для полиамидной мембраны МИФИЛ-ПА $l_m=0,25\cdot10^{-3}$ м). Удельное контактное сопротивление $\rho_k=0,015$ Ом·м².

Зависимость удельной объемной проводимости сывортки от водородного показателя:

для катодной области

$$\gamma_V^K(pH) = \gamma_V^K(pH_{нач}) \left[a_0 - a_1(pH^K - pH_{нач}) - a_2(pH^K - pH_{нач})^2 \right], \quad (4)$$

для анодной области

$$\gamma_V^A(pH) = \gamma_V^A(pH_{нач}) \left[a_0 - a_1(pH_{нач} - pH^A) - a_2(pH_{нач} - pH^A)^2 \right], \quad (5)$$

где $\gamma_V^A(pH_{нач}) = 0,09$ См/м – начальная удельная объемная электрическая проводимость сывортки при начальном $pH_{нач}=4,8$;

$\gamma_V^K(pH_n)$ – удельная объемная электрическая проводимость сывортки при водородном показателе в зоне перехода из анодной в катодную области реактора, т.е. при $pH=3,0\dots3,5$;

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты;

$pH_{нач}$ – начальное значение pH среды;

pH^A, pH^K – текущее значение pH среды соответственно в анодной и катодной зоне.

После подстановки исходных значений в уравнение (3) и преобразований, получим:

$$\gamma_3(pH) = \gamma_3(pH_{нач}) \frac{0,12 - 0,003 pH}{0,12 - 0,0012 pH}, \quad (6)$$

где $\gamma_3(pH_{нач})=0,84$ См/м при $pH_{нач}=4,8$.

Количество электричества, затраченное на электрокоагуляцию

$$Q_3 = q(pH) m d(pH), \quad (7)$$

где $q(pH)$ – удельное количество электричества на коагуляцию белков в одном килограмме сывортки, Кл/кг;

m – масса обрабатываемой сывортки, кг.

Зависимость удельного количества электричества от pH

$$q(pH) = \frac{(10^{3-pH_{нач}} - 10^{3-pH_k}) F}{\rho n_{H^+}}, \quad (8)$$

где $\rho=1020$ кг/м³ – плотность молочной сывортки;

$F=96485$ Кл/моль – число Фарадея.

При одинаковых объемах анодной и катодной зон электроореактора число переноса ионов H^+

$$n_{H^+} = \frac{C_{H^+}^{A_0} \lambda_{H^+}}{\sum_{i=1}^a C_{k_i}^{A_0} \lambda_{k_i} + \sum_{j=1}^b C_{a_j}^{K_0} \lambda_{a_j}}, \quad (9)$$

где $C_{H^+}^{A_0}, C_{k_i}^{A_0}, C_{a_j}^{K_0}$ – соответственно начальная концентрация катиона H^+ , i -го катиона в анодной

зоне и j -го аниона в катодной зоне, моль/м³;

$\lambda_{H^+}, \lambda_{k_i}, \lambda_{a_j}$ – соответственно подвижность катиона H^+ , i -го катиона и j -го аниона, См·м².

Зависимость концентрации ионов сывортки рассмотрена в нашей работе [1]. Подставив значения их концентраций в уравнение (9), получим $n_{H^+} = 0,73$.

Потери энергии в окружающую среду учитываем коэффициентом потерь K , равным $1,05\dots1,10$.

Подставив соответствующие значения в уравнение (1), получим:

$$E_c S \gamma_3(pH_{нач}) d \tau = K q(pH) m d(pH) \quad (10)$$

$$E_c S \gamma_{\Sigma}(pH_{нач}) \frac{0,12 - 0,03 pH}{0,12 - 0,0012 pH} d\tau = \frac{(10^{3-pH_{нач}} - 10^{3-pH_{к}}) FK}{\rho n_{H^+}}, \quad (11)$$

$$\frac{E_c S \gamma_{\Sigma}(pH_{нач}) \rho n_{H^+}}{kmF} = \frac{0,12 - 0,0012 pH}{0,12 - 0,03 pH} (10^{3-pH_{нач}} - 10^{3-pH_{к}}). \quad (12)$$

Правая часть уравнения (9) может быть решена только численно. Для $pH_{нач}=4,8$ и $pH_{к}=10$ ее решение с помощью приложения Matcad дает число $f=0,84$.

Тогда площадь электродов реактора

$$S = \frac{Kmf\kappa_m}{E_c \gamma_{\Sigma}(pH_{нач}) \rho n_{H^+} \tau}, \quad (13)$$

где $\kappa_m=55,6$ моль/кг – количество молей в 1 кг сыворотки, приблизительно.

Среднюю напряженность электрического поля E_c принимаем согласно нашим исследованиям, 600...700 В/м, плотность тока – до 110 А/м². Напряжение питания чаще всего 12 В.

Количество электродных камер N зависит от производительности коагулятора и его конструктивного выполнения.

Площадь одного электрода

$$S_1 = S : N \quad (14)$$

Высота электрода при его заданной ширине b

$$h = S_1 : b \quad (15)$$

Ширину электрореактора приблизительно можно определить (рис. 1)

$$L = N(l + 2\delta_{cm}), \quad (16)$$

где $\delta_{cm} = 2...3$ мм – толщина электрода.

Высота стенок электрореактора должна быть на 10...20 % больше высоты электрода [4].

Расчетная мощность электрореактора, Вт

$$P_p = \frac{U^2 \gamma_{\Sigma}(pH_{нач}) S}{l}. \quad (17)$$

По изложенной методике рассчитан электрореактор коагулятора белков молочной сыворотки и изготовлен лабораторный образец (рис. 2). Производительность электрокоагулятора – 1000 кг/ч, мощность – 10 кВт. Напряжение питания электрореактора – 12 В, расчетный ток – 900 А. Источник питания электрореактора – стандартный выпрямитель ТВ1-1200/12Т-0УХЛ4. Питание электрокоагулятора от сети – 400/230 В.

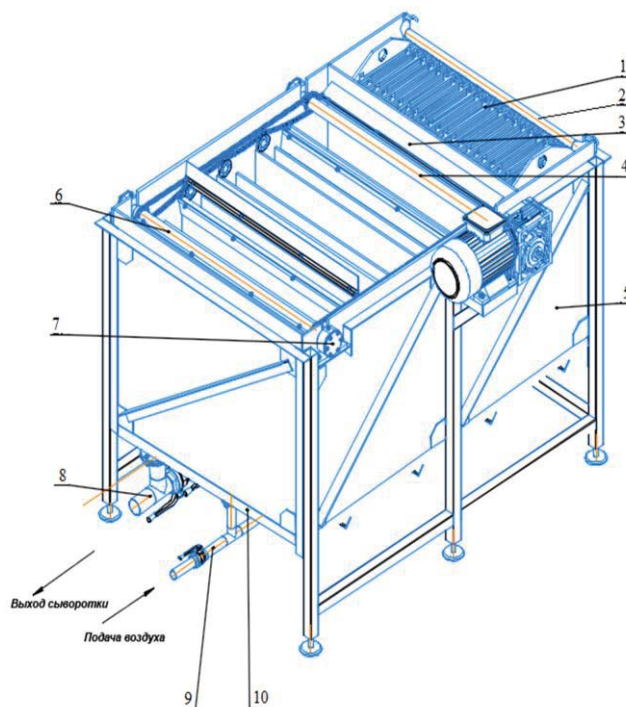


Рисунок 2. Электрокоагулятор белков молочной сыворотки: 1 – электрореактор; 2 – трубопровод подвода исходной сыворотки; 3 – скребковый транспортер; 4 – вал приводной; 5 – бак; 6 – вал ведомый; 7 – ролик опорный; 8 – трубопровод отводной; 9 – трубопровод подвода воздуха; 10 – каркас

Заключение

Предложенная методика расчета электрореактора необходимой производительности применима и к другим коагуляторам коллоидных смесей, например, для устройств очистки сточных вод предприятий мясной, молочной, кожевенной и др. промышленности. По данной методике рассчитан и разработан опытный электрокоагулятор белков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сельское хозяйство Республики Беларусь: статистический сб. / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И.В. Медведева (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь, 2019. – 211 с.
2. Храмцов, А.Г. Технология продуктов из молочной сыворотки: учеб. пособие / А.Г. Храмцов, П.Г. Нестеренко. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 587 с.
3. Справочник по переработке молока [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://dairyprocessinghandbook.com/ru/chapter/pererabotka-syvorotki>. – Дата доступа: 10.07.2019.

4. Дымар, О.В. Повышение эффективности переработки молочных ресурсов: научно-технологические аспекты: монография / О.В. Дымар. – Минск: Колорград, 2018. – 236 с.

5. Шалапугина, Э.П. Технология молока и молочных продуктов: учеб. пособие / Э.П. Шалапугина, Н.В. Шалапугина. – М.: Дашков и К, 2013. – 301 с.

6. Заяц, Е.М. Основы электротермохимических методов обработки влажных кормов / Е.М. Заяц. – Минск: Ураджай, 1997.

7. Гайдук, В.Н. Практикум по электротехнологии /

В.Н. Гайдук, В.Н. Шмигель. – Москва: Агропромиздат, 1989. – 176 с.

8. Заяц, Е.М. Электротехнология: учеб. пособие / Е.М. Заяц. – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 400 с.

9. Храмцов, А.Г. Молочный сахар / А.Г. Храмцов. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 224 с.

10. Кривовязенко, Д.И. Электрохимическое изменение концентрации ионов в молочной сыворотке / Д.И. Кривовязенко, Е.М. Заяц // Агропанорама. – 2019. – № 4. – С. 42-45.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.03.2020

УДК 620.95: 621.35

ЗАМЕНА РЕАГЕНТНОЙ ПОДГОТОВКИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОЧНЫХ КОМБИНАТОВ В СХЕМЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ИХ ЭЛЕКТРООБРАБОТКОЙ

В.А. Ковалев,

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

А.В. Крутов,

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

Е.А. Ковширко,

магистрант БГАТУ

Объектом исследования в статье являются сточные воды молочного производства, системы их очистки и процесс электролиза в камерах с полупроницаемой перегородкой. Приведены обзор загрязнений сточных вод одного из молочных комбинатов и результаты экспериментальных исследований по снижению общего азота и фосфора в стоках путем их электролизной обработки. Применение данного метода позволяет интенсифицировать процесс выделения биогаза из твердого осадка. При этом выход биогаза увеличивается по сравнению с традиционной биологической технологией очистки с физико-химической подготовкой в 1,3-1,5 раза. Использование биогаза в мини ТЭЦ предприятия позволит снизить энергозатраты на очистку стоков и повысить уровень обеспеченности тепловой и электрической энергией.

Ключевые слова: сточные воды, молочные комбинаты, органические загрязнения, жиры, азот, фосфор, электрокоагуляция, биологическая очистка, биогаз.

The object of research is waste water of dairy production, wastewater treatment systems, electrolysis process in chambers with a semipermeable barrier. The overview of wastewater contamination of one of dairy plants and pilot study results on reduction of total nitrogen and phosphorus content in wastewater by electrolysis treatment are presented in the article. The application of this method allows to intensify the process of biogas emission from solid deposition. In this regard biogas discharge increases by 1,3-1,5 times as compared with traditional biological treatment with physical and chemical preparation. The use of biogas in mini heat electropower station makes it possible to reduce energy consumption of wastewater treatment and increase the supply level of heat and electricity.

Keywords: wastewater, dairy plants, biocontamination, fats, nitrogen, phosphorus, electrocoagulation, biological treatment, biogas.

Введение

Технологии переработки молока требуют большого количества воды: для мойки технологического оборудования, тары, трубопроводов, охлаждения молока и молочных продуктов, уборки помещений и других хозяйственно-бытовых нужд. В результате образуются стоки в объеме до 1500 м³ в сутки. Сточные воды этой отрасли при попадании в водоем без

очистки наносят большой ущерб гидросфере и рыбоводству из-за разложения содержащихся в них органических веществ белкового происхождения, а также жиров и углеводов. Следует учесть, что для мойки технологического оборудования применяются моющие средства. Ущерб от неочищенных стоков многократно возрастает в случае, если на предприятии не решена проблема утилизации отходов производства, прежде всего, сыворотки.

Общая масса загрязнений сточных вод молочных предприятий оценивается в 400 тыс. т ежегодно [1, с. 28]. Сточные воды образуются на молочных комбинатах в результате производства таких продуктов, как твердый сыр, масло, сухая обезжиренная сыворотка, сухое обезжиренное молоко и др. Так как сточные воды содержат белковые вещества, жиры и углеводы, они очень быстро гнивают. Происходит ферментация молочного сахара в молочной кислоте, что приводит к отложению казеина и других белковых веществ. Гниение последних сопровождается выделением неприятного запаха, pH сточных вод снижается до 4,5. Сточные воды молочных производств значительно превышают требования технических нормативных правовых актов о допустимой концентрации загрязнений, предъявляемые к их приему в системы канализации населенных пунктов. Предварительная очистка стоков в основном производится путем отстаивания, обработки в гидроциклонах, флотаторах. Образующийся осадок вывозится на полигоны твердых коммунальных отходов или направляется со стоками на биологическую очистку. При сжигании биогаза получают тепловую и электрическую энергию, а осадок используют как органическое удобрение.

Цель работы – повысить эффективность очистки сточных вод молочных комбинатов путем снижения концентрации азота и фосфора в сточных водах, повышения выхода биогаза при утилизации твердого осадка и флотошлама в биогазовой установке.

Основная часть

Сточные воды молочной промышленности имеют свою специфику по составу загрязнений. Среднегодовое содержание жира в них составляет 100-200 мг/л [1]. В таблице 1 приведен качественный состав производственных сточных вод ОАО «Пружанский молочный комбинат» на основании усредненных данных за 2012 – 2014 гг., представленных в техническом задании на реконструкцию очистных сооружений [2, с. 15].

Для сброса очищенных стоков в водоемы требуется минимизация содержания в них таких элементов, как

Таблица 1. Характеристика производственных сточных вод

Показатели загрязнений	Значение показателя
pH (min-max)	3-13
БПК ₅ , мг/дм ³	1850
ХПК, мг/дм ³	3000
Взвешенные вещества, мг/дм ³	800
Аммоний-ион, мг/дм ³	25
Азот общий, мг/дм ³	120
Фосфор общий, мг/дм ³	40
Фосфор фосфатный, мг/дм ³	38
Минерализация по сухому веществу, мг/дм ³	1500
Хлорид-ион, мг/дм ³	250
Сульфат-ион, мг/дм ³	60
СПАВ (анион), мг/дм ³	1,2
Нефтепродукты, мг/дм ³	3,14
Температура (min-max), °C	25-30

азот и фосфор, которые способствуют росту водорослей в водных бассейнах. Для обезвреживания сточных вод наиболее широко применяется биологическая очистка. Технологическая схема очистки сточных вод молочного комбината приведена на рисунке 1.

