



ISSN 2078-7138 (Print)
ISSN 2078-7146 (Online)
DOI: 10.56619/2078-7138-2025-169-3

АГРОПАНОРАМА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ РАБОТНИКОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

№ 3
ИЮНЬ
2025

В номере:

Особенности моделирования процесса падения капель при внесении рабочих растворов пестицидов полевыми штанговыми опрыскивателями

Энергоемкость процесса резания грубых стебельных культур

Современный электропривод погружных водоснабжающих насосных установок

Современные тренды инновационного развития аграрного бизнеса Республики Беларусь



XXXV МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «БЕЛАГРО – 2025»

С 3 по 7 июня в Минском международном выставочном центре проходила 35-я международная специализированная выставка «БЕЛАГРО». Этот аграрный форум ежегодно собирает вместе не только белорусских аграриев, ученых, представителей сельскохозяйственного машиностроения, пищевой и перерабатывающей промышленности, но и их зарубежных коллег и партнеров. В 2025 году в работе выставки приняли участие 545 организаций, фирм и компаний из 14 стран.

Белорусский государственный аграрный технический университет постоянный участник выставки. В этом году на стенде были представлены научные разработки ученых университета: оборудование для диагностики технического состояния узлов и деталей дизельных двигателей, экспресс-тесты для контроля определения свойств работающего моторного масла, трехкомпонентная смесь, снижающая сопротивление заземляющих устройств и влияние сезонности на их работу, а также монографии и научно-практические рекомендации, авторами которых являются работники университета.

На выставочных площадках РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства» и ОАО «Минский завод шестерен» демонстрировались опытные образцы сельскохозяйственной техники, в разработках которых принимали участие ученые БГАТУ.

В рамках «БЕЛАГРО – 2025» проведена международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения, оснащения и технического сервиса в АПК». В конференции приняли участие работники университета, руководители и специалисты предприятий, а также научные работники и преподаватели образовательных и научных организаций Республики Беларусь, Российской Федерации, Республики Казахстан, Республики Узбекистан, Нигерии и Монголии.

Институт повышения квалификации и переподготовки кадров АПК БГАТУ провел международную научно-практическую конференцию «Агропромышленный комплекс в условиях инновационного развития: наука, технологии, кадровое обеспечение», в работе которой приняли участие представители из 23-х регионов Российской Федерации, Казахстана, Азербайджана, Узбекистана, Монголии, Китайской Народной Республики. Научное сообщество Республики Беларусь на конференции представили ученые научных и образовательных учреждений, руководители и специалисты сферы АПК, предприятий по производству и переработке сельскохозяйственной продукции.

Традиционно, с целью совершенствования профессионального мастерства и практических навыков мастеров производственного обучения, студентов и учащихся учреждений образования аграрного профиля, повышения их знаний в вопросах использования современной техники на базе БГАТУ прошел республиканский смотр-конкурс «Лучший пахарь».

За особый вклад в развитие агропромышленного комплекса и презентацию своих достижений Белорусский государственный аграрный технический университет был отмечен высшей наградой – золотой медалью и дипломом.



АГРОПАНОРАМА 3 (169) июнь 2025

Издается с апреля 1997 г.

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

Учредитель

Белорусский государственный
аграрный технический университет

Главный редактор

Николай Николаевич Романюк

Заместитель главного редактора
Михаил Александрович Прищепов

Редакционная коллегия:

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

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

Компьютерная верстка
В.Г. Леван

Адрес редакции:

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

Прием статей и работа с авторами:

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

БГАТУ, 2025.

Формат издания 60 x 84 1/8.

Подписано в печать с готового оригинала-

макета 23.06.2025 г. Зак. № 365 от 20.06.2025 г.

Дата выхода в свет 30.06.2025 г.

Печать офсетная. Тираж 60 экз.

Статьи рецензируются.

Отпечатано в ИПЦ БГАТУ по адресу: г. Минск,

пр-т Независимости, 99/2

ЛП № 023330/316 от 30.10.2020 г.

Выходит один раз в два месяца.

Подписной индекс в каталоге «Белпочта» - 74884.

Стоимость подписки на журнал на 2-е п/г 2025 г.:

для индивидуальных подписчиков - 49,62 руб.;

ведомственная - 52,71 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

И.С. Крук

Особенности моделирования процесса падения капель при
внесении рабочих растворов пестицидов полевыми штанговыми
опрыскивателями.....2

К.Л. Сергеев, М.М. Дечко

Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки
путем рационального сочетания размера масляных капель и
объемной концентрации дисперсной фазы
смазочно-охлаждающей жидкости.....11

**В.П. Чеботарев, Г.А. Радишевский, Н.П. Гурнович,
Д.А. Яновский, А.А. Зенов, Д.Н. Бондаренко, А.А. Лаппо**
Энергоемкость процесса резания грубых стебельных культур.....21

Энергетика. Транспорт

**М.А. Прищепов, А.С. Козорез, Е.М. Прищепова,
С.А. Лихтар**
Современный электропривод погружных водоснабжающих
насосных установок.....26

М.В. Янко

Аэроионная активация продуктивности хлебопекарных
дрожжей.....34

Технический сервис в АПК. Экономика

Н.В. Киреенко

Современные тренды инновационного развития аграрного
бизнеса Республики Беларусь.....40

С.И. Горанец

Развитие АПК Гродненской области в контексте реализации
государственной программы «Аграрный бизнес»
на 2021-2025 годы.....45

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПАДЕНИЯ КАПЕЛЬ ПРИ ВНЕСЕНИИ РАБОЧИХ РАСТВОРОВ ПЕСТИЦИДОВ ПОЛЕВЫМИ ШТАНГОВЫМИ ОПРЫСКИВАТЕЛЯМИ

И.С. Крук,

проректор по научной работе БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье обоснованы факторы, которые необходимо учитывать при моделировании процесса падения капель пестицидов. Отмечено, что при моделировании падения капель рабочих растворов пестицидов важными параметрами являются их скорость витания (скорость равномерного движения) и продолжительность (расстояние и время) фазы неустойчивого движения. Предложены уточненные зависимости для определения скорости витания капли пестицида, учитывающие траектории их движения.

Ключевые слова: опрыскиватель, распылитель, факел распыла, капля пестицида, диаметр, скорость витания, коэффициент сопротивления среды.

The factors to be taken into account when modeling the process of pesticide droplets falling process are substantiated in the article. It is noted that in modeling pesticide working solutions droplets falling important parameters are their hovering velocity (velocity of uniform motion) and duration (distance and time) of the unsteady motion phase. Refined dependences for determining the velocity of pesticide droplet hovering, taking into account their trajectories, are proposed.

Key words: sprayer, atomizer, spray torch, pesticide droplet, diameter, vortex velocity, medium resistance coefficient.

Введение

В современном мире производится большое количество средств защиты растений с различным содержанием действующих веществ и степенью воздействия, как на объект обработки, так и на окружающую среду. Эффективность использования рабочих растворов пестицидов в растениеводстве определяется качественным их внесением в наиболее чувствительный период развития вредоносных объектов с наименьшими потерями препаратов. Технологически необоснованное и необдуманное, а также нерациональное с точки зрения снижения качества, увеличения объемов и потерь, вызванных воздействием метеорологических условий, их внесение может привести к серьезным последствиям, которые скажутся на качестве и объемах урожая не только возделываемой культуры, но и на культурах соседних полей и последующих севооборотов.

Качество опрыскивания во многом определяется согласованной и оптимальной работой систем опрыскивателя, а также соблюдением требуемых эксплуатационных и технологических режимов его работы. Одним из основных показателей качества и биологической эффективности пестицидов при опрыскивании является дисперсность распыла, которая существенным образом влияет на норму внесения рабочего раствора, степень покрытия обрабатываемой поверхно-

сти и величину потерь, связанных со сносом, испарением и скатыванием капель с обрабатываемых поверхностей растений. Следует отметить, что на каждый процент неравномерности распределения рабочего раствора приходится 0,4 % по объему его неэффективного применения, то есть 8 % рабочей жидкости теряется при ее распределении по ширине захвата опрыскивателя с неравномерностью 20 % [1]. Диаметр и скорость падения капель, степень монодисперсности факелов распыла, метеорологические условия и свойства окружающей среды являются основными показателями процесса распыления, влияющими на равномерность распределения препаратов по ширине захвата опрыскивателя и по поверхностям объектов обработки. В результате различных исследований установлены поражения сельскохозяйственных культур гербицидами на больших расстояниях от обрабатываемых полей вследствие сноса капель рабочих растворов ветром, восходящими воздушными потоками, а также воздействия температурной и воздушной инверсий [2-6]. Опрыскивание культур с оптимальной дисперсностью факела распыла позволяет снизить норму внесения рабочего раствора на 10 %, а в некоторых случаях – на 25 %. Повышение качества опрыскивания обеспечивает также снижение расхода воды на 25...50 % [7]. Поэтому исследованиям дисперсности факела распыла, закономерностям осадения капель рабочих растворов пестицидов с учетом

состояния окружающей среды в настоящее время уделяется большое внимание.

Теоретические и экспериментальные исследования падения и осаждения капель на обрабатываемые поверхности, а также некоторые аспекты процесса их выноса за пределы обрабатываемых участков приведены в работах Броунштейна Б.И., Ванга Ш., Вульфа Т., Гордеенко О.В., Дмитрачкова В.П., Келбалиева Г.И., Клочкова А.В., Кот Т.П., Маркевича А.Е., Нагорского И.С., Никитина Н.В., Ньютенса Д., Ольшевского В.П., Рогова В.П., Ронкина В.С., Спиридонова Ю.Я., Степука Л.Я., Тостенсона А., Фишбеина Г.А., Четхана С., Шестакова В.Г. и других ученых и практиков. Однако единого подхода к моделированию процесса падения капель без существенных допущений, упрощений и ограничений в настоящее время не получено. Это отражается на величине погрешностей между теоретическими и экспериментальными исследованиями [8].

Целью данной работы является исследование процесса осаждения капель рабочих растворов пестицидов в факелах распыла полевого штангового опрыскивателя и обоснование факторов, которые необходимо учитывать при моделировании их движения.

Основная часть

Моделирование процесса падения капель рабочих растворов пестицидов заключается в составлении алгоритма, позволяющего определить параметры воздушно-капельных потоков, удовлетворяющих заданным агротехническим и экологическим требованиям с учетом состояния окружающей среды, а также проанализировать работу систем опрыскивателя. Его задачи направлены на определение кинематических параметров движения капель в факелах распыла, необходимых для описания процессов их осаждения и взаимодействия с обрабатываемыми поверхностями, проникновения вглубь растительных слоев, объемной обработки культур с высокой степенью облиственности. Получаемые при этом результаты являются основой для обоснования конструктивных и технологических характеристик распылителей, параметров их установки, а также устройств, обеспечивающих равномерное распределение препаратов по обрабатываемому объекту и снижающих их потери при обработках в ветреную погоду.

В большинстве случаев моделирование процесса падения капель сводится к применению законов механики к исследованиям характера движения единичной капли, принимаемой за твердую сферическую частицу [5; 9,10] при неизменных параметрах состояния окружающей среды, эксплуатационных режимах опрыскивателей и метеорологических условиях. Процесс опрыскивания растений пестицидами является нестационарным, так как осуществляется в постоянно меняющихся условиях, учесть которые при проведении теоретических и лабораторных исследований зачастую не представляется возможным. Метеорологические условия и состояние окружающей среды могут существенно изменяться при работе опрыскивателей даже в пределах одного обрабатываемого

поля [4, 5]. Кроме того, при дроблении жидкости распылителями образуется большое количество капель различного дисперсного состава, которые, двигаясь по своим траекториям с разными начальными скоростями, образуют воздушно-капельный факел распыла. Полет отдельной капли не отражает реальную динамику процесса, так как движение в факеле распыла представляет собой более сложное взаимодействие большого числа капель. Созданное групповое движение капель увлекает за собой окружающий воздушный поток, скорость которого становится постоянной на некотором расстоянии от распылителя. Поэтому моделирование движения капель распыленной жидкости в факеле распыла является сложной задачей, решение которой требует комплексного подхода. Он основан на применении моделей, представляющих собой совокупность уравнений, описывающих зависимость между главными параметрами факелов распыла и состоянием окружающей среды. При этом должны учитываться закономерности формирования и гидродинамическая структура воздушно-капельного потока, воздействие различных сил, взаимодействие капель между собой и окружающей средой, физико-химические свойства рабочего раствора и окружающей среды, движение восходящих потоков, возникающие инверсии и другие факторы [11, 12].

Основными технологическими параметрами при эксплуатации полевых штанговых опрыскивателей являются: рабочая скорость агрегата $v_{\text{агр}}$, давление в напорной гидравлической магистрали $p_{\text{ж}}$, высота установки штанги (распылителя) H_p над обрабатываемой поверхностью (рис. 1), которая определяется типом и характеристиками распылителей (форма и размер выходного сопла, угол при вершине факела распыла γ_p). Согласно проведенным исследованиям, установлено, что при изменении высоты установки штанги всего на 10 см (колесо опрыскивателя скопировало неровность поверхности поля) расход жидкости в зоне перекрытия увеличивается на 40 %, а в остальной – снижается на 30 % [13, 14]. В условиях хорошо выровненной поверхности поля, при скорости движения трактора 8 км/ч амплитуда колебаний крайних точек штанги длиной 12 м может достигать ± 20 см [13, 14]. При увеличении высоты установки штанги на 10 см потери препарата из-за сноса капель возрастают в два раза, которые дополнительно увеличиваются при сильном ветре [13, 14]. Замена распылителей с углом при вершине факела распыла 80–90° на распылители с углом 110–120° позволяет уменьшить высоту установки штанги на 0,25 м [13, 14].

Оптимальная высота установки штанги выбирается из условия, при котором пересечение факелов распыла соседних распылителей происходит на середине расстояния между штангой и обрабатываемой поверхностью [13]. При этом формируются следующие области движения (рис. 1): осаждение капель в одиночном факеле распыла 2, снос мелких капель в межфакельное 3 и боковое 4 пространства, факел сносимых ветром крупных капель 5, движение капель в зоне пересечения соседних факелов распыла 6 (рис. 1).

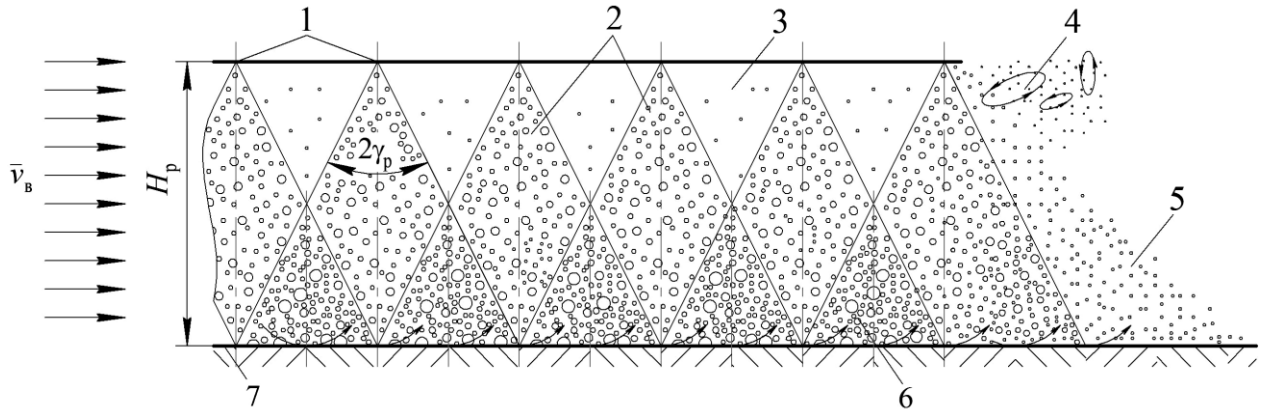


Рисунок 1. Схема к обоснованию закономерностей движения капель в факелах распыла гидравлических распылителей полевого штангового опрыскивателя: 1 – распылитель; 2 – факел распыла; 3 – межфакельное пространство; 4 – зона воздушного выноса капель; 5 – зона сноса капель ветром; 6 – зона перекрытия соседних факелов; 7 – обрабатываемый объект

Наибольший интерес с точки зрения моделирования процесса падения капель и определения количественных и качественных показателей выполнения технологической операции представляют зоны 2 и 6, а с точки зрения экологии и потерь – 4 и 5 (рис. 1). При моделировании можно рассматривать следующие варианты падения капель:

- движение капель по определенным не пересекающимся траекториям в факеле распыла под воздействием внешних факторов до полного осаждения на обрабатываемую поверхность;
- движение капель в факеле распыла до линии пересечения двух соседних факелов распыла;
- движение и взаимодействие капель в зоне перекрытия двух соседних факелов распыла.

На закономерности падения капель в пересекающихся факелах распыла существенное влияние оказывают их начальные условия на границах областей. Следует отметить, что в зоне 6 возможны пересечения траекторий

движения капель соседних факелов распыла, в результате чего возможны как их слияние, так и деление.

Рассмотрим стадии движения капель в факелах распыла, начиная с момента вылета из выходного сопла, до момента оседания на поверхности обрабатываемого объекта. Из сопел гидравлических распылителей вылетают струи жидкости, сформированные в виде пленок (рис. 2а), геометрические размеры которых определяются конструктивными параметрами распылителей и рабочим давлением в напорной жидкостной магистрали. На небольшом расстоянии от распылителя h_Π (фаза распада) пленки распадаются, и образуется воздушно-капельный поток с каплями различных диаметров. Капли, имея запас энергии, определяемый их начальными диаметрами $d_{к0i}$ и скоростями вылета из области распада струи $v_{к0i}$, движутся по своим траекториям с различными скоростями в направлении обрабатываемого объекта, находящегося на расстоянии h_k под действием силы тяжести

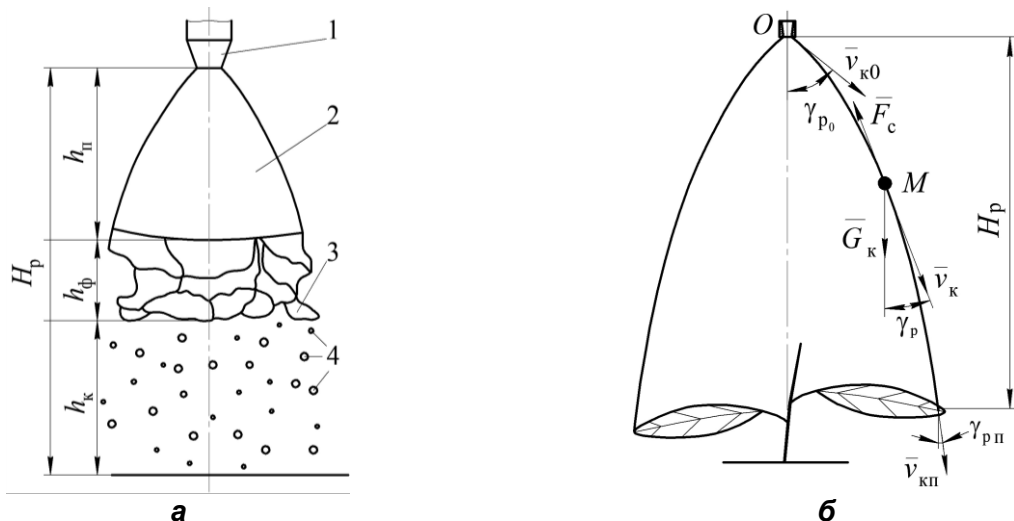


Рисунок 2. Процесс образования и падение капель [3, монография]: 1 – распылитель; 2 – пленка жидкости; 3 – распадающаяся пленка; 4 – капли факела распыла; H_p – высота установки распылителя над обрабатываемой поверхностью; h_Π – высота пленки струи жидкости; h_Φ – высота фазы распада пленки; h_k – высота падения капель

G_k и сил сопротивления воздушной среды F_c (рис. 2б). Через некоторый период времени данные силы взаимно уравновешиваются и капли продолжают падение с постоянной скоростью (скорость витания) [15, 16].