Станция первичной обработки сточных вод предназначена для задержки крупномерных включений, песка. Обычно для этих целей применяется комбинированная установка – ситопескочловка в комплекте с пресс-транспортером. Ширина прозоров сит – 1-6 мм. Расход сточных вод на станции первичной очистки составляет около 120 м³/ч. Сточные воды, образующиеся в процессе отжима, отводятся в канал перед ситопескочловкой. Уплотненные отбросы и песок из ситопескочловок погружаются в контейнеры и вывозятся на полигон твердых коммунальных отходов. Далее сточные воды подаются в резервуар-усреднитель для усреднения гидравлической нагрузки на сооружения основной очистки и усреднения концентраций загрязнений. После резервуара-

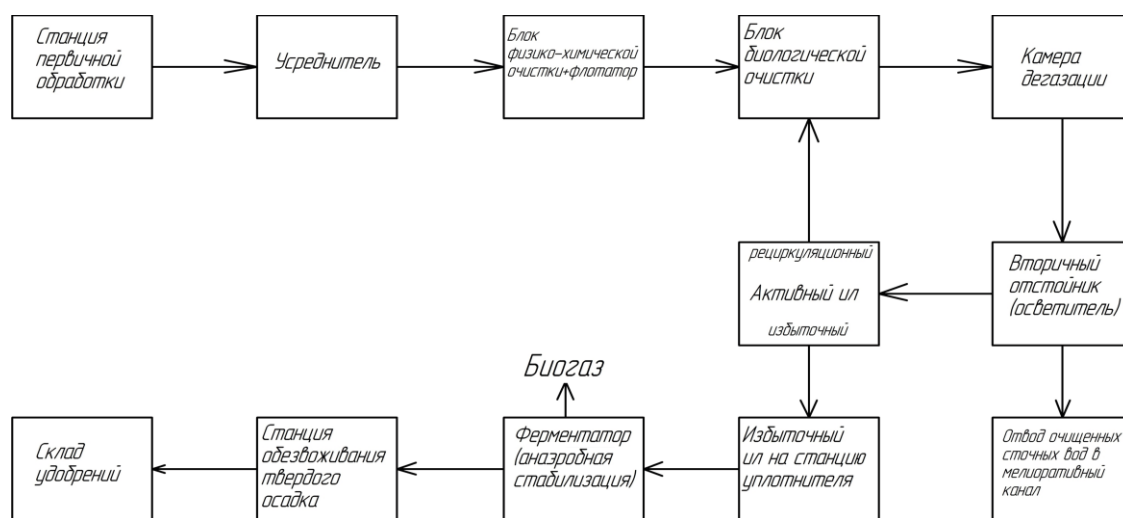


Рисунок 1. Схема технологического процесса очистки

усреднителя сточные воды при помощи насосов подаются на блок физико-химической очистки. Для удаления взвешенных веществ, жиров, нефтепродуктов и СПАВ применяется напорный флотатор. Одновременно происходит снижение общего азота и общего фосфора под воздействием различных реагентов (вводят коагулянты: хлорид железа (FeCl_3), полиэлектролит; едкий натрий (NaOH) или 70 %-й раствор серной кислоты для корректировки pH, пеногаситель). Для хранения реагентов требуется их транспортировка и помещения. Авторами публикации рассматривается способ, когда вместо физико-химической обработки стоков проводится электрофизическая их обработка в электролизной установке (электрофлотокоагуляторе) с межэлектродной полупроницаемой перегородкой. На втором этапе проводится обработка стоков и шлама по вышеуказанной схеме с образованием биогаза. В качестве материала электродов в электролизной установке применяется сталь 3.

Преимущество рассматриваемого способа состоит в том, что отпадает потребность в химических реагентах. Коагулянт (хлорид железа) образуется в процессе электролиза. В электролизере под воздействием электрического тока в водной среде происходит анодное растворение металла с образованием гидроксидов, являющихся хорошими коагулянтами. Расчеты показывают, что растворение 1 г железного электрода равнозначно введению 2,9 г хлорного железа FeCl_3 или 3,6 г сернокислого железа $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Для этого потребуется 2,9 Вт·ч электроэнергии [4, 5]. Этот метод позволяет производить эффективную очистку воды от взвесей минерального, органического и биологического происхождения, коллоидов, веществ в молекулярном и ионном состояниях, в том числе аммония и фосфатов. Электрокоагуляция обладает существенными преимуществами перед реагентными методами: компактностью установки, простотой обслуживания и возможностью полной автоматизации. При этом образующиеся в процессе электролиза газообразные водород и кислород транспортируют скоагулировавшиеся частицы загрязнений и гидроксидов из жидкости на ее поверхность. Выделяемый из стоков аммиак, сероводород и другие газы отводятся с помощью принудительной вентиляции. Отпадает необходимость применять напорную флотацию. При электрофлотации образуется меньше пены и не требуется вводить в сточные воды пеногаситель. Этот метод перспективен в условиях появления в республике излишек электроэнергии после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС.

Установлено, что процесс электрокоагуляционной очистки целесообразно осуществлять при высоких плотностях тока (не менее 1000 А/м^2). Однако высокая плотность тока вызывает пассивацию электродов. Для ее уменьшения периодически меняют полярность тока. Рекомендуемый режим электрокоагуляции:

- плотность тока – 1200 А/м^2 ;
- расстояние между электродами – не более 20 мм;
- скорость движения воды между электродами – не менее 0,5 м/с.

Выход по току металла определяется также составом очищаемой воды. Например, в присутствии хлорид-ионов выход максимальный, а сульфат- и карбонат-ионы замедляют анодное растворение. Поэтому в очищаемые стоки желательно добавлять поваренную соль, поддерживая ее концентрацию в пределах 3-4 %. При электролизе происходит снижение концентрации азота и фосфора.

Электрообработка модельного раствора, близкого по составу загрязнений к сточным водам молочного комбината, в электролизере с межэлектродной диафрагмой сопровождалась изменением водородного показателя в анодной и катодной камерах.

Параметры электрообработки:

- напряженность электрического поля – 600 В/м ;
- плотность тока – 1200 А/м^2 ;
- количество электричества – 2000 Ас .

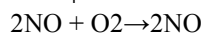
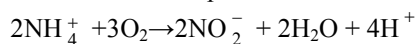
Если использовать образовавшийся католиз (pH 8-9) для получения биогаза, отмечается в 1,3-1,5 раза больший его выход в результате анаэробного брожения по сравнению со сбраживанием анолита (pH 3,5).

С целью дальнейшего снижения общего азота и общего фосфора применяется биологический реактор с отдельными камерами денитрификации, биологической дефосфатации и нитрификации.

Денитрификация – процесс восстановления нитритов и нитратов до свободного азота за счет кислорода азотсодержащих соединений. Для процессов нитрификации и денитрификации могут быть использованы аэротенки биологической очистки.

Известно, что фосфаты используются в составе моющих средств, и таким путем попадают в сточные воды. Фосфорорганические соединения хорошо растворяются в воде и опасны для окружающей среды и человеческого организма, обладают свойствами накопления в живых организмах. Поэтому важно провести дефосфатацию сточных вод. Нитрификация – процесс окисления кислородом аммонийного азота до нитритов и нитратов. Преобразование органических компонентов и окисление аммиака можно интенсифицировать путем подачи в камеру нитрификации воздуха (кислорода) компрессорами.

На первой стадии процесса нитрификации аммоний окисляется до нитритов, на второй стадии нитриты окисляются до нитратов:



Таким образом, в резервуаре нитрификации аммиак (NH_4) окисляется до нитрата (NO_3). Активный ил преобразует остатки углеводов и органических примесей стоков в воду и углекислый газ (CO_2). Часть этих остатков используется для питания микроорганизмов в активном иле и таким образом превращается в новую биомассу.

Основным при этом является метод с анаэробной обработкой активного ила, который осуществляется в ферментаторе. Применение такой технологии позволяет извлекать фосфаты с эффективностью примерно 90 % [2, с. 27].

На очередном этапе проводится обработка накопившейся биомассы (шлама) в реакторе-метантенке (ферментаторе) с образованием биогаза. Поддержка оптимальной температуры является одним из важнейших факторов процесса сбраживания. В природных условиях образование биогаза происходит при температурах от 0 °С до 97 °С, но с учетом оптимизации процесса переработки органических отходов для получения биогаза и биоудобрений выделяют три температурных режима:

- психофильный температурный режим определяется температурами до 20-25 °С;
- мезофильный температурный режим – от 25 °С до 40 °С;
- термофильный температурный режим определяется температурами свыше 40 °С.

Степень бактериологического производства метана увеличивается с увеличением температуры, но так как количество свободного аммиака тоже увеличивается с ростом температуры, процесс сбраживания может замедлиться. Биогазовые установки без подогрева реактора демонстрируют удовлетворительную производительность только при среднегодовой температуре около 20 °С и выше, или когда средняя дневная температура достигает по меньшей мере 18 °С. При средних температурах в 20-28 °С производство газа увеличивается. Если же температура биомассы менее 15 °С, выход газа будет так низок, что биогазовая установка без теплоизоляции и подогрева перестает быть экономически выгодной.

На практике более распространены два температурных режима: термофильный и мезофильный. У каждого из них есть свои достоинства и недостатки. Преимущества термофильного процесса сбраживания – это повышенная скорость разложения сырья и, следовательно, более высокий выход биогаза, а также практически полное уничтожение болезнетворных бактерий, содержащихся в сырье. К недостаткам термофильного разложения можно отнести большое количество энергии, требуемое на подогрев сырья в реакторе, чувствительность процесса сбраживания к минимальным изменениям температуры и несколько более низкое качество получаемых биоудобрений.

При мезофильном режиме сбраживания сохраняется высокий аминокислотный состав биоудобрений, но обеззараживание сырья не такое полное, как при термофильном режиме. Для климатических условий Беларуси наиболее целесообразен мезофильный режим сбраживания. В метантенке происходит мезофильное анаэробное сбраживание (ферментация) сгущенной иловой смеси, состоящей из флотационного шлама, отделенного в блоке флотации, и избыточного ила, полученного в блоке биологической очистки. В метантенке в процессе сбраживания биомассы образуется биогаз. Поскольку оптимальная температура для анаэробной обработки составляет 35-37 °С, то шлам, поступающий в метантенк следует нагреть до температуры около 38 °С. Нагрев происходит с использованием трубчатого теплообменника. В качестве теплоносителя используется горячая вода, поступающая из контура охлаждения ТЭЦ, которая, в

свою очередь, работает на биогазе, производимом в реакторе. Сам реактор представляет собой закрытый стальной, теплоизолированный резервуар. Внутренняя облицовка резервуара должна быть устойчива к кислой среде. Реактор оснащен перемешивающим устройством, приборами измерения давления и температуры биогаза, а также защитным клапаном для сброса давления. Ил, находящийся в реакторе, непрерывно перемешивается. После брожения шлам перетекает в резервуар-накопитель переработанного ила и далее – на обезвоживание и расфасовку, как удобрение. Выделяющийся биогаз поступает из реактора в резервуар для хранения биогаза (газгольдер).

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на метановое брожение, является также соотношение углерода и азота в твердом осадке. Оно должно соответствовать диапазону значений отношения масс углерода к азоту от 10 до 16 [3, 4]. Если соотношение углерода к азоту чрезмерно велико, то недостаток азота будет служить фактором, ограничивающим процесс метанового брожения. Если же это соотношение слишком мало, то образуется такое большое количество аммиака, что он становится токсичным для бактерий. Это связано с тем, что при увеличении концентрации углерода в биологическом сырье, зависящем от содержания углеводов относительно белковой массы, снижается количество аммонийного азота, что ведет к увеличению концентраций водорода и углекислого газа, и уменьшению доли метана. Как следствие, повышается кислотность среды, ведущая к снижению активности метаногенной составляющей анаэробного биоценоза. В свою очередь, увеличение белковых масс ведет к избыточному выделению аммиака, что так же ухудшает условия жизнедеятельности метанобразующих микроорганизмов.

Образование биогаза зависит и от кислотно-щелочной среды. Метанопродуцирующие бактерии лучше всего приспособлены для существования в нейтральных или слегка щелочных условиях. В процессе метанового брожения второй этап производства биогаза является фазой активного действия кислотных бактерий. В это время уровень pH снижается, то есть среда становится более кислой.

Однако при нормальном ходе процесса, жизнедеятельность разных групп бактерий в реакторе проходит одинаково эффективно и кислоты перерабатываются метановыми бактериями. Оптимальное значение pH колеблется в зависимости от сырья – от 6,5 до 8,5 [5].

Заключение

1. Биологическую очистку стоков молочных комбинатов целесообразно устраивать путем утилизации твердого осадка в метантенках с получением биогаза и органических удобрений. Для увеличения выхода биогаза предпочтительнее снижение общего азота и общего фосфора осуществлять методом электрокоагуляции в электролизере с полупроницаемой мембраной между электродами: напряженность электрического поля – 600 В/м; плотность тока – 1200 А/м²; количество электричества – 2000 Ас.

2. Процессом электрокоагуляции можно управлять в зависимости от количества электричества, расходуемого на электрообработку сточной воды по требуемой дозе растворения стальных электродов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров, В.Г. Разложение водно-жировых эмульсий в сточных водах молочного производства с использованием коагулянтов / В.Г. Петров, М.А. Шумилова, В.В. Столов // Вестник Удмуртского университета. – 2013. – Вып. 4. – С. 27-32.

2. Реконструкция комплекса локальных очистных сооружений производственных сточных вод ОАО «Пружанский молочный комбинат». Техническое задание на объект проектирования. Оценка воз-

действия на окружающую среду по объекту. – Брест, 2015. – 111 с.

3. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: монография / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Континент, 2011. – 198 с.

4. Мосин, О.В. Технологический расчет установок электрокоагуляции воды / О.В. Мосин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 4. – С. 62-85.

5. Дабаева, М.Д. Эколого-безопасная утилизация отходов: монография / М.Д. Дабаева, И.И. Федоров, А.И. Куликов. – Бурятская гос. с.-х. академия. – 2001. – 94 с.

6. Нефедов, С.С. Электрообработка жидкого субстрата птичьего помета с целью интенсификации метанообразования / С.С. Нефедов, А.В. Крутов // Агропанорама. – 2015. – № 6. – С. 27-31.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 22.11.2019

УДК 631.353.6:62-83

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЗАГРУЗКИ ВАЛЬЦОВОЙ ПЛЮЩИЛКИ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

Е.М. Прищепова,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

В молотковых дробилках зерна для регулирования их загрузки используются, как правило, роторные или шнековые дозаторы, которые имеют существенные затраты энергии на подачу зерна. В вальцовых-плющилках-измельчителях зерна наиболее целесообразно использовать шахтный способ загрузки, а степень загрузки регулировать с помощью заслонки системой автоматической стабилизации загрузки. В статье представлены структурная схема и передаточные функции системы автоматической стабилизации загрузки плющилки-измельчителя, а также структурная схема и передаточные функции частотно-регулируемого асинхронного электропривода заслонки с векторным управлением и бездатчиковой обратной связью по скорости. Далее проведен анализ качества работы регулятора загрузки с П- и ПИ-регуляторами при их оптимальной настройке.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, передаточные функции, параметры настройки, векторное управление, анализ качества работы, синтез параметров системы, система автоматической стабилизации.

Rotary or screw dispensers are usually used in hammer grain crushers to regulate their loading, which have significant energy costs for grain supply. The mine method of loading is most advisable to use in roller-flatteners - grain grinders, and a flap with an automatic loading stabilization system regulates the loading degree. The purpose of this article is to synthesize parameters of the automatic load stabilization system for a roller flattener-grain grinder. The article presents the block diagram and transfer functions of the automatic load stabilization system of the flattener-grinder, as well as the block diagram, and transfer functions of a variable frequency asynchronous electric flapper drive with vector control and speed feedback without sensors. Further, the analysis of the quality of the load controller operation with P- and PI- controllers at their optimal setting is carried out.

Keywords: variable frequency electric drive, transfer functions, setting parameters, vector control, analysis of work quality, synthesis of system parameters, automatic stabilization system.