На начальном этапе моделирования важными условиями являются: правильное определение состояния, на котором происходит распад струи, размеров образующихся капель и величин их начальных скоростей [17, 18], а также степени влияния на закономерности их движения, состояния и параметров окружающей среды. Скорости вылета капель из области распада струи имеют различные величины и находятся в пределах 10...25 м/с [17]. При этом капли более 70 мкм на расстоянии 0,04 м от сопла (область распада струи) имеют скорость 16...18 м/с, а капли менее 70 мкм – 10...12 м/с [17, 19]. Увеличение давления в нагнетательной жидкостной магистрали опрыскивателя для большинства конструкций гидравлических распылителей приводит к более мелкому распылу и увеличению начальных скоростей мелких капель, покидающих зону распада пленки [20, 21]. Однако в сравнении с большими, капли меньшего диаметра замедляются быстрее вследствие воздействия сопротивления воздуха. Так, капля диаметром 100 мкм при начальной скорости 20 м/с, пролетая за 0,1 с 0,2 м, переходит во взвешенное состояние и подвергается воздействию внешних климатических условий. Капля диаметром 200 мкм достигает своей конечной скорости падения через 0,2 с, за которое пролетает 0,625 м [21]. Следует отметить, что при моделировании необходимо учитывать различные значения скорости воздуха в факеле распыла под распылителем, которые для щелевых распылителей находятся в пределах 1,75–10 м/с [18], 0,7–1,2 м/с – для инжекторных распылителей. Скорость воздушного потока, увлекаемого водяными каплями диаметром 1 мм, становится постоянной на расстоянии 1,8 м от распылителя. При работе на повышенных скоростях капли рабочего раствора пестицида подвергаются дополнительному воздействию набегающего потока воздуха, создаваемого движущимся агрегатом. Так, при рабочей скорости опрыскивателя 8 км/ч на капли дополнительно действует воздушный поток со скоростью 2 м/с, а при вероятной скорости 30 км/ч – уже 8 м/с [1; 5; 14]. При проведении опрыскивания в ветреную погоду (агротехника возделывания допускает скорость ветра до 4 м/с) капли дополнительно воспринимают воздействие создаваемого им воздушного потока F_b .

Анализ результатов исследований движения капель в различных средах показывает, что полученные зависимости для определения кинематических параметров имеют различную степень точности и согласованности с результатами экспериментов, проведенных в лабораторных и полевых условиях. Это характеризуется использованием различных допущений и ограничений, связанных с определением значений начальных скоростей падения капель, пренебрежением или исключением из расчетов различных факторов состояния окружающей среды, а также применением

разных подходов к учету сил сопротивления и определения величины коэффициента сопротивления окружающей воздушной среды. Так, применение допущения о сферической форме капель и постоянстве коэффициента аэродинамического сопротивления среды при расчете скорости свободного падения капель диаметром более 2 мм завышение теоретических результатов над экспериментальными составляет 30 % [16].

Определяющим теоретическим параметром при опрыскивании принимается скорость витания капли в неподвижной среде $v_{кв}$, а не ее конечная скорость падения (осаждения) $v_{кп}$ на обрабатываемую поверхность. При этом многими исследователями не делаются различия между значениями этих скоростей, то есть принимается равенство: $v_{кп} = v_{кв}$ [22]. Определению величин скоростей витания и осаждения капель на обрабатываемые поверхности посвящено большое количество работ. Однако в их результатах наблюдаются существенные различия. При этом многие из них применимы для описания процесса падения капель, диаметр которых более 1 мм, что не может использоваться при моделировании процесса опрыскивания рабочими растворами пестицидов. При свободном падении капель больших размеров их формы деформируются в лобовой части, что приводит к образованию вогнутости [15], из-за чего в дальнейшем происходит их деление на более мелкие. Данное явление следует учитывать при моделировании движения капель диаметром более 2,4 мм, которыми опрыскивание пестицидами производится не должно. Падение капель диаметром менее 1 мм можно рассматривать как падение твердых сфер, пренебрегая их деформацией и применяя законы Н.Е. Жуковского и Стокса к движению недеформированных тел. Однако условия их обтекания воздушной средой отличны вследствие наличия внутреннего вихря Хилла [16], что влияет на величину коэффициента сопротивления, который при некоторых условиях достигает минимума, а затем увеличивается до величины постоянного максимума при равновесной форме движения и постоянной скорости витания.

Скорость витания капли может быть определена двумя методами: экспериментальным или теоретическим из условия равновесия силы тяжести и аэродинамического сопротивления $G_k = F_c$ (рис. 2б). Сила тяжести капли определяется по формуле

$$G_k = m_k g,$$

где m_k – масса капли, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила аэродинамического сопротивления воздуха состоит из двух составляющих [23]: силы лобового сопротивления F_{c1} и силы вязкого трения F_{c2} , то есть

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}.$$

Сила лобового сопротивления капли определяется по формуле

$$F_{c1} = \frac{\xi \cdot S_k \cdot \rho_b}{2} \cdot v_k^2, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления движению капли в окружающей среде. Он зависит от ее геометрии и скорости падения, а также параметров окружающей среды. Для капель сферической формы, движущихся в диапазоне малых скоростей, он принимается равным 0,43...0,5 [5; 9; 16; 22; 25];

S_k – площадь миделева сечения капли, м²;

ρ_B – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³; $\rho_B = 1,29$ кг/м³.

v_k – скорость движения капли, м/с.

Силы вязкого трения оказывают влияние на движение капель, диаметр которых не превышает 500 мкм [23], и определяются по формуле

$$F_{C2} = 3 \cdot \pi \cdot \eta_B \cdot d_k \cdot v_k, \quad (2)$$

где η_B – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м²; $\eta_B = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м²;

d_k – диаметр капли, м.

Учитывая, что каждая капля движется по своей траектории, и обозначив через γ_p угол наклона к вертикали касательной, проведенной к ней в определенной точке, общее уравнение равновесия капли примет следующий вид:

$$m_k g \cos \gamma_p = \frac{\xi \cdot S_k \cdot \rho_B \cdot v_k^2}{2} + 3 \cdot \pi \cdot \eta_B \cdot d_k \cdot v_k. \quad (3)$$

В большинстве исследований рассматривается частный случай движения капель – вертикальное падение ($\gamma_p = 0$) без учета воздействия силы вязкого трения F_{C2} . То есть уравнение равновесия принимает вид: $\bar{G}_k = \bar{F}_{C1}$, для которого получены различные формулы для определения скорости витания капель [7; 19; 22; 24, 25]

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{4d_k g \rho_{ж}}{3\xi \rho_B}}. \quad [7; 24, 25]. \quad (4)$$

Данная формула во многих работах имеет разный вид вследствие использования различных значений коэффициента сопротивления $\xi = 0,43...0,5$.

Для отдельной изолированной круглой капли диаметром менее 50 мкм, движущейся в неограниченной воздушной среде, скорость ее витания может быть определена по формуле Стокса для ламинарного режима движения [19; 24]:

$$v_{KB} = \frac{gd_k^2(\rho_{ж} - \rho_B)}{18\nu_B \rho_B}, \quad (5)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность капли, кг/м³; $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³;
 ν_B – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;
 $\nu_B = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Для капель диаметром менее 100 мкм приближенно скорость падения может быть определена по формуле [19]

$$v_{KB} = kd_k^2, \quad (6)$$

где k – корректирующий коэффициент, (м·с)⁻¹;
 $k = 3 \cdot 10^7$.

С учетом плотности окружающей среды формула (4) принимает следующий вид [22; 24]:

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{4gd_k(\rho_{ж} - \rho_B)}{3\xi \rho_B}}. \quad (7)$$

С учетом равенства (3) зависимость для определения скорости витания вертикально падающей капли имеет вид:

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{144\eta_B^2}{\xi^2 \rho_B^2 d_k^2} + \frac{4g\rho_{ж}d_k}{3\xi \rho_B} - \frac{12\eta_B}{\xi d_k \rho_B}}, \quad (8)$$

С учетом различных траекторий движения капля зависимости (4) и (8) примут следующие виды:

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{4d_k g \rho_{ж} \cos \gamma_p}{3\xi \rho_B}}. \quad (9)$$

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{144\eta_B^2}{\xi^2 \rho_B^2 d_k^2} + \frac{4g\rho_{ж}d_k \cos \gamma_p}{3\xi \rho_B} - \frac{12\eta_B}{\xi d_k \rho_B}}. \quad (10)$$

Как видно из представленных зависимостей, для определения величины скоростей падения капель необходимо знать показатели внешней среды: плотность, кинематическую и динамическую вязкость окружающего воздуха, коэффициент сопротивления среды, зависящие от температуры. Кроме того, температура окружающего воздуха определяет интенсивность изменения массы и размеров капель [18; 26]. Коэффициент сопротивления является важной характеристикой и определяет суммарное воздействие сил трения и динамического давления и зависит от размеров и формы капель, состояния среды и условий их обтекания. Правильное определение его величины является важным условием моделирования (рис. 3). На нестационарном участке траектории движения капель коэффициент сопротивления является переменной величиной, изменяющейся по сложному закону [16]. При наличии подвижной воздушной среды возникает турбулентность, поэтому коэффициент сопротивления на протяжении всей траектории падения капли может иметь различные значения.