Введение

В современном сельскохозяйственном производстве все большее применение находят вальцовые плющилки-измельчителя зерна, обеспечивающие плющение влажного зерна с последующей его консервацией и измельчение сухого зерна перед скарм-

ливанием или изготовлением комбикорма. При этом обеспечивается высокое качество приготовления измельченного зерна, в котором практически полностью отсутствует переизмельченная фракция в отличие от молотковых дробилок зерна, а также круглогодичная загруженность плющилок-измельчителей зерна. Как правило, в молотковых дробилках зерна

для регулирования их загрузки используются роторные или шнековые дозаторы, которые имеют существенные затраты энергии на подачу зерна. В вальцовых плющилках-измельчителях зерна наиболее целесообразно использовать шахтный способ загрузки зерна, а степень загрузки регулировать увеличением или уменьшением рабочей длины вальцов путем установки в шахту загрузки зерна вертикальной заслонки с регулированием ее наклона. При этом наклон заслонки может регулироваться как вручную, так и автоматически.

Цель работы – провести синтез параметров системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна.

Основная часть

Согласно технологической схеме системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна (рис. 1), зерно из расходного бункера самотеком поступает в шахту загрузки, имеющую вертикальную заслонку, верхним краем

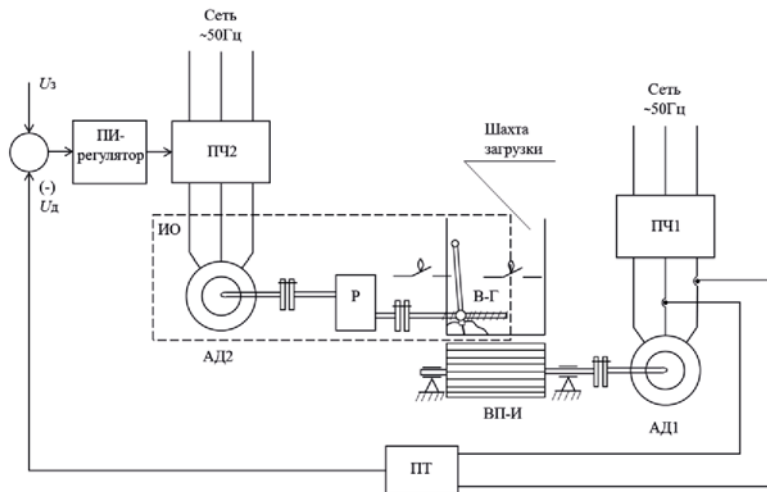


Рисунок 1. Технологическая схема системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна:

ВП-И – вальцовая плющилка-измельчитель; ПТ – преобразователь тока; ПИ-регулятор – пропорционально-интегральный регулятор; ИО – исполнительный орган (асинхронный двигатель АД2 + редуктор Р + винт-гайка В-Г); АД1 – приводной асинхронный двигатель вальцов; ПЧ1 и ПЧ2 – преобразователи частоты, соответственно, двигателя АД1 и АД2

прикрепленную к горизонтальной оси вращения и имеющую частотно-регулируемый асинхронный электропривод (ЧРАЭП) ее рычага управления через понижающий редуктор и линейную передачу винт-гайка. Регулируемый электропривод (ЭП) заслонки обеспечивает левое и правое вращение винта линейной передачи, тем самым обеспечивая движение заслонки, уменьшая или увеличивая площадь выходного сечения загрузочной шахты зерна, что в конечном счете уменьшает или увеличивает подачу зерна, а соответственно, и загрузку основного привода плющилки-измельчителя зерна. Основной привод плющилки-измельчителя питается от сети через преобра-

зователь частоты ПЧ1 соответствующей мощности, который обеспечивает оптимальную скорость вращения вальцов при минимальных удельных энергозатратах на процесс плющения или измельчения зерна [1]. Для отключения вращения привода вертикальной заслонки при ее крайних положениях в плоскости вращения рычага заслонки установлены два конечных выключателя.

Для вывода передаточных функций структурной схемы системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна на рис. 2 представлена ее кинематическая схема, дающая соотношение размеров и винт-гайки, и заслонки.

Из кинетической схемы системы стабилизации загрузки очевидно, что угловая скорость на выходе редуктора

$$\omega_p = \frac{\omega_d}{i_p}, \quad (1)$$

где ω_d – угловая скорость вала АД2, рад/с;

i_p – передаточное число редуктора, о.е.

Линейное перемещение гайки передачи винт-гайка

$$s = \frac{\int \omega_p dt \cdot h_b}{2\pi}, \quad (2)$$

где h_b – шаг резьбы винт-гайки, м/виток.

Тогда линейное перемещение края заслонки над вальцами

$$l = s \cdot \frac{h_3}{h_{b-g}} = \frac{\int \omega_p dt}{2\pi} h_b \frac{h_3}{h_{b-g}}, \quad (3)$$

где h_3 – расстояние от оси поворота заслонки до ее края, м;

h_{b-g} – среднее расстояние от оси поворота заслонки до гайки линейной передачи винт-гайка, м.

Или в операторном виде

$$l = \frac{\omega_p}{2\pi p} h_b \frac{h_3}{h_{b-g}} = \frac{\omega_d}{2\pi i_p p} h_b \frac{h_3}{h_{b-g}}, \quad (4)$$

где p – оператор дифференцирования.

Тогда передаточная функция редуктора – винт-гайки-заслонки (РВГЗ)

$$W_{РВГЗ}(p) = \frac{l}{\omega_d} = \frac{k_{\text{пмп}}}{i_p p}, \quad (5)$$

где $k_{\text{пмп}} = \frac{h_b}{2\pi} \cdot \frac{h_3}{h_{b-g}}$ – коэффициент передачи

механизма передачи винт-гайка-заслонка, м/рад.

Учитывая, что мощность, затрачиваемая на привод вальцов прямопропорциональна их длине, то и статиче-

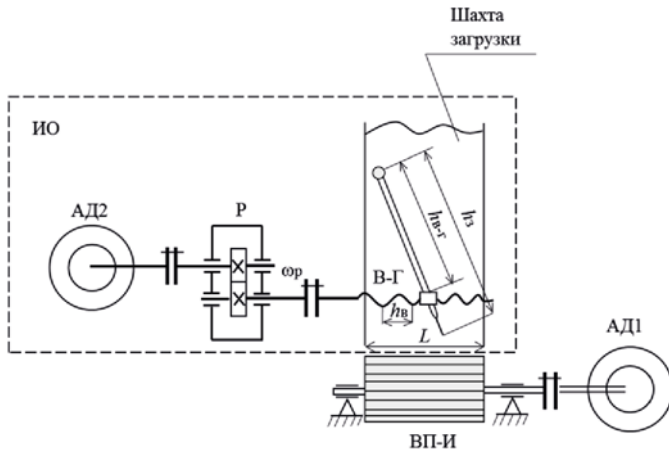


Рисунок 2. Кинематическая схема системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна: ВП-И – вальцовая плющилка-измельчитель; ИО – исполнительный орган (асинхронный двигатель АД2 + редуктор Р + винт-гайка В-Г); АД1 – приводной асинхронный двигатель вальцов; L – длина вальца, м; $h_в$ – шаг резьбы В-Г, м/виток; $h_з$ – расстояние от оси поворота заслонки до ее края, м; $h_{в-г}$ – среднее расстояние от оси поворота заслонки до гайки В-Г, м

ский момент на вальцах плющилки-измельчителя также прямопропорционален их длине, тогда передаточная функция валцов будет следующей:

$$W_{ВП-И}(p) = \frac{M_c}{L} = k_{м.уд}, \quad (6)$$

где $k_{м.уд}$ – коэффициент удельного момента загрузки вальца,

H ; L – длина вальца, м;

M_c – статический момент нагрузки на всей длине вальца, Н·м.

Так как приводной двигатель вальцов при регулировании загрузки работает на рабочих линейных участках механической и электрохимической характеристик при малых скольжениях, то ток нагрузки можно приближенно считать активным и вычислять через коэффициент пропорциональности между током и моментом нагрузки по формуле:

$$I = k_{т/м} \cdot M_c, \quad (7)$$

где $k_{т/м} = \frac{I_H}{M_H}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом нагрузки, А/(Н·м).

Учитывая, что ток обмоток статора АД1 в силу их значительной индуктивности при изменении момента статической нагрузки изменяется во времени по экспоненциальному закону с эквивалентной электромагнитной постоянной времени асинхронного двигателя:

$$T_3 = \frac{\sigma L_1}{r_3}, \quad (8)$$

где $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$ – коэффициент рассеяния обмоток АД1;

$$r_3 = r_1 + r_2' \frac{L_m^2}{L_2^2} - \text{эквивалентное сопротивление обмоток АД1, Ом.}$$

На рисунке 3 представлена структурная схема системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна.

Структурная схема системы стабилизации загрузки включает в себя:

- однозонный ЧРАЭП с векторным управлением (блок $W_{ЧРАЭП}(p)$), выполненный по аналогии со структурной схемой, приведенной в работе [2];
- ИО механизма загрузки (блок $W_{РВГЗ}(p)$);
- рабочие валцы (блок $W_{ВП-И}(p)$) и приводной двигатель (блок $W_{АД1}(p)$);
- регулятор загрузки (блок $W_{РЗ}(p)$).

Так как протекание процессов в контуре стабилизации загрузки плющилки-измельчителя имеет медленный характер по сравнению с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, то в данной САР регулируемый привод можно представить пропорциональным звеном с коэффициентом передачи (усиления)

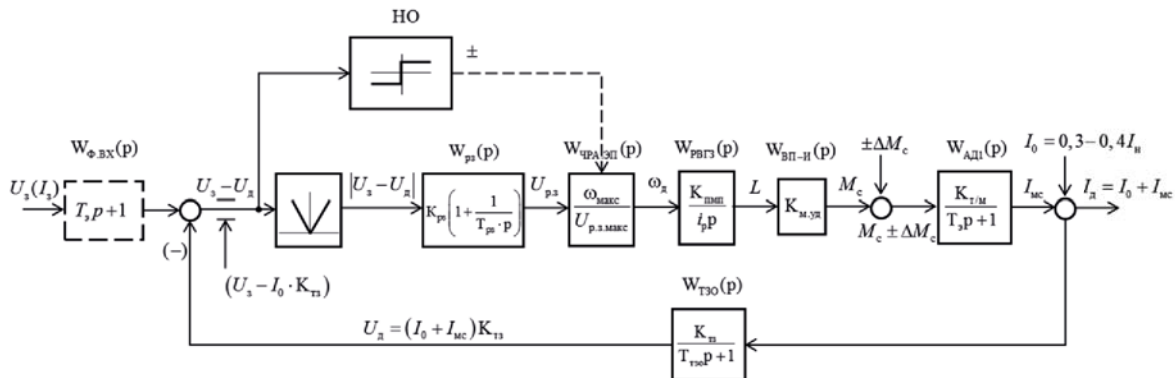


Рисунок 3. Структурная схема системы автоматической стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна

$$k_{\text{чразп}} = \frac{\omega_{\text{макс}}}{U_{\text{р.з.макс}}}, \quad (9)$$

где $\omega_{\text{макс}}$ – максимальная угловая скорость АД2, рад/с;
 $U_{\text{р.з.макс}}$ – максимальный задающий сигнал на выходе регулятора загрузки (на входе регулируемого привода), В.

Контур стабилизации загрузки имеет также инерционную обратную связь по току загрузки основного приводного двигателя (блок $W_{\text{тзо}}(p)$), где коэффициент обратной связи по току загрузки приводного двигателя вальцов

$$k_{\text{т.з}} = \frac{U_{\text{д.макс}}}{I_{\text{д.макс}}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{д.макс}}$ – максимальное напряжение на выходе блока обратной связи по току, В;

$I_{\text{д.макс}}$ – максимальный ток нагрузки приводного АД1, А.

А малая постоянная времени цепи обратной связи по току загрузки

$$T_{\text{тзо}} = \frac{T_{\text{ст}}}{3}, \quad (11)$$

где $T_{\text{ст}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} n_{\text{т}}$ – интервал преобразования ре-

зультатов измерения (вычисления) тока загрузки в регулируемом приводе вальцов, с;

$n_{\text{т}}$ – количество периодов модуляции для измерения (вычисления) тока загрузки в регулируемом приводе вальцов;

$f_{\text{шим}}$ – несущая частота широтно-импульсной модуляции в ЧРАЭП вальцов, Гц.

На вход контура регулирования загрузки подается сигнал задания $U_{\text{з}}$, который в блоке сравнения на входе контура суммируется с выходным сигналом отрицательной обратной связи по току загрузки $U_{\text{д}}$. Если суммарный сигнал ($U_{\text{з}} - U_{\text{д}}$) будет превышать значение ($U_{\text{з}} - I_0 \cdot k_{\text{тз}}$, где I_0 – ток холостого хода АД1), то привод заслонки будет отключен, так как приводной двигатель вальцов будет работать на холостом ходу, т.е. без подачи зерна в межвальцовое пространство. Как только сигнал ($U_{\text{з}} - U_{\text{д}}$) будет меньше ($U_{\text{з}} - I_0 \cdot k_{\text{тз}}$), привод заслонки начнет открытие или закрытие заслонки подачи зерна в межвальцовое пространство. Причем, если сигнал ($U_{\text{з}} - U_{\text{д}} > 0$), то заслонка будет открываться, при этом ноль орган (НО) определяет знак сигнала и дает команду на включение вращения ЧРАЭП при положительном знаке на открытие заслонки, при отрицательном знаке – на закрытие заслонки, т.е. включается реверс привода. При таком построении системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна выходной сигнал регулятора загрузки $W_{\text{рз}}(p)$ является задающим сигналом частотного преобразователя, а соответственно, угловой скорости открытия заслонки через редуктор и винт-гайку. По мере достижения загрузки заданной, разница по абсолютной величине между заданной и текущей загрузкой уменьшается, что приводит к

уменьшению скорости закрытия или открытия заслонки. Остановка двигателя привода заслонки осуществляется при сигнале $|U_{\text{з}} - U_{\text{д}}| \approx 0$ на небольшой скорости, что положительно сказывается на точности поддержания загрузки.

Передаточную функцию разомкнутого контура загрузки рассматриваемой системы (рис. 3) определим следующим образом:

$$W_{\text{раз.кз}}(p) = W_{\text{рз}}(p) \cdot K_{\text{чразп}} \cdot \frac{K_{\text{пмп}}}{i_{\text{р}}} \cdot K_{\text{м.уд}} \cdot \frac{K_{\text{т/м}}}{T_{\text{з}}p + 1} \cdot \frac{K_{\text{тз}}}{T_{\text{тзо}}p + 1} = W_{\text{рз}}(p) \cdot \frac{K_{\text{чразп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}}{p \cdot (T_{\text{з}}p + 1) \cdot (T_{\text{тзо}}p + 1) \cdot i_{\text{р}}}. \quad (12)$$

При настройке разомкнутого контура загрузки на модульный оптимум (МО), передаточная функция должна иметь следующий вид:

$$W_{\text{кз мо}}(p) = \frac{1}{2T_{\text{мкз}} \cdot p(T_{\text{мкз}} \cdot p + 1)}, \quad (13)$$

где $T_{\text{мкз}}$ – малая постоянная времени контура загрузки, с.

Далее передаточную функцию разомкнутого контура загрузки приравняем к желаемому ее виду, решаем относительно передаточной функции регулятора загрузки и в результате получим, при $T_{\text{мкз}} = T_{\text{тзо}}$.

$$W_{\text{рз}}(p) = (T_{\text{з}} \cdot p + 1) \cdot K_{\text{рз}}, \quad (14)$$

$$K_{\text{рз}} = \frac{i_{\text{р}}}{2T_{\text{тзо}} K_{\text{чразп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}} - \text{коэффициент}$$

усиления регулятора загрузки, о.е.

В данном случае имеем пропорциональный регулятор с полученным выше коэффициентом усиления $K_{\text{рз}}$ и фильтром на входе ($T_{\text{з}} \cdot p + 1$) (рис. 3).

При настройке регулятора загрузки на симметричный оптимум (СО), разомкнутый контур загрузки должен иметь передаточную функцию следующего вида:

$$W_{\text{кз со}}(p) = \frac{4T_{\text{мкз}} \cdot p + 1}{8T_{\text{мкз}}^2 \cdot p^2 (T_{\text{мкз}} \cdot p + 1)}. \quad (15)$$

Аналогично, как и в предыдущем случае, передаточную функцию разомкнутого контура загрузки приравняем к желаемому и решаем относительно передаточной функции регулятора загрузки, при $T_{\text{мкз}} = T_{\text{тзо}}$

$$W_{\text{рз}}(p) = \frac{((4T_{\text{тзо}} + T_{\text{з}}) \cdot p + 1) i_{\text{р}}}{8T_{\text{тзо}}^2 \cdot p K_{\text{чразп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}}}. \quad (16)$$

Далее умножим числитель и знаменатель полученной передаточной функции на $(4T_{\text{тзо}} + T_{\text{з}})$. После несложных преобразований получим

$$W_{\text{рз}}(p) = \left(\frac{1}{T_{\text{рз}} \cdot p} + 1 \right) \cdot K_{\text{рз}}, \quad (17)$$

$$\text{где } K_{pz} = \frac{i_p (4T_{т30} + T_3)}{8T_{т30}^2 K_{чразп} K_{пмп} K_{м.уд} K_{т/м} K_{т3}}; \quad T_{pz} = 4T_{т30} + T_3.$$

Таким образом, при настройке контура загрузки на СО, получим регулятор загрузки пропорционально-интегрального типа, т.е. ПИ-регулятор.

Затем для анализа качества работы системы загрузки найдем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования загрузки вальцовой плющилки-измельчителя при его работе с ПИ-регулятором.

$$W_{раз.кз}(p) = W_{pz}(p) \cdot K_{чразп} \cdot \frac{K_{пмп}}{i_p p} \cdot K_{м.уд} \cdot \frac{K_{т/м}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{т3}}{T_{т30} p + 1} = (T_3 \cdot p + 1) \cdot K_{pz} \cdot K_{чразп} \cdot \frac{K_{пмп}}{i_p p} \cdot K_{м.уд} \cdot \frac{K_{т/м}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{K_{т3}}{T_{т30} p + 1} = \frac{1}{2T_{т30} \cdot p \cdot (T_{т30} p + 1)}. \quad (18)$$

Далее передаточную функцию замкнутого контура по управлению для регулирования загрузки

$$W_{зам.кз}(p) = \frac{1}{W_{т30}(p)} \cdot \frac{W_{раз.кз}(p)}{1 + W_{раз.кз}(p)} = \frac{1}{K_{т3}} \cdot (T_{т30} p + 1) \cdot \frac{1 / (2T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1))}{1 + 1 / (2T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1))} = \frac{1 / K_{т3} (T_{т30} p + 1)}{2T_{т30}^2 p^2 + 2T_{т30} p + 1}. \quad (19)$$

Для анализа реакции контура регулирования загрузки на возмущающее воздействие, т.е. наброс и сброс нагрузки ΔM_c , определим передаточную функцию замкнутого контура загрузки по возмущению из выражения:

$$W_{зам.кз.в}(p) = \frac{I_d(p)}{-M_c} = \frac{W_{Ад1}(p)}{1 + W_{раз.кз}(p)} = \frac{K_{т/м} / (T_3 p + 1)}{1 + \frac{1}{2T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1)}} = \frac{2K_{т/м} T_{т30} p \cdot (T_{т30} p + 1)}{2T_{т30}^2 T_{т30}^2 p^3 + 2(T_3 T_{т30} + T_{т30}^2) p^2 + (2T_{т30} + T_3) p + 1}. \quad (20)$$

Аналогичным образом получены передаточные функции для контура регулирования загрузки вальцовой плющилки-измельчителя при его работе с ПИ-регулятором:

$$W_{раз.кз}(p) = \frac{(4T_{т30} + T_3) p + 1}{8T_3 T_{т30}^3 p^4 + 8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2}; \quad (21)$$

$$W_{зам.кз}(p) = \frac{1}{K_{т3}} \cdot \frac{(T_{т30} p + 1)((4T_{т30} + T_3) p + 1)}{8T_3 T_{т30}^3 p^4 + 8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2 + (4T_{т30} + T_3) p + 1}; \quad (22)$$

$$W_{зам.кз.в}(p) = \frac{K_{т/м} 8T_{т30}^2 p^2 (T_{т30} p + 1)}{8T_3 T_{т30}^3 p^4 + 8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2 + (4T_{т30} + T_3) p + 1} \approx \frac{K_{т/м} 8T_{т30}^2 p^2 (T_{т30} p + 1)}{8T_{т30}^2 (T_3 + T_{т30}) p^3 + 8T_{т30}^2 p^2 + (4T_{т30} + T_3) p + 1}. \quad (23)$$

Далее проведем расчет параметров настройки системы стабилизации загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна.

1. Проведем расчет мощности асинхронного двигателя для привода заслонки регулятора загрузки

При расчете мощности АД для привода заслонки необходимо определить наибольшее давление зерна на заслонку при наполно заполненном бункере по формуле:

$$p_3 = \rho_3 g h_{cp} m, \quad (24)$$

где ρ_3 – насыпная плотность зерна, кг/м³, $\rho_{пшеницы} = 850$ кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с², $g = 9,81$ м/с²;

h_{cp} – расстояние от верха засыпки зерна в бункере до середины заслонки, м, $h_{cp} = 2,1$ м;

$m = \cos^2 \alpha_{нз} + k_{бд} \sin^2 \alpha_{нз}$ – коэффициент, учитывающий боковое давление зерна на наклонную заслонку;

$\alpha_{нз}$ – угол наклона заслонки к горизонту, град;

$k_{бд} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_e}{2} \right)$ – коэффициент бокового давления зерна на вертикальную заслонку;

φ_e – угол естественного откоса, град, $\varphi_e \text{ пшеницы} = 38^\circ$.

Так как основными зерновыми культурами, используемыми в процессах плющения и измельчения зерна, являются рожь, пшеница, ячмень и овес, то необходимо произвести расчет давления для всех культур и для дальнейшего расчета выбрать наибольшее. Наибольшее давление на заслонку будет оказывать пшеница. Тогда давление зерна на заслонку

$$p_3 = 850 \cdot 9,81 \cdot 2,1 \cdot 0,4406 = 7715 \text{ Н/м}^2,$$

$$m = \cos^2 64^\circ + 0,2379 \sin^2 64^\circ = 0,4406;$$

$$\alpha_{\text{нз}} = \arctg(h_3 / L) = \arctg(0,6 / 0,3) = 64^\circ$$

– максимальный угол наклона заслонки;

$$k_{\text{од}} = \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{38^\circ}{2} \right) = 0,2379.$$

Тогда сила, действующая на заслонку при максимальном угле наклона

$$F_3 = p_3 h_3 b_{\text{ш}},$$

где $b_{\text{ш}}$ – ширина шахты загрузки, м.

$$F_3 = 7715 \cdot 0,6 \cdot 0,2 = 925,8 \text{ Н.}$$

Мощность, затрачиваемая на привод заслонки

$$P_3 = F_3 \cdot v_3, \quad (25)$$

где v_3 – скорость перемещения винт-гайки, приводящей в движение заслонку, м/с (v_3 принимаем равной 0,01 м/с);

$$P_3 = 925,8 \cdot 0,01 = 9,26 \text{ Вт.}$$

Мощность двигателя ЭП заслонки с учетом коэффициента запаса по мощности и коэффициентов полезного действия выбираемого двигателя и механических передач

$$P_d = k_3 \frac{P_3}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{в-г}}} = 1,3 \frac{9,26}{0,53 \cdot 0,9 \cdot 0,7} = 36 \text{ Вт.} \quad (26)$$

Из расчета очевидно, что мощность, затрачиваемая на регулирование загрузки, весьма незначительная в отличие от шнековых и роторных регуляторов. Далее, в качестве приводного двигателя выбираем ближайший больший по мощности двигатель серии АИР со следующими техническими данными (табл. 1).

2. Расчетные параметры электродвигателя

Номинальная скорость вращения

$$n_n = n_0 (1 - s_n) = 1500 (1 - 0,11) = 1335 \text{ об / мин.} \quad (27)$$

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,09 \text{ рад/с.} \quad (28)$$

Номинальная угловая частота вращения

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1335}{30} = 139,80 \text{ рад/с.} \quad (29)$$

Номинальный полезный момент на валу двигателя

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} = \frac{60}{139,8} = 0,4292 \text{ Н·м.} \quad (30)$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{н}} = \frac{P_n \cdot 10^3}{3 \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{60}{3 \cdot 220 \cdot 0,63 \cdot 0,53} = 0,27 \text{ А.} \quad (31)$$

3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

$\cos \varphi_{\text{р}^*}$ определим по графику, приведенному в работе [3]

$$\cos \varphi_{\text{р}^*} = 0,84 \cdot \cos \varphi_n = 0,84 \cdot 0,63 = 0,53;$$

$$\eta_{\text{р}^*} = \eta_n = 0,53.$$

Ток двигателя при частичной нагрузке АД, $0,75 P_n (p^* = 0,75)$

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_{\text{р}^*}} = \frac{0,75 \cdot 60}{3 \cdot 220 \cdot 0,53 \cdot 0,53} = 0,2427 \text{ А} \quad (32)$$

Далее вычислим значение тока холостого хода АД

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p^* I_{1\text{н}} \frac{1 - s_n}{1 - p^* \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left(p^* \frac{1 - s_n}{1 - p^* \cdot s_n} \right)^2}} = \sqrt{\frac{0,2427^2 - \left(0,75 \cdot 0,27 \cdot \frac{1 - 0,11}{1 - 0,75 \cdot 0,11} \right)^2}{1 - \left(0,75 \frac{1 - 0,11}{1 - 0,75 \cdot 0,11} \right)^2}} = 0,2077 \text{ А} \quad (33)$$

Коэффициент, характеризующий соотношение активного сопротивления статора к ротору β нахо-

Таблица 1. Технические данные выбранного АД для электропривода заслонки регулятора загрузки

Тип двигателя	P_n , кВт	η_n , %	$\cos \varphi_n$	s_n , %	$\mu_n = \frac{M_n}{M_n}$	$\mu_k = \frac{M_k}{M_n}$	$\mu_{\text{мин}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_n}$	Синхронная частота вращения n_0 , об/мин	$k_t = \frac{I_n}{I_n}$	Жд, кг·м ²	Масса, кг
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	1500	4,5	0,000029	2,6

дится в диапазоне $0,6 \dots 2,5$ [4], принимаем $\beta=1$.

Тогда критическое скольжение

$$s_k = \frac{s_n \left(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - (1 - 2s_n \cdot \beta(\mu_k - 1))} \right)}{1 - 2s_n \cdot \beta(\mu_k - 1)} = 0,11 \frac{\left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,11 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1))} \right)}{1 - 2 \cdot 0,11 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,6316. \quad (34)$$

Далее проведем проверку неравенства

$$\left(1 / s_k^2 \right) > \beta^2, \text{ т.е. } \left(1 / 0,6316^2 \right) > 1^2.$$

Если условие не выполняется, то корректируют значение β и снова рассчитывают s_k .

Если это условие выполняется, то рассчитывают коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления статора к индуктивному сопротивлению контура намагничивания АД.

$$C_1 = I + \frac{I_0}{2K_n I_{1n}} = 1 + \frac{0,2077}{2 \cdot 4,5 \cdot 0,27} = 1,085. \quad (35)$$

Затем определим параметр

$$A_1 = 3 \cdot U_{1n}^2 (1 - s_n) / (2C_1 \mu_k P_n) = 129228 / (2 \cdot 1,085 \cdot 2,2 \cdot 60) = 451,15 \text{ Ом}. \quad (36)$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора АД

$$r_2' = A_1 / (\beta + 1 / s_k) C_1 = 451,15 / (1 + 1 / 0,6316) 1,085 = 160,96 \text{ Ом}. \quad (37)$$

Активное сопротивление статорной обмотки

$$r_1 = C_1 r_2' \beta = 1,085 \cdot 160,96 \cdot 1 = 174,64 \text{ Ом}. \quad (38)$$

Далее определим коэффициент, характеризующий соотношение индуктивное сопротивление короткого замыкания АД и приведенного активного сопротивления ротора

$$\gamma = \sqrt{\left(1 / s_k^2 \right) - \beta^2} = \sqrt{\left(1 / 0,6316^2 \right) - 1^2} = 1,23. \quad (39)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{kn} = \gamma C_1 r_2' \beta = 1,23 \cdot 1,085 \cdot 160,96 = 214,61 \text{ Ом}. \quad (40)$$

Далее найдем расчетное критическое скольжение из выражения

$$s_{кр} = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + X_{kn}^2}} = \frac{1,085 \cdot 160,96}{\sqrt{174,64^2 + 214,61^2}} = 0,6312. \quad (41)$$

Так как рассчитанное критическое скольжение $s_{кр}$ практически совпадает с рассчитанным выше s_k , то продолжим расчет индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток ротора и статора. Если $s_{кр}$ и s_k не совпадают, то проводят корректировку коэффициента β согласно методике, приведенной в [5].

$$X_{2\sigma} = 0,58 X_{kn} / C_1 = 0,58 \cdot 214,61 / 1,085 = 114,72 \text{ Ом}; \quad (42)$$

$$X_{1\sigma} = 0,42 X_{kn} = 0,42 \cdot 214,61 = 90,14 \text{ Ом}. \quad (43)$$

Из векторной диаграммы АД ЭДС ветви намагничивания E_μ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_\mu = \sqrt{\left(U_{1n} \cos \varphi_n - r_1 I_{1n} \right)^2 + \left(U_{1n} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - X_{1\sigma} I_{1n} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(220 \cdot 0,63 - 174,64 \cdot 0,27 \right)^2 + \left(220 \sqrt{1 - 0,63^2} - 90,14 \cdot 0,27 \right)^2} = 172,71 \text{ В}, \quad (44)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_\mu = E_\mu / I_0 = 172,71 / 0,2077 = 831,57 \text{ Ом}. \quad (45)$$

Результаты расчета активных и индуктивных сопротивлений АД приведены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные активные и индуктивные сопротивления АД

r_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	r_2' , Ом	$X_{2\sigma}$, Ом	X_μ , Ом
174,64	90,14	160,96	114,72	831,57

$$n_t=8;$$

$$f_{\text{шим}}=8000 \text{ Гц.}$$

Постоянная времени цепи обратной связи по потокосцеплению

$$T_{\psi 0} = \frac{T_{\psi}}{3} = \frac{0,008}{3} = 0,00267 \text{ с,} \quad (56)$$

$$\text{где } T_{\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{\text{шим}}}\right) n_{\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 4 = 0,008 \text{ с}$$

– интервал расчета потокосцепления;

$$n_{\psi}=4.$$

Постоянная времени цепи обратной связи по скорости

$$T_{\omega 0} = \frac{T_{\omega}}{3} = \frac{0,008}{3} = 0,00267 \text{ с,} \quad (57)$$

$$\text{где } T_{\omega} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{\text{шим}}}\right) n_{\omega} = \left(16 \cdot \frac{1}{8000}\right) \cdot 4 = 0,008 \text{ с}$$

– период расчета (измерения) скорости;

$$n_{\omega}=4.$$

6. Оптимизация контуров САР ЭП

6.1. Оптимизация контура тока

Контур токов I_{ld} и I_{lg} идентичные.