Величина коэффициента сопротивления характеризуется значением числа Рейнольдса (Re), определяемого по формуле [16; 22; 27]

$$Re = \frac{v_k d_k}{\nu_B}. \quad (11)$$

Капли жидкости принимаются за твердые сферы при выполнении условия [16]:

$$Re \leq 4,55 \left(\frac{\sigma_{ж}^3}{g(\rho_{ж} - \rho_B) \nu_B^2 \rho_B^2} \right)^{0,21},$$

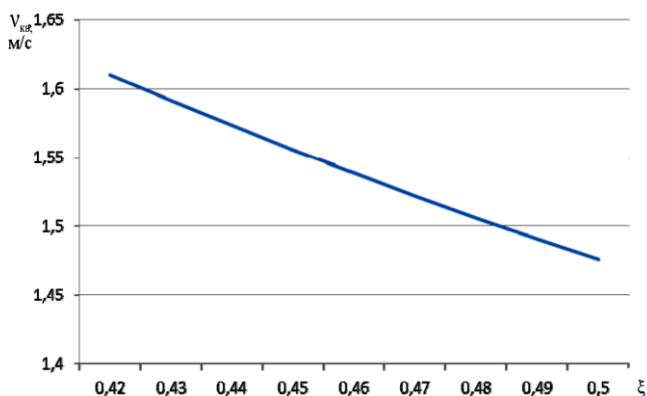


Рисунок 3. График зависимости скорости витания от величины коэффициента сопротивления среды ξ

где $\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения капли, Н/м.

Подставив в данное неравенство числовые значения величин, получим, что при температуре рабочей жидкости и воздуха, равной 20 °С, капли можно считать сферическими при соблюдении условия: $Re \leq 502$. Данное условие соблюдается для всего спектра дисперсности капель, допустимых агротехникой при опрыскивании рабочими растворами пестицидов. Графическая зависимость ξ от Re для шарообразной частицы, осаждаемой в неподвижной среде, на основе опытных данных построена Рэлеем [22]. Исходя из нее, имеются разные подходы и зависимости для расчета коэффициента сопротивления в пределах определенных значений чисел Рейнольдса, отличающиеся различной точностью. Наиболее используемыми являются следующие формулы для определения коэффициента потерь:

$$\xi = \frac{24}{Re}, [16; 22] \text{ при } Re \leq 2; \text{ (ламинарный режим)}$$

$$\text{жим движения)} v_{кв} = \frac{d_k^2 (\rho_{ж} - \rho_{в}) g}{18 \nu_{в} \rho_{в}};$$

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}, [16; 22] \text{ при } 2 < Re \leq 500; \text{ (переходной режим)}$$

$$v_{кв} = \frac{0,78 d_k^{1,14} (\rho_{ж} - \rho_{в})^{0,715}}{\nu_{в}^{0,43} \rho_{в}^{0,715}}.$$

$\xi = 0,43 \dots 0,5$, [16; 22] при $500 < Re \leq 200000$ (турбулентный режим). При $\xi = 0,44$ формула для определения скорости витания принимает следующий вид:

$$v_{кв} = 5,46 \sqrt{\frac{d_k (\rho_{ж} - \rho_{в})}{\rho_{в}}}.$$

Анализ формул показывает, что при первом условии сила сопротивления воздушной среды пропорциональна скорости падения капли в первой степени ($F_c \sim v_k$), при втором – $F_c \sim v_k^{1,4}$, при третьем – $F_c \sim v_k^2$.

Применение данных зависимостей требует знания режима движения капель. Для его определения используется метод Лященко, основанный на определении критерия Архимеда (Ar) по формуле [22; 27]:

$$Ar = \frac{d_k^3 g (\rho_{ж} - \rho_{в})}{\nu_{в}^2 \rho_{в}}. \quad (12)$$

Режим движения капель определяется по следующим условиям: $Ar \leq 36$ (ламинарный); $36 < Ar \leq 83000$ (переходной); $Ar > 83000$ (турбулентный).

Графические зависимости изменения скоростей витания от параметров капель и факторов состояния окружающей среды, рассчитанные по различным формулам, представлены на рисунке 4. Графические

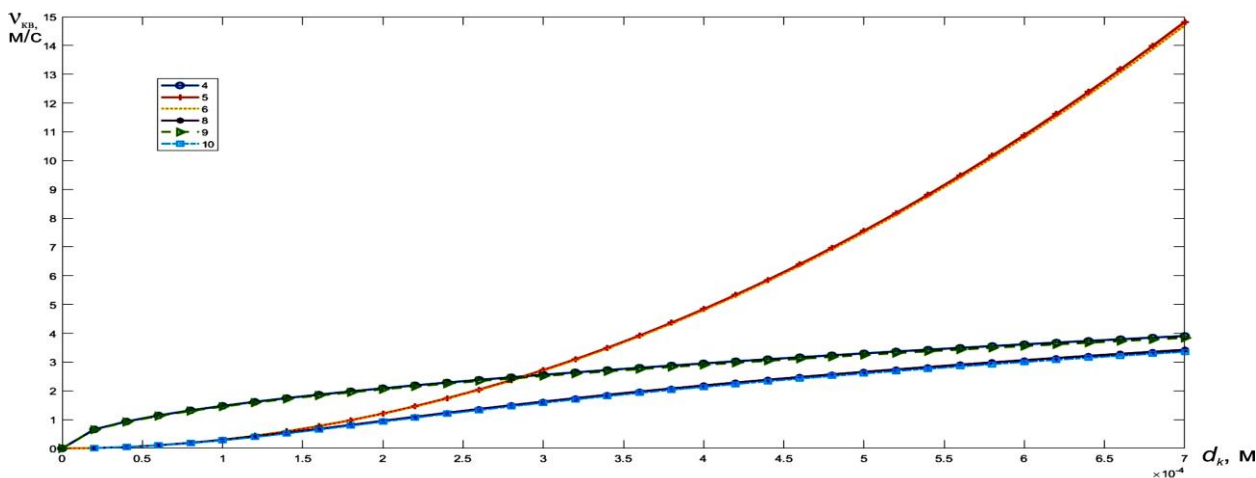


Рисунок 4. Графические зависимости скоростей витания капель от диаметра, построенные по зависимостям (4) – (10)

зависимости экспериментальных исследований скорости движения капель на расстоянии 0,5 м от распылителя (высота установки штанги) представлены на рисунках 5, 6 [19].

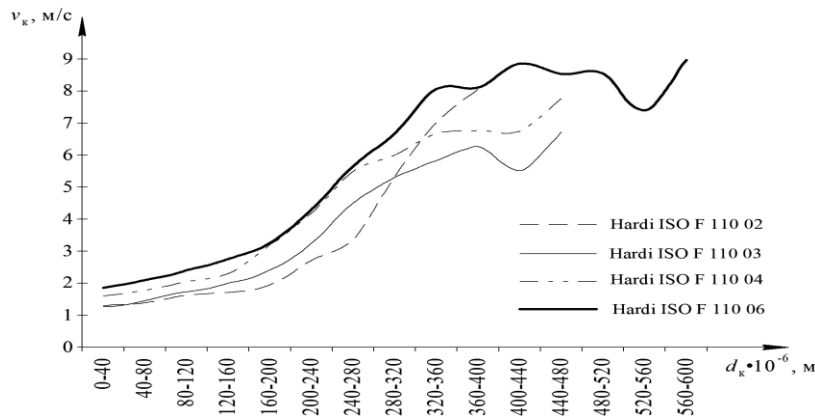


Рисунок 5. Графики зависимости средней скорости капель в зависимости от типа распылителей и диаметра капель на расстоянии 0,5 м от выходного сопла при давлении 0,3 МПа в жидкостной магистрали [17, 19]

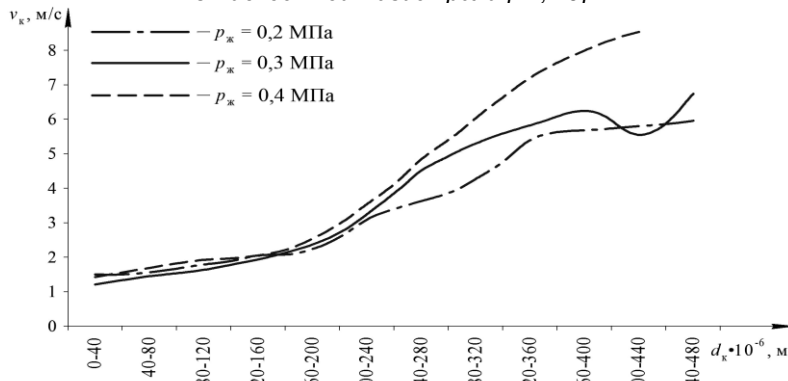


Рисунок 6. Графики зависимости средней скорости движения капель от давления в гидравлической магистрали на расстоянии 0,5 м от выходного сопла распылителя Hardi ISO F 110 03 [17]

капли превышает время ее движения между распылителем и обрабатываемой поверхностью. Важно, чтобы до истечения данного времени капля осела на поверхности целевого объекта. То есть теоретическое

расстояние, которое пролетит капля до наступления момента витания, должно быть большим, чем высота установки распылителя над обрабатываемой поверхностью. При этом на величину расстояния, которое капля должна пролететь до обрабатываемой поверхности, существенное влияние оказывают такие факторы, как скорость и направление ветра. При прямом воздействии ветра на факел распыла мелкие капли будут выноситься в межфакельное пространство, а затем и в сторону из зоны обработки [5]. Там их концентрация будет определяться скоростью ветра, размерами капель и скоростями их осаждения. Расстояние $L_{уд}$, которое пролетит капля в неподвижном воздухе при равнозамедленном движении до наступления стадии равномерного падения, можно определить по следующей формуле [19]:

$$L_{уд} = \frac{v_{к0} d_{к0}^2 \rho_{ж}}{18 \cdot \nu \rho_{в}} \quad (13)$$

Построенная по данной формуле графическая зависимость (рис. 7) показывает, что капли диаметром менее 100 мкм в пределах начальных скоростей вылета из сопла распылителя достигают скорости витания до момента осаждения на обрабатываемую поверхность, в то время как большие достигнут ее значения на расстоянии, превышающем высоту установки распылителей (рис. 5). Поэтому важными параметрами, учитываемыми при

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований (рис. 4-6) можно сделать следующие предположения:

- 1) не все факторы, воздействующие на каплю в процессе ее полета от сопла до обрабатываемой поверхности, учтены при определении скорости витания;
- 2) капли диаметром более 100 мкм (при наименьшей скорости вылета из сопла – 16 м/с) при осаждении на обрабатываемую поверхность не достигли величин скоростей витания, имеющих меньшие значения, чем скорость осаждения.