Контур тока характеризуется одной большой постоянной времени в прямом канале $T_{\omega}=0,002 \text{ с}$ и двумя малыми постоянными времени в прямом канале, т.е. преобразователя частоты

$$T_{\omega} = \frac{0,5}{f_{\text{шим}}} = \frac{0,5}{8000} = 0,625 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (58)$$

и в цепи обратной связи $T_{\omega 0}=0,000333 \text{ с}$.

В качестве регулятора тока примем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{рт}}(p) = K_{\text{рт}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{рт}} p}\right) \quad (59)$$

и настраиваем контур тока на МО:

$$K_{\text{рт}} = \frac{T_{\omega} r_{\omega}}{a_{\text{ит}} T_{\text{мт}} K_{\text{и}} \cdot K_{\text{т}}} =$$

$$= \frac{0,002 \cdot 298,93}{2 \cdot 0,000396 \cdot 31,1 \cdot 43,46} = 0,559$$

– коэффициент усиления регулятора тока,

$$\text{где } T_{\text{мт}} = T_{\text{и}} + T_{\text{то}} = 0,0000625 + 0,000333 =$$

$$= 0,000396 \text{ с} \quad \text{– эк-}$$

вивалентная малая постоянная времени контура тока;

$$K_{\text{т}} = \frac{U_{3 \text{ т. макс}}}{I_{lg \text{ макс}}} = \frac{10}{0,244} = 43,46 \text{ В/А – коэффициент}$$

обратной связи по току;

$U_{3 \text{ т. макс}}=10 \text{ В}$ – принятое максимальное значение напряжения задания на входе контура тока;

$$I_{lg \text{ макс}} = I_{ld \text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{ЭП макс}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \sqrt{2} \cdot \sqrt{0,27^2 - 0,2077^2} = 0,244 \text{ А}$$

– максимально допустимое значение тока АД.

Максимальный ток ЭП соответствует требуемому моменту ЭП в пуско-тормозных режимах работы:

$$I_{\text{ЭП макс}} = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{ЭП макс}}}{\sqrt{2} \psi_{2\text{н}} \cdot \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_2}} \right)^2 + I_0^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0,52}{\sqrt{2} \cdot 0,7779 \cdot \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{2,6483}{3,0137}} \right)^2 + 0,2077^2} = 0,27 \text{ А.} \quad (60)$$

Максимальный момент ЭП в пуско-тормозных режимах работы принимаем равным двукратному значению максимального момента нагрузки на валу двигателя и вычислим его из выше определенной мощности двигателя

$$M_{\text{ЭП макс}} = 2 M_{\text{с. макс}} = 2 \cdot \frac{P_{\text{д}}}{\omega_{\text{н}}} =$$

$$= 2 \cdot \frac{36}{139,8} = 0,52 \text{ Н·м.} \quad (61)$$

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя частоты

$$K_{\text{и}} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{ин}}}{U_{\text{уп. макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,1, \quad (62)$$

где $U_{\text{уп. макс}}=10 \text{ В}$ – принятое максимальное значение напряжения управления на входе преобразователя частоты;

$T_{\text{рт}}=T_{\omega}=0,002 \text{ с}$ – постоянная времени регулятора тока.

Передаточная функция замкнутого контура тока по управлению имеет следующий вид:

$$W_{\text{зам. т}}(p) = \left[\frac{1}{K_{\text{т}}} (T_{\text{то}} p + 1) \right] \times \left[a_{\text{ит}} T_{\text{мт}} T_{\text{и}} T_{\text{то}} p^3 + \right.$$

$$\left. + a_{\text{ит}} T_{\text{мт}}^2 p^2 + a_{\text{ит}} T_{\text{мт}} p + 1 \right]^{-1} \approx \left[\frac{1}{K_{\text{т}}} (T_{\text{то}} p + 1) \right] \times$$

$$\times \left[a_{\text{ит}} T_{\text{мт}}^2 p^2 + a_{\text{ит}} T_{\text{мт}} p + 1 \right]^{-1} \approx \left[\frac{1}{43,46} (3,33 \cdot \right.$$

$$\cdot 3,33 \cdot 10^{-4} p + 1) \times [3,1362 \cdot 10^{-7} p^2 + 7,92 \cdot 10^{-4} p + 1]^{-1}. \quad (63)$$

Настройка контура тока близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Однако показатели качества работы оптимизированного контура тока по управлению зависят от отношения малых постоянных времени $T_{и}$ и $T_{то}$. Поскольку контур тока является внутренним контуром, то для уменьшения перерегулирования в нем на входе контура устанавливают сглаживающий фильтр с передаточной функцией

$$W_{ф.вх}(p) = \frac{1}{T_{ф.вх} p + 1}, \quad (64)$$

постоянную времени которого из соображения компенсации, выбираем $T_{ф.вх} = T_{то} = 0,000333$ с.

Тогда передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока с фильтром на входе имеет следующий вид:

$$W_{зам.т}(p) = \left[\frac{1}{K_t} \right] \times [a_{ит} T_{ит} T_{ит} T_{то} p^3 + a_{ит} T_{ит}^2 p^2 + a_{ит} T_{ит} p + 1]^{-1} \approx \left[\frac{1}{K_t} \right] \times [a_{ит} T_{ит}^2 p^2 + a_{ит} T_{ит} p + 1]^{-1} \approx [1/43,46] \times [3,13632 \cdot 10^{-7} p^2 + 7,92 \cdot 10^{-4} p + 1]. \quad (65)$$

Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

6.2. Оптимизация контура потокосцепления

При оптимизации контура потокосцепления оптимизированный замкнутый контур тока представим усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W_{кт}(p) = \frac{\frac{1}{K_t}}{a_{ит}(T_{и} + T_{то})p + 1} = \frac{\frac{1}{K_t}}{T_{мтз} p + 1}, \quad (66)$$

где $T_{мтз} = a_{ит}(T_{и} + T_{то}) = 2 \cdot 0,000396 = 0,000792$ с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

Контур потокосцепления характеризуется большой постоянной времени в прямом канале $T_2 = 0,019$ с и с малыми постоянными времени в прямом канале $T_{мтз} = 0,000792$ с и в цепи обратной связи $T_{\psi 0} = 0,00267$ с.

В качестве регулятора потокосцепления принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{р\psi}(p) = K_{р\psi} \left(1 + \frac{1}{T_{р\psi} p} \right) \quad (67)$$

и настраиваем контур потокосцепления на МО, где $T_{\psi 0} = T_2 = 0,019$ с – постоянная времени регулятора потокосцепления;

$$K_{р\psi} = \frac{T_2 K_t}{a_{ит} T_{мтз} L_m K_{\psi}} = \frac{0,019 \cdot 43,46}{2 \cdot 0,0035 \cdot 2,6483 \cdot 12,86} = 3,46$$

– коэффициент передачи (усиления) регулятора потокосцепления; $T_{мтз} = T_{мтз} + T_{\psi 0} = 0,000792 + 0,00267 = 0,0035$ с;

$$K_{\psi} = \frac{U_{3 \psi \text{ макс}}}{\psi_{2н}} = \frac{10}{0,7779} = 12,86 \text{ В/Вб} \text{ – коэф-}$$

фициент обратной связи по потокосцеплению;

$U_{3 \psi \text{ макс}} = 10$ В – максимальное значение напряжения задания на входе контура потокосцепления.

Передаточная функция замкнутого контура потокосцепления по управлению имеет следующий вид:

$$W_{зам.\psi}(p) = \left[\frac{1}{K_{\psi}} (T_{\psi 0} p + 1) \right] \times [a_{ит} T_{мтз} T_{мтз} T_{\psi 0} p^3 + a_{ит} T_{мтз}^2 p^2 + a_{ит} T_{мтз} p + 1]^{-1} \approx \left[\frac{1}{K_{\psi}} (T_{\psi 0} p + 1) \right] \times [a_{ит} T_{мтз}^2 p^2 + a_{ит} T_{мтз} p + 1]^{-1} \approx \left[\frac{1}{12,86} (2,67 \cdot 10^{-3} p + 1) \right] \times [2 \cdot 10^{-4} p^2 + 7 \cdot 10^{-3} p + 1]^{-1}. \quad (68)$$

Настройка контура близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Контур является астатической системой регулирования 1-го порядка по управлению и обеспечивает нулевую установившуюся ошибку по потоку.

6.3. Оптимизация контура скорости

Аналогично, как и при оптимизации контура потокосцепления, оптимизированный замкнутый контур тока представим усеченной передаточной функцией 1-го порядка.

В качестве регулятора скорости принимаем ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией

$$W_{рс}(p) = K_{рс} \left(1 + \frac{1}{T_{рс} p} \right), \quad (69)$$

где коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяются по выражениям:

$$K_{рс} = \frac{4J_3 K_t}{a_{сс} \cdot T_{мс} \cdot K_c \cdot K_m} = \frac{4 \cdot 0,0001 \cdot 43,46}{8 \cdot 0,003462 \cdot 0,0715 \cdot 2,0506} = 4,28,$$

где $J_3 = 1,5J_d = 1,5 \cdot 0,000029 = 0,0001$ кг·м² – эквивалентный момент инерции механической части ЭП (электродвигателя, редуктора и передачи винт-гайка);

$T_{mc}=T_{мгз}+T_{co}=0,000792+0,00267=0,003462$ с – суммарная малая постоянная времени контура скорости;

$$K_c = \frac{U_{3 \text{ с. макс}}}{\omega_H} = \frac{10}{139,8} = 0,0715 \text{ В} \cdot \text{с/рад} - \text{ко-}$$

эффициент обратной связи по скорости;

$$K_m = -\frac{3}{2} K_2 p \psi_{2d} = -\frac{3}{2} \cdot 0,8787 \cdot 2 \cdot 0,7779 = 2,0506 \text{ Вб}$$

– коэффициент момента АД;

$$\psi_{2d} = \psi_{2H};$$

$$K_2 = \frac{L_m}{L_2} = \frac{2,6483}{3,0137} = 0,8787;$$

$T_{pc}=4T_{mc}=4 \cdot 0,003462=0,01385$ с – постоянная времени регулятора скорости.

Передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению для регулирования скорости

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{(4T_{mc}p+1)(T_{co}p+1)}{a_{cc} \cdot T_{mc}^2 T_{мгз} T_{co} p^4 + a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1} \approx \frac{1}{K_c} \cdot \frac{(4T_{mc}p+1)(T_{co}p+1)}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1}. \quad (70)$$

Поскольку контур скорости является внутренним контуром для контура загрузки, то для уменьшения перерегулирования в нем на входе контура устанавливаем два сглаживающих фильтра с передаточными функциями вида

$$W_{ф.вх}(p) = \frac{1}{T_{ф.вх} p + 1} \quad (71)$$

и постоянными времени, соответственно, равными $T_{ф.вх1}=4T_{mc}=4 \cdot 0,003462=0,01385$ с; $T_{ф.вх2}=T_{co}=0,00267$ с.

Тогда передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению

$$W_{зам.с}(p) \approx \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1} \approx \frac{1}{7,15 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1}{3,3192 \cdot 10^{-7} p^3 + 9,5884 \cdot 10^{-5} p^2 + 1,3848 \cdot 10^{-2} p + 1}.$$

Настройка контура с двумя фильтрами на входе близка к точной настройке на МО системы 3-го порядка. Контур скорости представляет собой астатическую систему 1-го порядка и обеспечивает точную обработку заданного значения скорости.

7. Оптимизация контура загрузки приводного АД вальцов

Структурная схема контура загрузки приводного АД вальцов приведена на рисунке 3.

В контуре загрузки присутствует инерционная обратная связь по току приводного АД вальцов.

При оптимизации контура загрузки внутренний оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором скорости представлен усеченной передаточной функцией 3-го порядка.

$$W_{зам.с}(p) \approx \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{a_{cc} T_{mc}^3 p^3 + a_{cc} T_{mc}^2 p^2 + 4T_{mc} p + 1}, \quad (73)$$

при условии установки на входе контура скорости двух сглаживающих фильтров.

7.1. Оптимизация контура загрузки с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора загрузки с коэффициентом усиления K_{pz} и фильтром на входе ($T_3 \cdot p+1$)

$$W_{pz}(p) = (T_3 \cdot p + 1) \cdot K_{pz}, \quad (74)$$

где коэффициент усиления регулятора загрузки находится по выражению

$$K_{pz} = \frac{i_p}{2T_{тзо} K_{чразп} K_{пмп} K_{м.уд} K_{т/м} K_{тз}} = \frac{16}{2 \cdot 0,000333 \cdot 13,98 \cdot 0,0019 \cdot 333,33 \cdot 0,3 \cdot 0,345} = 26,2 \cdot 10^3,$$

$$\text{где } T_{тзо} = \frac{T_{ст}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с};$$

$$K_{чразп} = \frac{\omega_{макс}}{U_{р.з.макс}} = \frac{139,8}{10} = 13,98 \frac{\text{рад}}{\text{с} \cdot \text{В}};$$

$$K_{пмп} = \frac{h_v}{2\pi} \cdot \frac{h_3}{h_{в-г}} = \frac{0,01}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{0,6}{0,4} = 0,0019 \frac{\text{м}}{\text{рад}};$$

$$K_{м.уд} = \frac{M_c}{L} = \frac{100}{0,3} = 333,33 \text{ Н};$$

$$K_{т/м} = \frac{I_n}{M_n} = \frac{29}{98} = 0,3 \text{ А/Н} \cdot \text{м};$$

$$K_{т.з} = \frac{U_{д.макс}}{I_{д.макс}} = \frac{10}{29} = 0,345 \text{ В/А};$$

$$i_p = \frac{\omega_d}{\omega_p} = \frac{139,8}{8,74} = 16 \text{ о.е.}$$

Тогда передаточная функция разомкнутого контура загрузки с учетом оптимизированного замкнутого контура скорости с ПИ-регулятором

$$W_{\text{раз.кз}}(p) = \frac{(T_{\text{э}}p+1)i_p}{2T_{\text{тзо}}K_{\text{чразп}}K_{\text{пмп}}K_{\text{м.уд}}K_{\text{т/м}}K_{\text{тз}}}\cdot\frac{1}{K_{\text{с}}}\cdot\frac{1}{a_{\text{с}}T_{\text{мс}}^3p^3+a_{\text{с}}T_{\text{мс}}^2p^2+4T_{\text{мс}}p+1}\cdot\frac{K_{\text{пмп}}}{i_p}\cdot K_{\text{м.уд}}\cdot$$

$$\cdot\frac{K_{\text{т/м}}}{T_{\text{э}}p+1}\cdot\frac{K_{\text{тз}}}{T_{\text{тзо}}p+1}=\frac{1}{K_{\text{с}}}\cdot\frac{1}{2T_{\text{тзо}}pK_{\text{чразп}}(a_{\text{с}}T_{\text{мс}}^3p^3+a_{\text{с}}T_{\text{мс}}^2p^2+4T_{\text{мс}}p+1)}\cdot\frac{1}{(T_{\text{тзо}}p+1)}=$$

$$=\frac{1}{K_{\text{с}}K_{\text{чразп}}(16T_{\text{мс}}^3T_{\text{тзо}}^2p^5+16T_{\text{мс}}^2T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+T_{\text{мс}})p^4+8T_{\text{мс}}T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+2T_{\text{мс}})p^3+2T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+4T_{\text{мс}})p^2+2T_{\text{тзо}}p)}\cdot\quad (75)$$

Замкнутого контура по управлению

$$W_{\text{зам.кз}}(p) = \frac{1}{W_{\text{тзо}}(p)}\cdot\frac{W_{\text{раз.кз}}(p)}{1+W_{\text{раз.кз}}(p)} = \frac{(T_{\text{тзо}}p+1)}{K_{\text{тз}}}\cdot$$

$$\cdot\frac{1}{K_{\text{с}}K_{\text{чразп}}(16T_{\text{мс}}^3T_{\text{тзо}}^2p^5+16T_{\text{мс}}^2T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+T_{\text{мс}})p^4+8T_{\text{мс}}T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+2T_{\text{мс}})p^3+2T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+4T_{\text{мс}})p^2+2T_{\text{тзо}}p)+1}\approx$$

$$\approx\frac{1/K_{\text{тз}}\cdot(T_{\text{тзо}}p+1)}{K_{\text{с}}K_{\text{чразп}}(16T_{\text{мс}}^2T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+T_{\text{мс}})p^4+8T_{\text{мс}}T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+2T_{\text{мс}})p^3+2T_{\text{тзо}}(T_{\text{тзо}}+4T_{\text{мс}})p^2+2T_{\text{тзо}}p)+1}\approx$$

$$\approx\frac{1/0,345(3,33\cdot10^{-4}p+1)}{2,4\cdot10^{-4}p^4+6,692\cdot10^{-8}p^3+9,445\cdot10^{-6}p^2+6,65\cdot10^{-4}p+1}\cdot\quad (76)$$

Настройка контура с П-регулятором и фильтром на входе близка к точной настройке на МО системы 4-го порядка. Контур является астатической системой регулирования 1-го порядка по управлению. Показатели качества работы замкнутого контура загрузки по управлению согласно [7, 8] определяются следующими значениями:

– статическая ошибка по току загрузки приводного двигателя валцов при постоянном значении задающего сигнала равна нулю;

– полоса пропускания контура загрузки по модулю и по фазе

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0,532}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,532}{0,003462} = 153,668 \text{ рад/с или } f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}}{2\pi} = \frac{153,668}{2\cdot3,14} = 24,469 \text{ Гц;}$$

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} \approx \frac{0,28}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,28}{0,003462} = 80,878 \text{ рад/с или } f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}}{2\pi} = \frac{80,878}{2\cdot3,14} = 12,879 \text{ Гц;}$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке скачка загрузки

$$\sigma=53,52\%; t_{\text{пу1}}^{(5)} \approx 5,69 \cdot T_{\text{мс}} = 5,69 \cdot 0,003462 = 0,0197 \text{ с; } t_{\text{пу2}}^{(5)} \approx 18,2 \cdot T_{\text{мс}} = 18,2 \cdot 0,003462 = 0,063 \text{ с.}$$

7.2 Оптимизация контура загрузки с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора загрузки с коэффициентом усиления $K_{\text{рз}}$ и постоянной времени регулятора $T_{\text{рз}}$

$$W_{\text{рз}}(p) = \frac{((4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) \cdot p + 1)i_p}{8T_{\text{тзо}}^2 \cdot pK_{\text{чразп}}K_{\text{пмп}}K_{\text{м.уд}}K_{\text{т/м}}K_{\text{тз}}}, \quad (77)$$

$$\text{где } K_{\text{рз}} = \frac{i_p(4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})}{8T_{\text{тзо}}^2K_{\text{чразп}}K_{\text{пмп}}K_{\text{м.уд}}K_{\text{т/м}}K_{\text{тз}}} = \frac{14(4\cdot0,000333+0,007)}{8\cdot0,000333^2\cdot13,98\cdot0,0019\cdot333,33\cdot0,3\cdot0,345} = 164\cdot10^4;$$

$$T_{\text{рз}} = 4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}} = 4\cdot0,000333 + 0,007 = 0,0082 \text{ с;}$$

$T_{\text{э}}=0,007 \text{ с}$ – эквивалентная постоянная приводного АД валцов, с.

Тогда передаточная функция разомкнутого контура загрузки с учетом оптимизированного замкнутого контура скорости с ПИ-регулятором

$$W_{\text{раз.кз}}(p) = \frac{((4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1)i_p}{8T_{\text{тзо}}^3 p K_{\text{чразп}} K_{\text{пмп}} K_{\text{м.уд}} K_{\text{т/м}} K_{\text{тз}} \cdot \frac{1}{K_{\text{с}}} \cdot \frac{K_{\text{пмп}}}{i_p} \cdot K_{\text{м.уд}} \cdot \frac{K_{\text{т/м}}}{T_{\text{э}}p + 1} \cdot \frac{K_{\text{тз}}}{T_{\text{тзо}}p + 1}} = \frac{(4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1}{K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тзо}}^2 p^6 + 64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 p^4 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2)(T_{\text{э}}p + 1)(T_{\text{тзо}}p + 1)} \quad (78)$$

Замкнутого контура по управлению

$$W_{\text{зам.кз}}(p) = \frac{1}{W_{\text{тзо}}(p)} \cdot \frac{W_{\text{раз.кз}}(p)}{1 + W_{\text{раз.кз}}(p)} = \frac{(T_{\text{тзо}}p + 1)}{K_{\text{тз}}} \cdot \frac{K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тзо}}^2 p^5 + 64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 p^4 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2)(T_{\text{э}}p + 1)(T_{\text{тзо}}p + 1)}{1 + \frac{(4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1}{K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^3 T_{\text{тзо}}^2 p^5 + 64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 p^4 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2)(T_{\text{э}}p + 1)(T_{\text{тзо}}p + 1)}} \approx$$

$$\approx \left[1/K_{\text{тз}} ((5T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1) \right] \cdot \left[K_{\text{с}} K_{\text{чразп}} (64T_{\text{мс}}^2 T_{\text{тзо}}^2 (T_{\text{тзо}} T_{\text{э}} + T_{\text{мс}} (T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})) p^6 + 32T_{\text{мс}} T_{\text{тзо}}^2 (T_{\text{тзо}} T_{\text{э}} + 2T_{\text{мс}} (T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) + 2T_{\text{мс}}^2) p^5 + \right.$$

$$\left. + 8T_{\text{тзо}}^2 (T_{\text{тзо}} T_{\text{э}} + 4T_{\text{мс}} (T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) + 8T_{\text{мс}}^2) p^4 + 8T_{\text{тзо}}^2 ((T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}}) + 4T_{\text{мс}}) p^3 + 8T_{\text{тзо}}^2 p^2) + (4T_{\text{тзо}} + T_{\text{э}})p + 1 \right]^{-1} \approx$$

$$\approx \left[1/0,345 (8,665 \cdot 10^{-3} p + 1) \right] \cdot \left[2,15 \cdot 10^{-13} p^6 + 8 \cdot 10^{-11} p^5 + 1,6 \cdot 10^{-10} p^4 + 1,87 \cdot 10^{-8} p^3 + 8,87 \cdot 10^{-7} p^2 + 8,332 \cdot 10^{-3} p + 1 \right]^{-1} \quad (79)$$

Настройка контура загрузки с ПИ-регулятором близка к точной настройке на СО системы 6-го порядка. Замкнутый контур загрузки приводного АД валцов представляет собой астатическую систему 2-го порядка по управлению. Показатели качества работы замкнутого контура загрузки по управлению согласно [7, 8] определяются следующими значениями:

– статическая ошибка по току загрузки приводного двигателя валцов при постоянном значении задающего сигнала равна нулю;

– полоса пропускания контура загрузки по модулю и фазе:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0,149}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,149}{0,003462} = 43,039 \text{ рад/с или } f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{м})}}{2\pi} = \frac{43,039}{2 \cdot 3,14} = 6,853 \text{ Гц;}$$

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0,096}{T_{\text{мс}}} = \frac{0,096}{0,003462} = 27,947 \text{ рад/с или } f_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})}}{2\pi} = \frac{27,947}{2 \cdot 3,14} = 4,45 \text{ Гц;}$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке скачка загрузки

$$\sigma = 50,9\%; t_{\text{py1}}^{(5)} \approx 21,8 \cdot T_{\text{мс}} = 21,8 \cdot 0,003462 = 0,0755 \text{ с; } t_{\text{py2}}^{(5)} \approx 74,4 \cdot T_{\text{мс}} = 74,4 \cdot 0,003462 = 0,2576 \text{ с.}$$

Заключение

1. Анализ показателей качества работы замкнутого контура загрузки по управлению с П- и ПИ-регуляторами показывает, что система загрузки с ПИ-регулятором обладает несколько меньшим перерегулированием, но значительно большими временами первого и окончательного вхождения в 5 %-ю зону регулирования тока загрузки, а также меньшей полосой пропускания контура загрузки в сравнении с П-регулятором. Следовательно, в контуре регулирования загрузки приводного АД валцов по условию быстрогодействия наиболее целесообразно использование П-регулятора, так как при этом перерегулирование тока загрузки будет менее чем на 3% превышать перерегулирование при использовании ПИ-регулятора.

2. Из расчетов очевидно, что мощность двигателя ИО, затрачиваемая на регулирование загрузки вальцовой плющилки-измельчителя зерна с помощью

задвиги предложенной конструкции, значительно меньше мощности, затрачиваемой шнековыми и роторными регуляторами загрузки зерна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дайнеко, В.А. К вопросу снижения энергоемкости процесса измельчения фуражного зерна / В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2008. – № 1. – С. 35-40.
2. Прищепова, Е.М. Оптимизация параметров настройки частотно-регулируемого асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением / Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2019. – № 6 (136). – С. 28-37.
3. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Де-

ментьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

4. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

5. Гусев, Н.В. Автоматизация технологических комплексов и систем в промышленности: учебное пособие по курсовому проектированию / Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 186 с.

6. Прищепов, М.А. Структурные схемы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для частотно-регулируемого электропривода со скалярным и векторным управлением / М.А. Прищепов, В.А. Дайнеко, Е.М. Прищепова // Известия Нацио-

нальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. – 2019. – Том 57. – № 4. – С. 481-493.

7. Удуд, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие / Л.С. Удуд, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

8. Удуд, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие / Л.С. Удуд, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 06.04.2020

УДК 633.43

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ЗЕРНА ЯЧМЕНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

О.В. Бондарчук,

ст. преподаватель каф. электротехнологии БГАТУ

В статье описывается влияние электрического поля на переход влаги из связанного в свободное состояние в зерне пивоваренного ячменя.

Ключевые слова: напряженность, частота, электрическое поле, свободная влага, пивоваренный ячмень, солод.

The article describes the influence of electric field on moisture transfer from bound to free condition in brewing barley grain.

Keywords: voltage, frequency, electric field, free moisture, brewing barley, malt.

Введение

Согласно технологии [1], начальным процессом солодоращения является увеличение содержания свободной влаги в ячмене. Влага запускает последующие ферментативные процессы.

По мнению Гордеева А.М. и Шешнева В.В. [2], процесс выделения влаги протекает наиболее интенсивно при низких частотах.

Можно предположить, что наложение электрического поля данной частоты будет способствовать увеличению кинетической энергии связанных молекул воды в структуре зерна и их переход в свободное состояние.

Цель настоящей работы – описать механизм влияния электрического поля на переход связанной влаги в свободную в структуре зерна ячменя.

Основная часть

Используя известные представления о влиянии электромагнитного поля на зерно как диэлектрик, примем следующие упрощения: зерно расположено между электродами, к которым приложено напряжение пере-

менного тока; зерно однородно по механическим и электрофизическим параметрам и может считаться изотропными сферами; перенос теплоты и влаги между зернами-сферами незначителен.

Исходя из этих предположений и принципов неравновесной термодинамики [3], определяющие уравнения тепловлагопереноса с учетом приложенного электрического поля можно представить в виде:

для локального влагосодержания M , кг/кг

$$\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho_s D_v \frac{\partial M}{\partial r} \right) - m_{ev}; \quad (1)$$

для температуры сферического зерна T , К

$$\rho_s C_{Ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right) - m_{ev} \Delta h + \Phi. \quad (2)$$

Поскольку изменение во времени плотности локальной влаги мало [4], то для интенсивности ее выделения справедливо соотношение:

$$m_{ev} = - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где t – время, с;
 r – радиальная координата от центра сферы, м;
 D_v – эффективный коэффициент диффузии влаги в зерне, м²/с;

$M_{H_2O} = 18$ – молярная масса воды, г/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль);

P_v – давление водяного пара в зерне, Па;

ρ_s – плотность сухого вещества зерна, кг/м³;

C_{ps} – удельная теплоемкость влажного вещества зерна при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

λ_s – теплопроводность влажного вещества зерна, Вт/(м·К);

Δh – локальная теплота парообразования, Дж/кг;

Φ – удельная объемная электрическая мощность, выделяющаяся в зерне в виде теплоты, Вт/м³.

Удельная объемная мощность Φ , которая выделяется в зерне в результате взаимодействия электрического поля с молекулами воды:

$$\Phi = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' tg\delta E^2, \quad (4)$$

где f – частота электрического поля, Гц;

$tg\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

ε'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости;

ε' – диэлектрическая проницаемость зерна;

ε_0 – электрическая постоянная ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

E – напряженность электрического поля, В/м.

Согласно соотношению (4), мощность, выделяющаяся в зерне, пропорциональна его диэлектрической проницаемости, частоте и квадрату напряженности электрического поля. Электрическая энергия трансформируется в зерне в теплоту, аккумулированную молекулами воды. При этом электрическое поле определяет распределение теплоты в веществе зерна.

Если предположить, что электрическое поле около поверхности зерна однородное, но убывающее экспоненциально с увеличением глубины от поверхности материала, то напряженность электрического поля на концентрической оболочке при радиусе r от центра сферы может быть представлена как

$$E = E_0 [\exp(-\beta(R_p - r)) + \exp(-\beta(R_p + r))], \quad (5)$$

где E_0 – напряженность электрического поля на поверхности сферической частицы, В/м;

R_p – радиус частицы (зерновки ячменя), м.

Коэффициент ослабления β , зависящий от диэлектрической проницаемости и частоты, определяется как

$$\beta = 2\pi f \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \left((1 + tg\delta^2)^{1/2} - 1 \right) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Начальными и граничными условиями в уравнениях (1) и (2) являются:

$$M = M_0, \quad T = T_0 \quad \text{при } t = 0, \quad (7)$$

$$\left[\rho_s D \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = 0,$$

$$\left[\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} + \Delta h \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad (8)$$

$$-\left[\rho_s D \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = h_M \frac{M_{H_2O}}{RT} (P_v - P_{v\infty}), \quad (9)$$

$$-\left[\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} + \Delta h \frac{D_v M_{H_2O}}{RT} \frac{\partial P_v}{\partial r} \right] = h_p (T - T_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{RT} (P_v - P_{v\infty}) \Delta h \quad \text{при } r = R_p, \quad (10)$$

где h_p – коэффициент теплоотдачи от поверхности зерна, Вт/(м²·К);

h_M – коэффициент массоотдачи, м/с;

T_∞ – температура окружающего воздуха, К.