Очевидно, что наилучшим является условие, при котором время начала равномерного движения

превышающем высоту установки распылителей (рис. 5). Поэтому важными параметрами, учитываемыми при

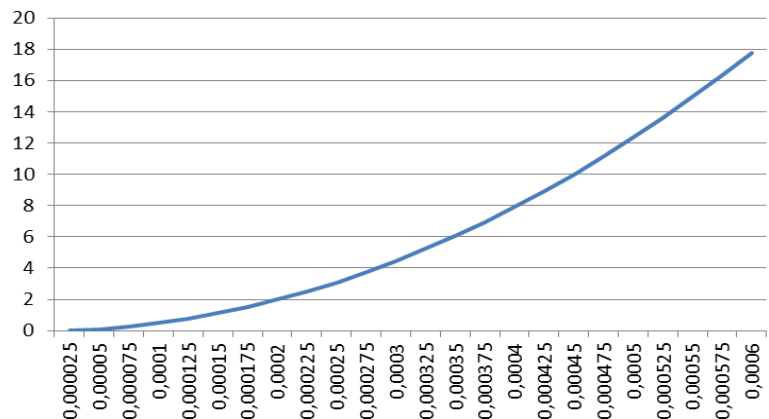


Рисунок 7. График зависимости расстояния, пролетаемого каплей до наступления стадии витания, от ее диаметра при наименьших скоростях вылета из сопла распылителя

моделировании падения капель рабочих растворов пестицидов, являются: расстояние, на котором капля достигнет скорости витания, и время, за которое она его преодолет.

Величина скорости осаждения определяет характер взаимодействия капель с обрабатываемой поверхностью [5], при котором возможны следующие варианты: прилипание капель к обрабатываемой поверхности, скатывание и отскакивание от нее. При этом наиболее рациональным является первый вариант. Скорость капель существенным образом определяет величину потерь вследствие сноса (чем больше скорость капель при осаждении, тем меньше расстояние, на которое они сносятся).

Из изложенного выше следует, что при моделировании процесса падения капель рабочих растворов пестицидов необходимо учитывать следующие значимые факторы:

- начальные условия вылета капель из сопла распылителя (форма, размеры, начальные скорости падения образующихся капель, расстояние, на котором происходит распад жидкостной пленки, их изменение при колебаниях штанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях);
- свойства и параметры состояния окружающей среды, а также метеорологические условия;
- величину скорости витания капель и расстояние перехода капель в равномерное движение;
- взаимодействие капель в зонах пересечения соседних факелов распыла;
- параметры осаждения капель (скорость осаждения, угол падения) и их взаимодействие с поверхностями обрабатываемого объекта.

Заключение

Приведен анализ закономерностей движения капель в факелах распыла при внесении рабочих растворов пестицидов штанговыми опрыскивателями. Обоснованы факторы, влияющие на закономерности движения капель рабочих растворов пестицидов от распылителя до обрабатываемой поверхности. Отмечено, что при моделировании процесса опрыскивания рабочими растворами пестицидов в растениеводстве можно применять законы динамики, описывающие движение капель, как твердые тела шарообразной формы.

Выполнен анализ формул для определения скоростей витания, на основе которого получены уточненные зависимости для их определения.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что капли диаметром более 100 мкм при высоте установки штанги над обрабатываемой поверхностью при осаждении не достигают величины скорости витания.

Сделан вывод, что при моделировании падения капель рабочих растворов пестицидов, кроме определения скорости осаждения, важными параметрами являются расстояние и время перехода стадии неустановившегося движения капель в установившееся (равномерное).

Обоснованы факторы, которые необходимо учитывать при моделировании процесса падения капель пестицидов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта T24MH-005.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башкирев, А.П. Анализ работы полевых опрыскивателей / А.П. Башкирев, А.А. Шварц, А.Ю. Шкабенко // Наука в Центральной России. – 2019. – № 6 (42). – С. 51-58.
2. The Misplay of our Generation / Tom Wolf // Sprayers 101. – URL: <https://sprayers101-com.translate.goog/misplay>. – 2017 (date of access: 16.08.2024).
3. Fundamentals of Spray Drift / Tom Wolf // Sprayers 101. – URL: <https://sprayers101-com.translate.goog/fundamentals-of-spray-drift>. – 2021 (date of access: 16.08.2024).
4. Защита растений в устойчивых системах земледелия: в 4 кн. / Под общей ред. Д. Шпаара. – Торжок: ООО «Вариант», 2004. – Кн. 4. – 345 с.
5. Крук, И.С. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей: монография / И.С. Крук, Т.П. Кот, О.В. Гордеенко. – Минск: БГАТУ, 2015. – 284 с.
6. Schönenberger, Urs T. Are spray drift losses to agricultural roads more important for surface water contamination than direct drift to surface waters? / Urs T. Schönenberger, Janine Simon, Christian Stamm // Science of the Total Environment. – 2022. – № 809. – P. 1-12.
7. Ключков, А.В. Механизация химической защиты растений: монография / А.В. Ключков, А.Е. Маркевич. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2008. – 228 с.
8. Comparison of the mechanistic AGDISP ground boom spray model with experimental data / R.J. Connell, W.C. Schou, D. Nuyttens, T.M. Wolf, J-P.Praat // New Zealand Plant Protection. – 2012. – № 65. – P. 93-99.
9. Гордеенко, О.В. Повышение эффективности ухода за посевами овощных культур на гребнях совершенствованием оборудования для ленточного внесения гербицидов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Гордеенко Олег Васильевич; Белорус. гос. с.-х. академия. – Горки, 2004. – 169 с.
10. Ольшевский, В.П. К моделированию падения испаряющейся капли диспергированного огнетушащего вещества / В.П. Ольшевский, С.В. Ольшевский // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15. – № 1. – С. 41-45.
11. Келбалиев, Г.И. Основы теории осаждения и всплывания твердых частиц, капель и пузырей в изотропном турбулентном потоке / Г.И. Келбалиев // Азербайджанский химический журнал. – 2015. – № 2. – С. 6-27.

12. Келбалиев, Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы / Г.И. Келбалиев // Основы теории химической технологии. – 2011. – № 3. – С. 248-266.
13. Роттенберг, Ю.Ю. Высота штанги полевого опрыскивателя / Ю.Ю. Роттенберг, И.А. Редкозубов // Защита и карантин растений. – 2011. – № 5. – С. 42-43.
14. Теория и практика опрыскивания / И.А. Редкозубов [и др.]. – DuPont; Lechler, 2010. – 19 с.
15. Рогов, В.П. К расчету скорости витания капля воды / В.П. Рогов, О.В. Повалихина // Научные труды Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз. – 2007. – № 19. – С. 91-95.
16. Рогов, В.П. Коэффициент сопротивления частиц и капель / В.П. Рогов // Научные труды Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз. – 2007. – № 19. – С. 95-105.
17. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays / D. Nyuttens [et al.] // American Society of Agricultural Engineers. – 52 (5). – P. 1471-1480.
18. The influence of operator controlled variables on spray drift from field crop sprayers. / D. Nyuttens [et al.] // Transactions of the ASABE. – 2007. – № 50 (4). – P. 1129-1140.
19. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods / D. Nyuttens [et al.] // Biosystems Engineering. – 2009. – № 103 (3). – P. 271-280.
20. Agricultural sprays in cross flow and drift. / M. Farooq [et al.] // Agricultural engineering research. – 2001. – № 78 (4). – P. 347-358.
21. Herbicide application methodologies: influence of nozzle selection, droplet size and spray drift on effective spraying – a review. / C.R. Chethan [et al.] // Innovative Farming. – 2019. – № 4 (1). – P. 45-53.
22. Барский, М.Д. Фракционирование порошков / М.Д. Барский. – М.: Недра, 1980. – 327 с.
23. Коркин, Р. Капля дождя / Р. Коркин // Квант. – 2020. – № 11. – С. 34-37.
24. Иванов, Е.Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1990. – 384 с.
25. Ронкин, В.С. Исследование способов уменьшения потерь пестицидов при опрыскивании полей Белоруссии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ронкин Владимир Самуилович. – Минск, 1977. – 18 с.
26. Крук, И.С. Определение кинематических параметров падения капель рабочего раствора пестицидов при опрыскивании с учетом изменения их геометрических размеров / И.С. Крук, Ю.В. Чигарев, В. Романюк // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2020. – Т. 58, № 3. – С. 352-363.
27. Кравцов, М.В. Характер движения и скорости свободно падающих одиночных шаров в жидкостях / М.В. Кравцов, А.М. Кравцов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 2. – С. 80-87.
28. Крук, И.С. К обоснованию силового воздействия капли пестицида на обрабатываемую поверхность / И.С. Крук // Агропанорама. – 2014. – № 6 (106). – С. 13-16.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.05.2025

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

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

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

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 49,62 руб., ведомственная подписка - 52,71 руб.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ РАЗМЕРА МАСЛЯНЫХ КАПЕЛЬ И ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

К.Л. Сергеев,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

М.М. Дечко,

инженер ОАО «ЛМЗ Универсал», канд. техн. наук, доцент

В статье определены рациональные сочетания размеров масляных капель и объемной концентрации дисперсной фазы водомасляной эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости для достижения высоких показателей производительности обработки и качества обработанной поверхности. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений для вышеуказанных факторов при осуществлении процесса магнитно-абразивной обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость, производительность обработки, качество обработанной поверхности, дисперсность, кавитация.

A rational combination of oil droplets sizes and the volume concentration of the dispersed phase of the water-oil emulsion cutting fluid was determined to achieve high processing performance and the quality of the treated surface. Recommendations are given on selection of optimal values for the above factors during magnetic abrasive treatment.

Key words: magnetic-abrasive machining, lubricating-cooling liquid, processing efficiency, quality of treated surface, dispersion, cavitation.