Давление водяных паров в окружающем воздухе рассчитывается как

$$P_{v\infty} = \phi P_{v\infty}^{sat}, \quad (11)$$

где ϕ – относительная влажность окружающего воздуха;

$P_{v\infty}^{sat}$ – давление насыщенных водяных паров, Па.

Давление водяных паров в материале сферы P_v определяется в зависимости от активности воды:

$$a_w = P_v / P_v^{sat}, \quad (12)$$

как функции температуры и влагосодержания.

Таким образом, при заданных зависимостях теплофизических параметров, характеризующих выбранный тип зерна, уравнения (1)–(9) позволяют определить влияние электрического поля на теплооблагодотенос в зерне [4].

Для дальнейшего анализа введем осредненные значения влагосодержания, температуры и удельной объемной мощности по объему зерновой частицы как

$$\begin{aligned} \bar{M}(t) &= \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 M dr, \\ \bar{T}(t) &= \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 T dr, \\ \bar{\Phi}(t) &= \frac{4\pi}{V_p} \int_0^{R_p} r^2 \Phi dr, \end{aligned} \quad (13)$$

где V_p – объем частицы.

Тогда согласно вышеприведенным определениям, интегрирование уравнений (1)–(2) с учетом равенства (3) и граничных условий (11) позволяет получить следующую систему дифференциальных уравнений:

для среднего влагосодержания сферического зерна M , кг/кг

$$\rho_s \frac{d\bar{M}}{dt} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} h_M \frac{M_{H_2O}}{RT} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}). \quad (14)$$

для средней температуры сферического зерна T , К

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d\bar{T}}{dt} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} + \left[h_p (T|_{r=R_p} - T_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{RT|_{r=R_p}} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}) \Delta h \right] + \bar{\Phi}, \quad (15)$$

где $T|_{r=R_p} = \bar{T}$;

$P_v|_{r=R_p}$ – давление водяного пара на поверхности зерна.

Тогда уравнение (13) будет иметь вид:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d\bar{T}}{dt} = -\frac{4\pi R_p^2}{V_p} + \left[h_p (\bar{T} - T_\infty) + h_M \frac{M_{H_2O}}{RT|_{r=R_p}} (P_v|_{r=R_p} - P_{v\infty}) \Delta h \right] + \bar{\Phi}. \quad (16)$$

Введем следующее предположение об изменении среднего влагосодержания в зерновой частице [5]. В начале процесса имеется небольшой период, когда влагосодержание материала меняется незначительно. Затем устанавливается постоянная скорость выделения влаги, в это время температура влажного материала изменяется также незначительно. Тогда уравнение (14) можно упростить и записать:

$$\rho_s \frac{d\bar{M}}{dt} = -N, \quad (17)$$

где N – параметр скорости выделения влаги является постоянной величиной.

Влагосодержание из уравнения (13) определим по формуле:

$$\bar{M}(t) = \bar{M}_0 + tN / \rho_s. \quad (18)$$

Учитывая уравнения (12) и (15), для расчета

средней температуры уравнение (14) можно записать в виде:

$$\rho_s C_{Ps} \frac{d(\bar{T} - T_\infty)}{dt} + \frac{4\pi R_p^2}{V_p} h_p (\bar{T} - T_\infty) = -N + \bar{\Phi}. \quad (19)$$

Здесь скорость выделения влаги N входит в качестве параметра, а правая часть уравнения постоянна. Применив метод с разделяющимися переменными, можно показать, что решением уравнения (16) является зависимость:

$$\bar{T} - T_\infty = k_1 \exp\left(-\frac{4\pi R_p^2}{V_p \rho_s C_{Ps}} h_p t\right) + \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N). \quad (20)$$

Учитывая начальное условие при $t = 0$ $\bar{T} = T_0$, из последнего уравнения следует, что

$$k_1 = \bar{T}_0 - T_\infty - (\bar{\Phi} - N) V_p / (4\pi R_p^2 h_p).$$

$$\bar{T}(t) = T_\infty + \left(\bar{T}_0 - T_\infty - \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N) \right) \times \exp\left(-\frac{4\pi R_p^2}{V_p \rho_s C_{Ps}} h_p t\right) + \frac{V_p}{4\pi R_p^2 h_p} (\bar{\Phi} - N). \quad (21)$$

Таким образом, при известной температуре в начальный момент и разности температур $\bar{T}(t_k) - T_0$ в момент времени после обработки, из равенства (19) можно определить скорость выделения влаги N с учетом величины удельной объемной мощности $\bar{\Phi}$, а из равенства (16) рассчитать изменение влагосодержания.

В качестве начальных условий задают начальную температуру T_0 и влагосодержание M_0 частицы, относительную влажность ϕ и температуру T_∞ окружающего воздуха, частоту f и напряженность электрического поля E_0 .

В таблице 1 приведены теплофизические и диэлектрические характеристики параметров зернового материала от температуры и влагосодержания [6, 7].

Таблица 1. Теплофизические и диэлектрические характеристики зернового материала

Характеристика	Формула
Коэффициент диффузии влаги	$D = 7.67 \cdot 10^{-3} \exp(6140 / T)$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_s = 0.1337 + 0.252M$
Удельная теплоемкость	$C_{Ps} = 1260 + 3600(M / (1 + M))$
Локальная теплота парообразования	$\Delta h = -0.0469(T - 273.15)^2 - 13.493(T - 273.15) + 52202$
Давление насыщения водяных паров	$P_v^{sat} = 1.014 \cdot 10^5 \exp(13.765 - 5123 / T)$
Активность воды в материале зерновой частицы (изотерма сорбции)	$\ln a_w = -9.049 \exp(-21.065M) + 24.868 \exp(-27.994M) M^{1.022} \ln P_v^{sat}$
Диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon' = \left(0.7057 + 0.0380 \log_{10} f + 0.0114T(1 - 0.11 \log_{10} f) + 2.37 \cdot 10^{-7} \left(\frac{XT}{1 + \log_{10} f} \right)^2 \right) \times$ $\times (1 + 0.755(0.403 - 0.0265 \cdot \log_{10} f + 0.0434 \cdot X - 0.0072X \log_{10} f))^3$
Относительное влагосодержание	$X = 100M / (1 + M)$
Плотность зерна	$\rho_s = 610 \text{ кг/м}^3$

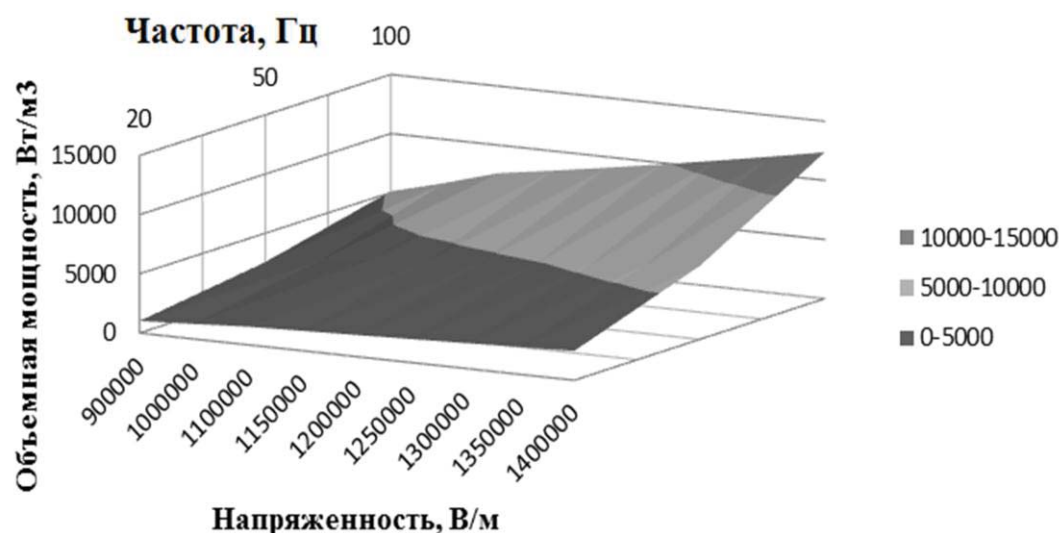


Рисунок 1. Зависимость объемной мощности, выделяющейся в зерне от напряженности и частоты электрического поля

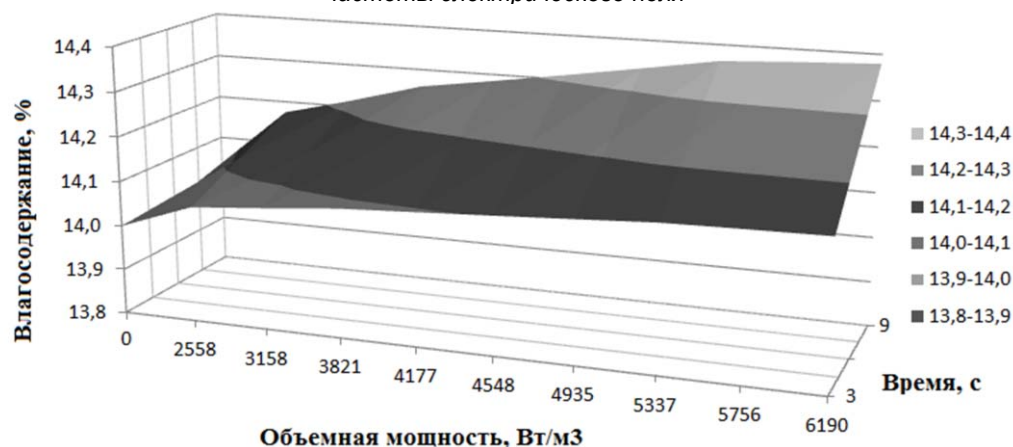


Рисунок 2. Зависимость влагосодержания в зерне ячменя от объемной мощности электрического поля и времени обработки

В результате численного эксперимента, по уравнениям (18)-(21) построены графические зависимости объемной мощности, выделяющейся в зерне от параметров электрического поля (напряженности и частоты) (рис. 1), и влагосодержания в зерне ячменя от объемной энергии (рис. 2). Также в НИАЛ НИИМЭСХ БГАТУ был проведен лабораторный эксперимент, результаты которого подтверждают теоретические расчеты численными результатами.

Заключение

В результате исследования получены аналитические закономерности преобразования влаги зерна в электрическом поле. Построенные по ним графические зависимости подтверждают влияние электрического поля на влагосодержание в зерне ячменя. Основными параметрами поля, оказывающими воздействие на влагу, являются напряженность и частота. Оптимальные параметры находятся в диапазоне: напряженность – 1,2-1,3 МВ/м, частота –

40-60 Гц. Данные зависимости позволяют моделировать и оптимизировать параметры электрообработки зерна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беланов, П.Е. Технология солода: учеб.-метод. пособие / П.Е. Беланов, И.В. Смотраева. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 82 с.
2. Гордеев, А.М. Электричество в жизни растений / А.М. Гордеев, В.Б. Шешнев. – М.: Наука, 1991. – 160 с.
3. Luikov, A.V. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies (Review) / A.V. Luikov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1975. – P. 1-14.
4. Hii, C.L. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer / C.L. Hii, C.L. Law M.C. Law // Applied Thermal Engineering. – 2013. – 54. – P. 264-271.

5. Самарский, А.А. Численные методы математической физики / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – 2-е изд. – М.: Научный мир, 2003. – 316 с.

6. Pabis, S. Grain drying. Theory and practice / S. Pabis, D.S. Jayas, S.T. Cenkowski. – John Wiley & Sons, Inc. New York. – 1998. – 303 p.

7. Ratti, C. A new water sorption equilibrium expression for solid foods based on thermodynamic considerations / C. Ratti, G.H. Crapiste, E. Rotstein // Journal of Food Science. – 1989. – 54(3). – P. 738-747.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 01.04.2020

Радиоволновой влагомер зерна

Предназначен для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход – 4-20 мА, а также интерфейс – RS-485.



Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна
Основная абсолютная погрешность
Температура контролируемого материала
Цена деления младшего разряда блока индикации
Напряжение питания
Потребляемая мощность

от 9 до 25 %
не более 0,5 %
от +5 до +65 °C
0,1 %
220 В 50 Гц
30 ВА

“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 1-е полугодие 2020 года: для индивидуальных подписчиков - 21,06 руб., ведомственная подписка - 24,51 руб.

УДК 631.151.6

РАЗВИТИЕ АГРАРНОГО БИЗНЕСА В КОНТЕКСТЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Н.В. Киреенко,

зав. каф. инновационного развития АПК ИПК и ПК АПК БГАТУ, докт. экон. наук, доцент

В статье представлены результаты научного исследования по оценке эффективности аграрного бизнеса Беларуси и вклада субъектов хозяйствования в обеспечение продовольственной безопасности на национальном и региональном уровнях. Выявлен комплекс проблем производственного, технологического, экономического и финансового характера, влияющих на результативность функционирования агропромышленного комплекса. Выделены приоритетные направления развития аграрного бизнеса в контексте обеспечения национальной продовольственной безопасности на перспективу.

Ключевые слова: аграрный бизнес, аграрная политика, продовольственная безопасность, агропромышленный комплекс, сельскохозяйственная продукция, продукты питания, экспорт, импорт.

The article presents the results of a scientific study to assess the effectiveness of the agricultural business in Belarus and the contribution of business entities to food security at the national and regional levels. A complex of industrial, technological, economic and financial problems that affect the performance of the agro-industrial complex has been identified. Priority directions for the development of agricultural business are highlighted in the context of ensuring national food security in the future.

Keywords: agricultural business, agricultural policy, food security, agro-industrial complex, agricultural products, food, export, import.

Введение

Аграрный бизнес в Республике Беларусь является важным элементом национальной экономической системы и включает организации в сфере производства сельскохозяйственной продукции и продуктов питания, сервисного обслуживания, обслуживающей инфраструктуры и подготовки кадров. Государственной программой развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016-2020 годы определена стратегическая цель – повышение эффективности сельскохозяйственного производства и сбыта сельскохозяйственной продукции и продуктов питания, а также повышение их конкурентоспособности, обеспечение внутреннего рынка страны отечественной сельскохозяйственной продукцией и продовольствием в необходимых объемах и надлежащего качества на основе формирования рыночных механизмов хозяйствования и развития аграрного бизнеса [1].

Сегодня Беларусь является самодостаточным в продовольственном отношении и экспортоориентированным государством, имеет развитую систему мониторинга и обеспечения продовольственной безопасности. В стране утверждена Доктрина национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года как система официальных государственных стратегических положений [2]. Согласно данным глобального рейтинга продовольственной безопасности «The Economist Intelligence Unit» за 2019 г., наша страна находится на 36-м месте из 113 государств мира (в 2018 г. – 44 место) и харак-

теризуется как государство с благоприятными условиями обеспечения продовольствием [3].

Наряду с этим, в продовольственной сфере появляются новые внутренние и внешние вызовы и угрозы, которые необходимо прогнозировать и учитывать при планировании деятельности организаций агропромышленного комплекса (АПК). В развитие данного направления цель работы состоит в проведении комплексного анализа и обосновании результатов функционирования субъектов аграрного бизнеса Республики Беларусь по обеспечению продовольственной безопасности как необходимого условия реализации национального приоритета.

Научное исследование базируется на данных Национального статистического комитета Республики Беларусь, Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, международных организаций, изучении и обобщении национальной нормативной и правовой базы в сфере развития аграрного бизнеса, продовольственной безопасности, внешней и внутренней торговли. Использованы методы системного и сравнительного анализа.