Введение

Одним из перспективных методов финишной обработки поверхностей деталей является магнитно-абразивная обработка (МАО), которая обеспечивает качественную обработку поверхностей и обладает высокой производительностью [1]. Сущность МАО состоит в том, что ферроабразивный порошок (ФАП), уплотненный энергией магнитного поля, оказывает абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность. Действие ФАП в процессе резания на поверхность обрабатываемой детали в значительной степени усиливается при введении в рабочий зазор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), которая обладает высокими диспергирующими, охлаждающими, моющими и смазывающими действиями.

В настоящее время для процесса МАО наиболее распространены водомасляные эмульсионные СОЖ, которые представляют собой грубодисперсные смеси нерастворимых фаз (эмульсии), получаемые при смешивании концентрата с водой [1-3]. В качестве примеров таких СОЖ можно привести эмульсии на основе эмульсолов ЭТ, ЭГТ, Э-2 [4]. Однако в последние годы наблюдается рост использования для МАО полусинтетических и синтетических СОЖ (Аквал-1, СинМА-1, СинМА-2), которые в своей осно-

ве содержат поверхностно-активные вещества и синтетические жирные кислоты, при этом ограничивая содержание нефтяных компонентов [5]. Недостатком данных СОЖ является высокая стоимость компонентов, что негативно сказывается на конкурентоспособности изделий, обработанных методом МАО. К альтернативе вышеуказанных технологических жидкостей можно отнести концентрат СОЖ [6], который содержит вместо нефтяного сырья отходы масложирового производства (соапстоки растительных масел, масленичный фуз, первичные жировые гудроны, смеси различных отходов, глицериды жирных кислот). Очевидное преимущество данной СОЖ заключается в 100 %-й биоразлагаемости, а важным аспектом при производстве такого рода СОЖ является использование отечественного сырья, так как Республика Беларусь обладает развитым аграрным сектором. Высокий промышленный потенциал является предпосылкой для востребованности новых составов СОЖ при производстве деталей для агропромышленного комплекса страны.

Дисперсность – основная коллоидно-химическая характеристика эмульсий СОЖ. В источнике [6] экспериментально исследовано и рассмотрено влияние дисперсности водомасляной эмульсионной СОЖ на эффективность МАО. Установлено, что степень диспергирования СОЖ влияет на диспергирующие и

моющие действия, что способствует повышению эффективности МАО. Усиление диспергирующего действия СОЖ с повышением ее дисперсности обусловлено более активным проникновением масляной фазы эмульсии в микротрещины металла в зоне резания, а моющего действия – более активным обволакиванием частиц шлама масляной фазой, что облегчает их последующее удаление из зоны обработки. Отмечено, что использование СОЖ с повышенной дисперсностью способствует увеличению интенсивности и улучшению качества обработки.

Изучению влияния дисперсности СОЖ на эффективность различных методов металлообработки посвящены работы Н.Е. Есиповой, В.В. Маркова, А.В. Годлевского, Е.В. Киселевой и других.

Целью настоящей работы является установление рациональных сочетаний размера R_{cp} масляных капель и объемной концентрации $C_{COЖ}$ масляной фазы СОЖ, при которых обеспечивается повышение производительности обработки и качества обработанной поверхности.

Для реализации поставленной цели исследования принят процесс МАО, при котором наиболее проявляется взаимодействие технологических режимов данного процесса и технических характеристик СОЖ.

Основная часть

Для проведения исследований была выбрана СОЖ, которая ранее использовалась при проведении экспериментов, описанных в источнике [6]. Эксперименты проводились на установке, оснащенной специальной наладкой и полюсными наконечниками, созданной на базе токарного станка ТВ-4. Обрабатывались детали типа «втулка» размером $D \times d \times l = 25 \times 16 \times 66$ мм. В качестве материала деталей использовалась сталь 45 (ГОСТ 1050–88, HB = 170...210), исходная шероховатость поверхности – $Ra_0 \approx 1,3$ мкм.

Режимы процесса МАО: величина магнитной индукции – $B = 0,8$ Тл; скорость вращения детали – $V_p = 40$ м/мин; величина рабочего зазора – $\delta = 2$ мм. В качестве ФАП применялся Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, зернистость которого составляла $\Delta = 0,2...0,315$ мм; расход СОЖ – $V_{COЖ} = 0,15...0,25$ л/мин.

Диспергирование исследуемых образцов эмульсии СОЖ осуществляли с помощью ультразвукового (УЗ) диспергатора погружного типа УДНЧ (БГУИР, Беларусь). С целью получения изображений капель дисперсной фазы СОЖ применялся компьютерный микроскоп (ЧНПУП «Спектравтоматкомплекс», Беларусь). Для изучения структурных особенностей исследуемой СОЖ использовался программный комплекс обработки и анализа изображений *AutoScan Studio 3.0* (ЗАО «Спектроскопические системы», Беларусь). Измерения объемной концентрации свежеприготовленной эмульсии СОЖ осуществляли при помощи рефрактометра Мегеон 72024.

В работе [7] рассматривался вопрос динамики изменения геометрических параметров масляной фа-

зы СОЖ после УЗ. Выходным показателем агрегативной устойчивости эмульсий СОЖ являлся достигаемый средний размер масляных капель после УЗ диспергирования (R_{cp1} , мкм). Эффективность стойкости эмульсии СОЖ после выдержки оценивали по отношению:

$$R_{cp0}/R_{cp1},$$

где R_{cp0} – средний размер масляных капель СОЖ до УЗ диспергирования, мкм.

Процесс МАО осуществляли после приготовления СОЖ. Эффективность стойкости эмульсии СОЖ составила 0,991. Следовательно, размер масляных капель СОЖ существенно не изменился и не оказал влияния на итоговый результат по определению качества обработанной поверхности и производительности процесса МАО.

Производительность процесса МАО можно оценивать по массе или величине толщины снятого в единицу времени с обрабатываемой поверхности материала. Для определения массового съема при МАО использовались лабораторные весы ВК-1500 (ГОСТ 24104-2001). Величину съема металла при МАО определяли как разность массы до и после обработки втулок

$$\Delta G = G_1 - G_2, \text{ мг.}$$

В дальнейшем производительность процесса МАО оценивали величиной съема металла с единицы площади в единицу времени

$$\Delta G_{уд} = \frac{\Delta G}{St},$$

где $\Delta G_{уд}$ – удельный съем, мг/(см²·мин);

S – площадь поверхности образца, см²;

t – время обработки, мин.

Качество поверхности оценивалось измерением параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789–73. Шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra определяли с помощью цифрового измерителя шероховатости поверхности TR-200.

Исследования процесса МАО выполнялись с использованием известных методик математического планирования эксперимента и статистической обработки данных на основе ортогонального центрального композиционного плана [8-10]. Для оценки воспроизводимости эксперименты с вариацией каждого образца исследуемой СОЖ повторяли три раза.

Перед проведением МАО для исследуемого состава СОЖ осуществляли процесс диспергирования. Образец СОЖ объемом 150 мл заливали в стеклянный стакан (внутренний диаметр – 58 мм; высота – 80 мм). УЗ обработку осуществляли при частоте 22 кГц и выходной мощности генератора 40 Вт в несколько этапов (с перерывами в 1-2 мин.) общей длительностью 15-20 минут, в зависимости от объемной концентрации $C_{COЖ}$ масляной фазы СОЖ. До УЗ обработки средний размер масляных капель R_{cp} составлял 5 мкм, после УЗ обработки – 3 и 1 мкм (рис. 1).

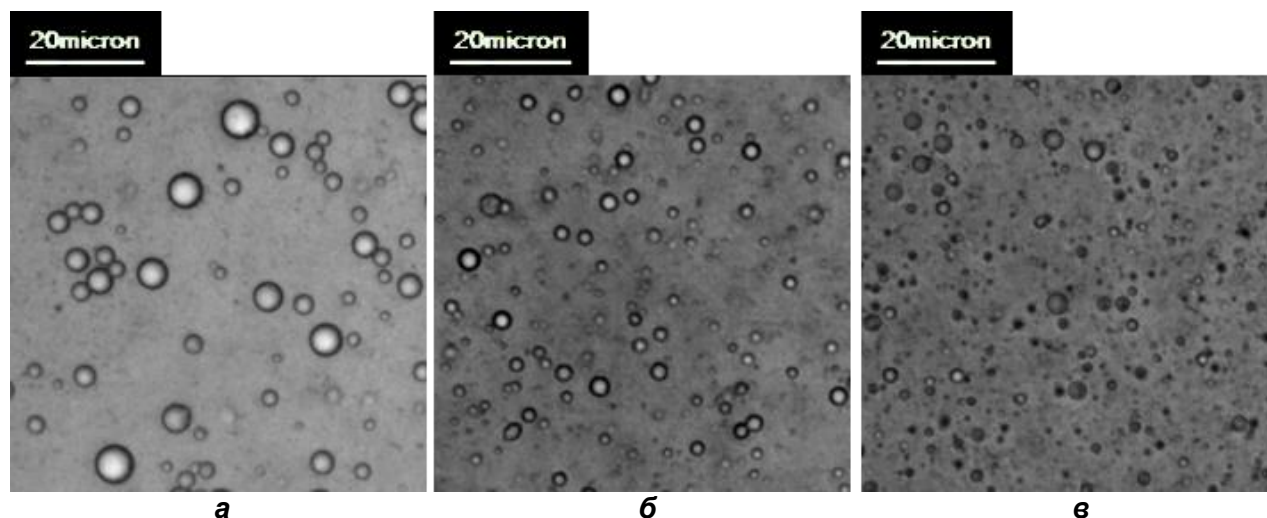


Рисунок 1. Пример типичного вида масляных капель дисперсной фазы исследуемой СОЖ: а – $R_{cp} = 5$ мкм (до УЗ обработки); б – $R_{cp} = 3$ мкм; в – $R_{cp} = 1$ мкм (после УЗ обработки)
Объемная концентрация $C_{сож}$ масляной фазы = 30 г/л

Диапазон максимальных и минимальных размеров масляных капель эмульсии СОЖ: для $R_{cp} = 5$ мкм – от 1,8 до 9,7 мкм; для $R_{cp} = 3$ мкм – от 0,9 до 5,2 мкм; для $R_{cp} = 1$ мкм – от 0,6 до 2,1 мкм.