Основная часть

Продовольственная безопасность обеспечивается совокупностью экономических, социальных и иных факторов, обуславливающих развитие сельского хозяйства, агропродовольственного комплекса и экономики в целом. В соответствии с Доктриной национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до

2030 года одна из главных задач состоит в стабильности производства сельскохозяйственной продукции и продуктов питания на основе устойчивого функционирования субъектов аграрного бизнеса [1].

В республике производителями сельскохозяйственной продукции являются сельскохозяйственные организации (79,3 %), крестьянские (фермерские) хозяйства (2,0 %) и население (18,7 %). Основное место занимают крупнотоварные сельскохозяйственные организации, численность которых за последние десять лет сократилась за счет реорганизации, продажи предприятий как имущественных комплексов с привлечением инвесторов и др. В последние годы отмечается устойчивая динамика роста численности крестьянских (фермерских) хозяйств (К(Ф)Х), количество которых на начало 2019 г. составило 3 196 (в 2010 г. – 2 118, в 2015 г. – 2 482). В разрезе регионов их увеличение наблюдается в Брестской, Гомельской и Минской областях.

В 2019 г. производство продукции сельского хозяйства составило 20,9 млрд руб. (в текущих ценах) и увеличилось по сравнению с 2018 г. на 2,9 % (в сопоставимых ценах). При этом в сельскохозяйственных организациях данный показатель возрос на 4,2 % до 17,3 млрд руб. Анализ структуры продукции по ви-

дам и всем категориям хозяйств республики показал, что удельный вес животноводства в объеме валовой продукции составил 54,7 %, растениеводства – 45,3 %. В то же время в разрезе производителей имеются существенные различия. Сельскохозяйственные организации производят более 65 % продукции животноводства, а на долю растениеводства приходится почти 35 %. К(Ф)Х и хозяйства населения специализируются на продукции растениеводства (90,4 % и 87,3 % соответственно).

Выполненные исследования позволили установить увеличение производства основных сельскохозяйственных культур в 2019 г., что было обусловлено ростом урожайности и расширением посевных площадей (например, льна-долгунца на 4,5 %, зерновых и зернобобовых культур – на 4,4, рапса – на 0,9 %). При этом в 2018 г. причиной снижения темпов производства продукции растениеводства явились неблагоприятные погодные условия в весенне-летний период (табл. 1).

В 2019 г. по отношению к 2018 г. также отмечался рост основных показателей производства продукции животноводства (табл. 2). Так, в Брестской области выращивание скота и птицы возросло на 3,5 %, в Минской – на 2,0, Могилевской – на 0,4 %. В Витеб-

Таблица 1. Валовой сбор и урожайность основных сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Республики Беларусь за 2018 – 2019 гг.

Продукция	Валовой сбор, тыс. т			Урожайность, ц/га		
	2018 г.	2019 г.	2019 г. в % к 2018 г.	2018 г.	2019 г.	2019 г. в % к 2018 г.
Хозяйства всех категорий						
Зерновые и зернобобовые	6 150,5	7 330,9	119,2	26,7	30,4	113,9
Картофель	5 864,3	6 105,3	104,1	216	229	106,0
Овощи	1 745,9	1 854,5	106,2	265	284	107,2
Свекла сахарная	4 809,4	4 927,3	102,5	477	519	108,8
Рапс	456,3	578,1	126,7	13,1	16,8	128,2
Льноволокно	39,5	46,2	117,1	8,7	9,4	108,0
В том числе сельскохозяйственные организации						
Зерновые и зернобобовые	5 826,2	6 937,4	119,1	26,8	30,4	113,4
Картофель	597,9	652,7	109,2	242	282	116,5
Овощи	228,1	236,6	103,7	205	234	114,1
Свекла сахарная	4 698,6	4 806,0	102,3	478	519	108,6
Рапс	447,1	560,3	125,3	13,0	16,7	128,5
Льноволокно	39,5	46,2	117,1	8,7	9,4	108,0

Примечание. Таблица составлена автором по данным источников [4, 5].

Таблица 2. Основные показатели производства продукции животноводства в хозяйствах всех категорий Республики Беларусь за 2018 – 2019 гг.

Продукция	Год		2019 г. в % к 2018 г.
	2018	2019	
Хозяйства всех категорий			
Производство (выращивание) скота и птицы (в живом весе), тыс. т	1 802,3	1 808,2	100,3
Производство молока, тыс. т	7 341,2	7 392,6	100,7
Производство яиц, млн шт.	3 363,2	3 514,5	104,5
Сельскохозяйственные организации			
Производство (выращивание) скота и птицы (в живом весе), тыс. т	1 712,7	1 724,7	100,7
Производство молока, тыс. т	7 035,3	7 112,7	101,1
Производство яиц, млн шт.	2 753,2	2 910,1	105,7
Примечание. Таблица составлена автором по данным источников [4, 5].			

Примечание. Таблица составлена автором по данным источников [4, 5].

ском регионе производство скота и птицы снизилось на 1,5 %, Гродненском – на 1,4 %, Гомельском – на 0,3 %. Средний удой молока от коровы в сельскохозяйственных организациях в 2019 г. составил 5 043 кг, что на 39 кг (на 0,8 %) больше, чем в 2018 г.

В стране сформирована эффективная система экономических взаимоотношений производителей сельскохозяйственной продукции с организациями по производству продуктов питания и напитков. Мясокомбинаты перерабатывают около 70,0 % всего реализованного скота, на молокоперерабатывающие заводы направляется 90,0 % производимого молока, в том числе закупаемого у К(Ф)Х и хозяйств населения. Организации масложировой, спиртовой, пивоваренной, хлебопекарной и зерноперерабатывающих отраслей под полную потребность обеспечиваются сырьем в соответствии с государственным заказом. Компании плодоовощной, ликероводочной, винодельческой промышленности работают с поставщиками сельскохозяйственного сырья самостоятельно на договорных отношениях. В 2019 г. объем производства продуктов питания и напитков в сопоставимых ценах составил 102,1 % к уровню 2018 г. или 24,3 % в общем объеме промышленного производства (табл. 3).

Действующая структура производственного аграрного бизнеса позволяет гарантировать физическую доступность для населения продуктов питания преимущественно за счет продукции собственного производства, в том числе молока и молокопродуктов – на 235,1 %, мяса и мясопродуктов – 135,2 %, яиц – 123,7 %, картофеля – 106,4 %. Сохраняется низкий уровень самообеспечения рыбой (15,0 %), фруктами и ягодами (80,5 %). Отсутствуют значимые улучшения качества питания, а по некоторым позициям отмечается и снижение. Потребление свежих овощей и фруктов, рыбы и рыбопродуктов недостаточно вследствие высокой цены, особенно в зимний период времени.

Уровень питания в Беларуси не ограничен ресурсами собственного производства, хотя рацион белорусов и остается несбалансированным по качественным параметрам. В последние годы отмечается рост доли импортных продовольственных товаров, приобретаемых населением республики (в 2018 г. – 21,4 %, в

2019 г. – 22,5 %). В структуре импорта преобладают плоды – 15,4 %, рыба и ракообразные – 8,3 %, овощи – 7,1 %. Основными странами-экспортерами сельхозпродукции в Беларусь являются Россия, Украина, Польша.

Вместе с тем, при общем высоком уровне самообеспечения в стране и на основе проведенных автором исследований, выявлено, что в производственно-финансовой и сбытовой сфере Беларуси сохраняется ряд проблем. Так, финансовое положение хозяйств не позволяет в полном объеме обеспечивать закупку и внесение минеральных удобрений, средств защиты растений и других материально-технических средств в соответствии с требованиями отраслевых регламентов возделывания сельскохозяйственных культур. В 2018 г. организациями было внесено 58 % к потребности минеральных удобрений (в 2017 г. – 47 %) [6, 7]. Фактический показатель рентабельности сельскохозяйственного производства является недостаточным для осуществления нормативного воспроизводственного процесса. В 2019 г. он составил 8,0 %, в 2018 г. – 5,0 %, а без учета государственной поддержки – 0,3 % и 1,2 % соответственно.

Соотношение суммарной задолженности и выручки от реализации продукции составило 108,9 %. По состоянию на 1 января 2020 г. первый показатель составил 14 143,3 млн руб., второй – 12 987,0 млн руб. Кредиторская задолженность сельскохозяйственных организаций увеличилась на 12,1 %, а ее удельный вес в общей суммарной задолженности составил 59,9 %, что отрицательно сказывается на конкурентоспособности отечественных товаропроизводителей на мировом агропродовольственном рынке [4, 8]. Положительной тенденцией является сокращение по итогу 2019 г. количества убыточных субъектов хозяйствования на 3,4 % (до 122 организаций), удельный вес которых составил 9,1 %. В то же время сохраняется значительное число убыточных предприятий без государственной поддержки (808 единиц, или 60,4 % от общего количества).

География экспорта сельскохозяйственной продукции и продуктов питания охватывает 104 страны, однако значительная часть поставок ориентирована на рынок Российской Федерации. Поэтому сложившаяся ситуация «монопольная» в белорусском экспорте в перспек-

**Таблица 3. Производство отдельных видов продуктов питания
Республики Беларусь за 2018 – 2019 гг., тыс. т**

Продукция	Год		2019 г. в % к 2018 г.
	2018	2019	
Мясо и субпродукты пищевые	1 034,0	1 073,3	103,8
из них:			
говядина	220,0	224,0	101,8
свинина	233,5	230,2	98,6
мясо птицы	507,3	547,4	107,9
Колбасные изделия	265,6	256,6	96,6
Цельномолочная продукция (в пересчете на молоко)	1 985,4	2 011,2	101,3
Молоко и сливки сухие	164,4	150,1	91,3
Масло сливочное	114,7	115,6	100,8
Сыры (кроме плавленого сыра)	203,2	242,4	119,3
Сахар	638,1	639,4	100,2
Масла растительные	362,7	389,2	107,3

Примечание. Таблица составлена автором по данным источника [4].

тиве может привести к негативным последствиям для национального агропродовольственного сектора. Вместе с тем, следует отметить планомерное снижение удельного веса России в общих объемах национальных экспортных поставок. Так, например, в 2016 г. этот показатель составлял 89,4 %, в 2017 г. – 85,3 %, в 2018 – 2019 гг. – 80,0 %. Экспорт отечественной продукции недостаточно диверсифицирован и по товарной направленности. Агропродовольственную корзину формируют продукты животного происхождения (молоко и молокопродукты, мясо и мясные субпродукты). Их доля в общих объемах экспорта достигает 60 %.

Организации Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь и концерна «Белгоспищепром» являются основными поставщиками продукции на внешние рынки, на долю которых приходится около 65,0 % экспортных поставок. Аграрная товаропроводящая сеть (ТПС) по количеству и выполняемым функциям не может в полной мере обеспечить эффективную внешнюю торговлю сельскохозяйственных товаров. Так, ТПС Минсельхозпрода за рубежом по итогу за 2019 г. включала 174 структуры, в том числе 28 (16,1 %) с долей белорусских инвестиций (первая группа – торговые дома, торговые представительства и филиалы, совместные предприятия, торговые точки) и 146 (83,9 %) без участия отечественного капитала (вторая – дилерские и дистрибьюторские структуры). При этом по отношению к 2018 г. количество организаций первой группы снизилось на 20 %, второй – увеличилось на 1,4 %. ТПС концерна «Белгоспищепром» представлена десятью торговыми домами, функционирующими на территории стран СНГ и вне СНГ, численность которых за последние 5 лет снизилась более чем на 40 %.

В целом проведенный комплексный анализ результатов функционирования субъектов аграрного бизнеса Республики Беларусь показал, что достигнутые объемы аграрного производства не только соответствуют оптимистическому уровню продовольственной безопасности, но и позволяют наращивать экспорт сельскохозяйственных и продовольственных товаров, обеспечивая поступление валютных средств. В то же время выделенный комплекс проблем производственного, технологического, экономического и финансового характера требует системного решения.

Заключение

Установлено, что современный уровень развития субъектов аграрного бизнеса Беларуси позволяет гарантировать физическую доступность для населения продуктов питания и обеспечивать национальную продовольственную безопасность. Наряду с этим, эффективность производства и реализации сельскохозяйственных и продовольственных товаров продолжает оставаться на невысоком уровне. Данная ситуация обусловлена не только и не столько внутренними причинами (несоблюдение технологических регламентов и производственной дисциплины, высокий уровень текучести кадров, несовершенная система мотивации и др.), сколько общеэкономической ситуацией, сложившейся в стране в последние годы.

Основное внимание должно быть уделено вопросам повышения эффективности сельскохозяйственного производства на макро- и микроуровне, соблюдения технологической дисциплины, внедрения передового опыта, а также совершенствования макроэкономической политики, включая финансово-кредитную, налоговую, ценовую, валютную.

Дальнейшее развитие аграрного бизнеса страны должно быть направлено на обеспечение национальной продовольственной безопасности за счет реализации приоритетных направлений, предусмотренных Доктриной национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года [1]:

- устойчивое развитие и повышение эффективности агропродовольственного комплекса;
- насыщение внутреннего рынка качественными продуктами питания отечественного производства (при увеличении доли продуктов здорового питания и органических пищевых продуктов до 20 %);
- повышение эффективности внешней торговли сельскохозяйственной продукцией и продовольствием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. О Государственной программе развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016-2020 годы: пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 11 марта 2016 г. № 196 / Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь от 23 марта 2016 г. № 5/41842.
2. О Доктрине национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года: пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 15 декабря 2017 г. № 962 / Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2017. – № 5/44566.
3. Global Food Security Index [Electronic resource] // The Economist Intelligence Unit. – 2019. – Mode of access: <https://foodsecurityindex.eiu.com/Index>. – Data: 31.12.2019.
4. Социально-экономическое положение Республики Беларусь: январь-декабрь 2019 г. – Минск: Национальный стат. комитет Респ. Беларусь, 2020. – 80 с.
5. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. / Национальный стат. комитет Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – 211 с.
6. Актуальные тенденции и перспективные направления развития отраслей АПК Республики Беларусь / Н.В. Киреенко [и др.] // Белорусский экономический журнал. – 2019. – № 2. – С. 87-100.
7. Кондратенко, С.А. Устойчивое развитие регионального агропродовольственного комплекса: теория, методология, практика / С.А. Кондратенко. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2019. – 286 с.
8. Киреенко, Н.В. Диверсификация государственной поддержки сельского хозяйства Беларуси с учетом международных требований и обязательств / Н.В. Киреенко, И.А. Казакевич // Белорусский экономический журнал. – 2018. – № 4. – С. 65-76.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.03.2020

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 желательно продолжение перенести на следующую строку;

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, используются 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 «Заклучение» 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:

*220023, г. Минск, пр-т Независимости, 99,
корп. 5, к. 602; 608. БГАТУ*

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Институт повышения квалификации и
переподготовки кадров АПК БГАТУ**

Уважаемые коллеги!

**Приглашаем Вас принять участие в работе 7-й
Международной научно-практической конференции
*«Актуальные проблемы инновационного
развития и кадрового обеспечения АПК»*,
которая состоится в Белорусском
государственном аграрном техническом
университете**

4 - 5 июня 2020 г.

Основные направления работы конференции:

- **Инновации в технологиях, организации и управлении производством АПК**
- **Развитие системы кадрового обеспечения инновационного аграрного производства и формирование единого образовательного пространства**

**г. Минск, пр-т Независимости, 99, корпус 1
Контактные телефоны: (+ 375 17) 272-61-55, 385-91-20
(+375 17) 272-92-40
E-mail: noio.ipk@bsatu.by
www.bsatu.by**