В качестве управляющих факторов для процесса MAO были взяты: X_1 – объемная концентрация $C_{сож}$ масляной фазы СОЖ, г/л; X_2 – средний размер R_{cp} масляных капель СОЖ, мкм; X_3 – время t MAO, с. На основе априорных данных выбраны уровни и интервалы варьирования факторов для MAO (табл. 1).

Результаты опытов, выполненных по ортогональному центральному композиционному плану при 3-кратном дублировании, и их статистический анализ представлены в таблице 2.

Зависимость шероховатости от исследуемых управляющих факторов процесса MAO адекватно описывается уравнением регрессии вида:

$$Ra = 0,620 - 0,108X_1 + 0,085X_2 - 0,038X_3 + 0,058X_1X_2 + 0,115X_1^2 + 0,068X_2^2 - 0,085X_3^2. \quad (1)$$

Значения коэффициентов регрессии показывают, что наибольшее влияние на изменение шероховато-

сти оказывает объемная концентрация $C_{сож}$ масляной фазы (коэффициент регрессии 0,108), далее – средний размер R_{cp} масляных капель (коэффициент регрессии 0,085) и наименьшее влияние оказывает время t MAO (коэффициент регрессии 0,038). Совместное влияние объемной концентрации и размеров масляных капель ее дисперсной фазы указывает на существование рационального сочетания факторов СОЖ, а знаки при квадратичных эффектах – на наличие минимума параметра Ra по двум факторам (объемная концентрация масляной фазы СОЖ и размер масляных капель ее дисперсной фазы).

Координаты минимума определим из условия равенства нулю градиента функции (1) по X_1 и X_2 , продифференцировав ее по этим переменным:

$$\nabla Ra(X_1, X_2) = \begin{pmatrix} 0,230X_1 + 0,058X_2 - 0,108 \\ 0,058X_1 + 0,136X_2 + 0,085 \end{pmatrix} = 0, \quad (2)$$

откуда $X_1 = 0,703$; $X_2 = -0,925$ или в натуральных координатах: $C_{сож} = 44$ г/л; $R_{cp} = 1,15$ мкм.

Время обработки оказывает независимое от факторов СОЖ влияние на шероховатость. Как видно из

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни варьирования факторов	Варьируемые факторы		
	Объемная концентрация $C_{сож}$ масляной фазы СОЖ, г/л	Средний размер R_{cp} масляных капель СОЖ, мкм	Время t MAO, с
Кодовое обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Основные уровни ($X_i = 0$)	30	3	90
Интервалы варьирования	20	2	30
Нижние уровни ($X_i = -1$)	10	1	60
Верхние уровни ($X_i = +1$)	50	5	120
Звездные точки ($X_i = -1,2154$)	5,7	0,6	53,5
Звездные точки ($X_i = +1,2154$)	54	5,4	126,5

Таблица 2. План эксперимента, результаты и статистический анализ зависимости шероховатости поверхности (R_a , мкм) от свойств СОЖ

№	Нормированные значения факторов			Экспериментальные и расчетные значения параметра шероховатости R_a , мкм и их дисперсии						
	X_1	X_2	X_3	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	$R_{a_{cp}}$	S^2	R_{a_p}	S_R^2
1	1	1	1	0,77	0,73	0,65	0,72	0,004	0,72	0,0000
2	1	1	-1	0,67	0,69	0,78	0,71	0,003	0,79	0,00595
3	1	-1	1	0,42	0,38	0,44	0,41	0,001	0,43	0,00027
4	1	-1	-1	0,55	0,43	0,39	0,46	0,007	0,51	0,00238
5	-1	1	1	0,88	0,69	0,80	0,79	0,009	0,82	0,00060
6	-1	1	-1	0,97	0,89	0,95	0,94	0,002	0,89	0,00218
7	-1	-1	1	0,57	0,90	0,83	0,77	0,030	0,76	0,00005
8	-1	-1	-1	0,92	0,76	0,90	0,86	0,008	0,84	0,00063
9	0	0	0	0,54	0,67	0,38	0,53	0,021	0,62	0,00792
10	-1,215	0	0	0,87	0,86	0,87	0,87	0,000	0,92	0,00262
11	1,215	0	0	0,74	0,78	0,78	0,77	0,001	0,66	0,01200
12	0	-1,215	0	0,59	0,65	0,67	0,64	0,002	0,62	0,00044
13	0	1,215	0	0,78	0,97	0,83	0,86	0,010	0,82	0,00141
14	0	0	-1,215	0,67	0,48	0,59	0,58	0,009	0,54	0,00147
15	0	0	1,215	0,44	0,54	0,43	0,47	0,004	0,45	0,00040
Критерий Кохрена	экспериментальный			0,276			Дисперсия воспроизводимости			0,0073
	критический			0,335			Дисперсия адекватности			0,0170
Статистически значимые коэффициенты регрессии	b_0		b_1	b_2	b_3	Критерий Фишера				
	0,620		-0,108	0,085	-0,038	экспериментальный		расчетный		
	b_{12}		b_{11}	b_{22}	b_{33}	2,324		2,334		
	0,058		0,115	0,068	-0,085					
R_{a1}, R_{a2}, R_{a3} – полученные экспериментальные значения параметра шероховатости для каждого опыта; $R_{a_{cp}}$ – выборочное среднее значение параметра шероховатости для каждого опыта; S^2 – выборочная дисперсия для каждого опыта; R_{a_p} – расчетное значение параметра шероховатости для каждого опыта; S_R^2 – квадрат разности экспериментальных и расчетных значений параметра шероховатости для каждого опыта.										

графика на рисунке 2, увеличение времени обработки, согласно полученному регрессионному уравнению, вначале ведет к возрастанию шероховатости, а затем к ее снижению. Однако расчет доверительных интервалов для расчетных значений шероховатости показывает, что это возрастание находится в пределах статистической ошибки, поэтому реальная зависимость может быть такой, как показано штриховой линией на рисунке 2.

Согласно рисунку 2, установлено, что в пределах исследуемого диапазона при увеличении длительности обработки, шероховатость поверхности уменьшается. Это объясняется тем, что за определенное время MAO по своей полирующей способности достигает максимальной интенсивности относительно шероховатости для применяемого типа ФАП и условий обработки.

Экстраполяция зависимости шероховатости R_a от времени t MAO за область варьирования фактора в данном эксперименте (рис. 3) позволяет предположить дальнейшее ее снижение при увеличении времени обработки, что требует дополнительной экспериментальной проверки.

Особое внимание следует уделить анализу полученного уравнения регрессии с учетом совместного влияния объемной концентрации СОЖ и размеров масляных капель ее дисперсной фазы, которое указывает на существование рационального сочетания фак-

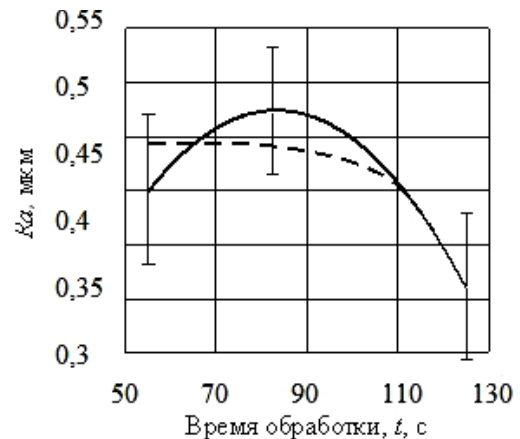


Рисунок 2. Зависимость шероховатости R_a от времени t MAO при объемной концентрации $C_{сож} = 44$ г/л и среднем размере масляных капель дисперсной фазы СОЖ $R_{cp} = 1,15$ мкм

торов СОЖ. Возможная причина этого заключается в синергетическом эффекте, т.е. совместном влиянии варьируемых факторов, которое в дальнейшем положительно скажется на итоговом значении параметра шероховатости (по результатам анализа уравнения регрессии выявлено снижение шероховатости R_a при увеличении объемной концентрации масляной фазы СОЖ при уменьшении размеров масляных капель).

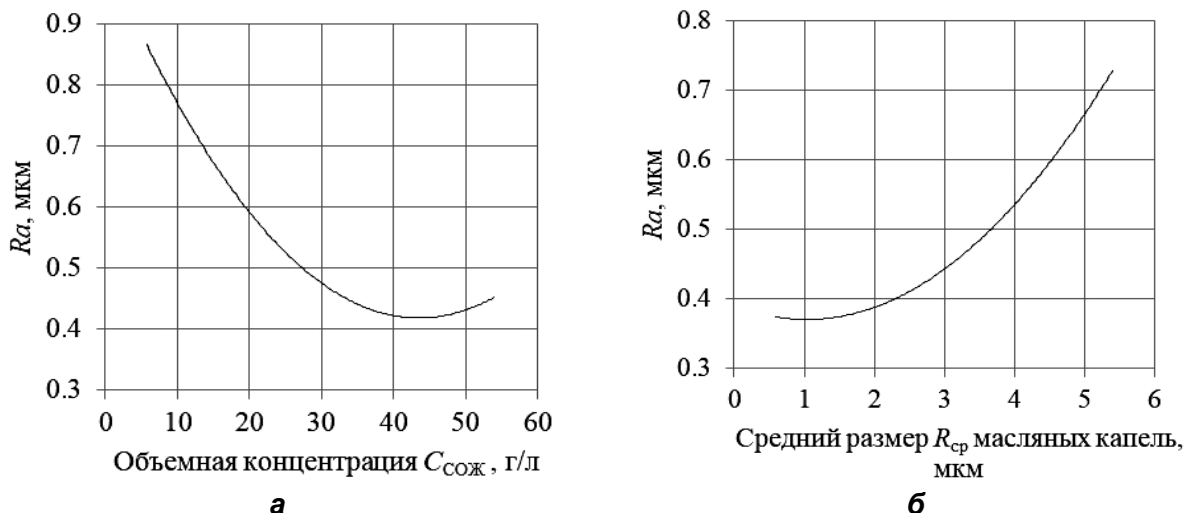


Рисунок 3. Зависимость шероховатости Ra от объемной концентрации $C_{СОЖ}$ масляной фазы при среднем размере масляных капель дисперсной фазы СОЖ $R_{cp} = 1$ мкм и времени МАО $t = 126$ с (а) и среднего размера R_{cp} масляных капель дисперсной фазы СОЖ при объемной концентрации $C_{СОЖ}$ масляной фазы = 50 г/л и времени МАО $t = 126$ с (б)

На наличие глобального минимума параметра Ra (единственная точка, при которой значение шероховатости минимально на всей области определения) указывают знаки при квадратичных эффектах (знак «минус» – наличие глобального максимума, «плюс» – глобального минимума), где наибольшее влияние оказывает средний размер масляных капель, уменьшение которого продуктивно повлияет на параметр Ra .

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что увеличение объемной концентрации масляной фазы СОЖ и уменьшение размеров масляных капель дисперсной фазы СОЖ приводит к снижению шероховатости (рис. 3). В источнике [6] подробно рассмотрены происходящие изменения, возникающие при увеличении объ-

емной концентрации масляной фазы СОЖ и уменьшении размеров масляных капель в характере влияния СОЖ на процесс МАО, которые были вызваны соответствующими изменениями физико-химических свойств СОЖ.

После обработки полученных результатов определено, что минимальное значение шероховатости достигается при времени МАО, которое составило: $t = 126$ с. При этом влияние свойств СОЖ на шероховатость показывает (рис. 4), что ее минимум достигается при объемной концентрации масляной фазы $C_{СОЖ} = 40...45$ г/л и среднем размере масляных капель $R_{cp} = 1...2$ мкм.

На рисунке 5 представлены профилограммы поверхностей до и после МАО при использовании исследованной СОЖ с различными размерами масля-

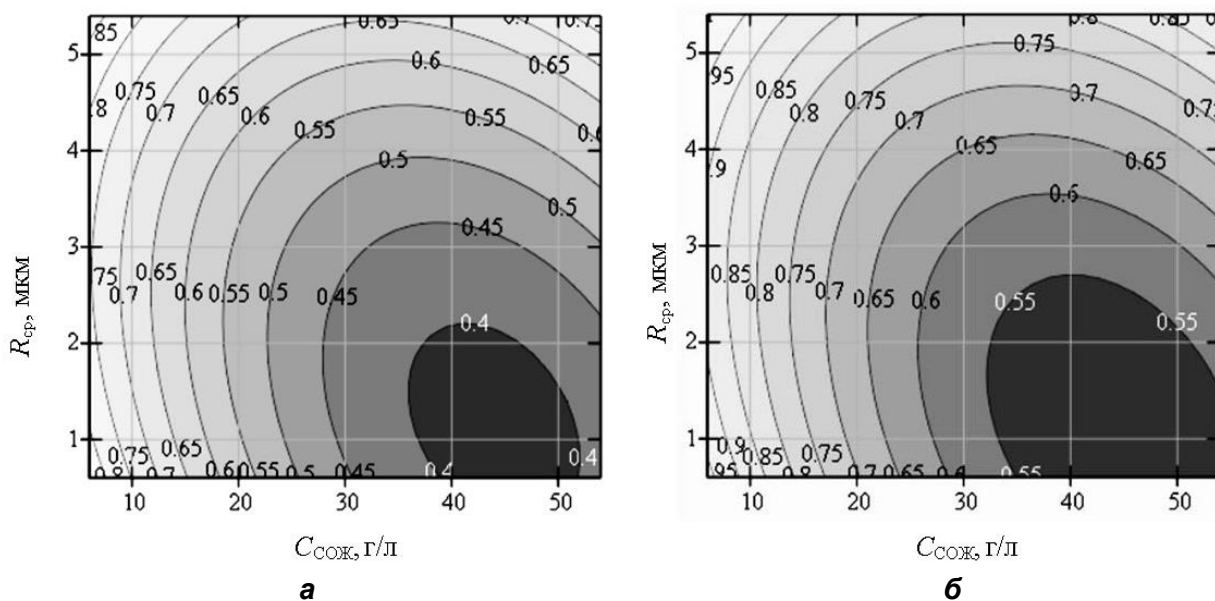


Рисунок 4. Уровни шероховатости по параметру Ra в зависимости от объемной концентрации $C_{СОЖ}$ масляной фазы и среднего размера R_{cp} капель при времени МАО $t = 126$ с (а) и $t = 55$ с (б)

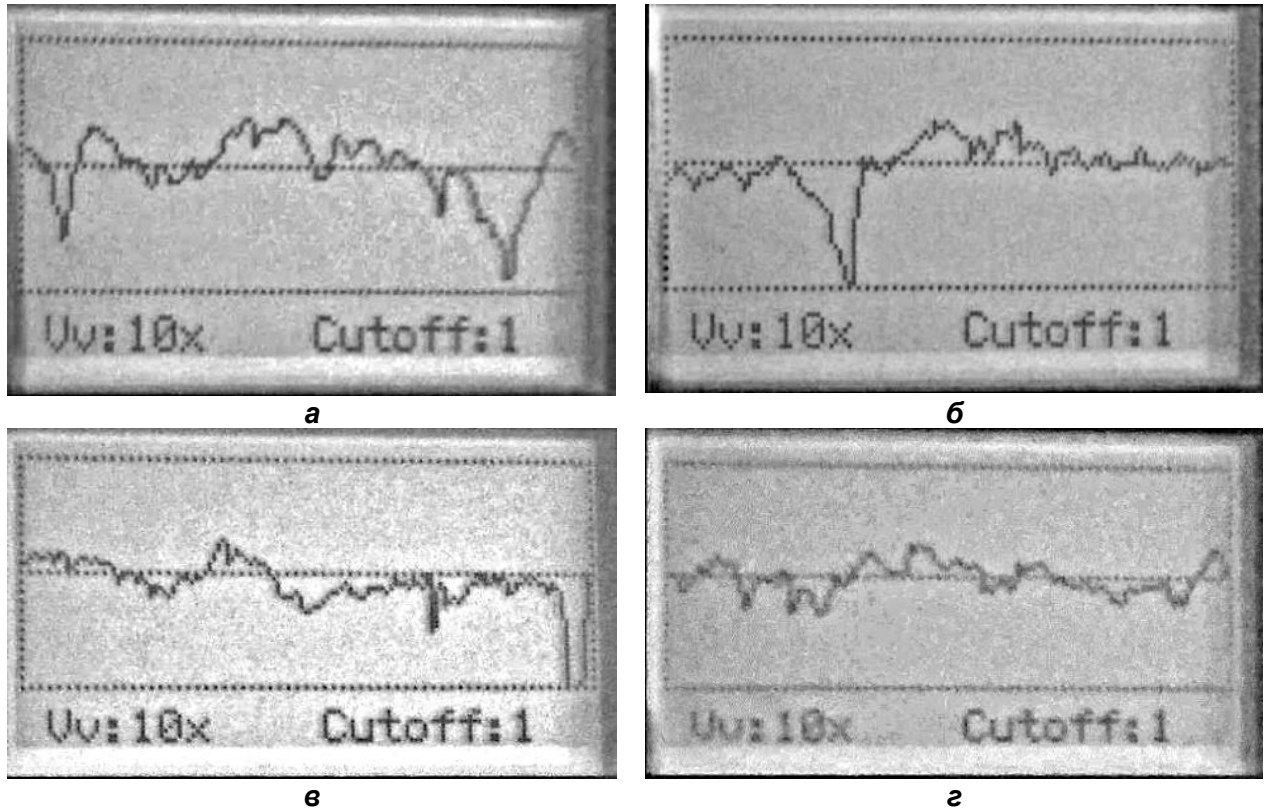


Рисунок 5. Профилограммы обработанной поверхности при MAO с использованием СОЖ с объемной концентрацией масляной фазы $C_{СОЖ} = 50$ г/л: до MAO (а); после MAO – $R_{cp} = 5$ мкм (б); $R_{cp} = 3$ мкм (в); $R_{cp} = 1$ мкм (г)

ных капель ее дисперсной фазы для значений объемной концентрации масляной фазы $C_{СОЖ} = 50$ г/л и среднего размера масляных капель $R_{cp} = 1$ мкм.

Результаты экспериментов по изучению влияния исследуемых управляющих факторов процесса MAO на производительность обработки (табл. 3) показали, что зависимость удельного съема металла может быть описана регрессионным уравнением вида

$$\begin{aligned} \Delta G_{уд} = & 2,24 + 0,94X_1 - 0,18X_2 - 0,38X_3 - \\ & - 0,21X_1X_2 - 0,32X_1X_3 - 0,65X_1^2 + \\ & + 0,52X_2^2 - 0,28X_3^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения коэффициентов регрессии показывают, что наибольшее влияние на удельный съем $\Delta G_{уд}$, как и на шероховатость поверхности Ra , оказывает объемная концентрация $C_{СОЖ}$ масляной фазы (коэффициент регрессии 0,94), далее – время t MAO (коэффициент регрессии 0,38) и наименьшее влияние оказывает средний размер R_{cp} масляных капель (коэффициент регрессии 0,18). Для удельного съема существенно не только совместное влияние объемной концентрации СОЖ и размеров масляных капель ее дисперсной фазы, но и совместное влияние объемной концентрации СОЖ и времени MAO. Статистически значимы также квадратичные эффекты факторов. Отрицательные

значения коэффициентов регрессии при квадратичных эффектах объемной концентрации масляной фазы и времени обработки указывают на наличие максимума производительности в координатах этих факторов.

Координаты максимума определим из условия равенства нулю градиента функции (3) по X_1 и X_3 :

$$\begin{aligned} \nabla \Delta G(X_1, X_3) = \\ = \begin{pmatrix} 0,939 - 1,298X_1 - 0,211X_2 - 0,316X_3; \\ -0,381 - 0,316X_1 - 0,566X_3 \end{pmatrix} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Решая полученную систему уравнений относительно X_1 и X_3 , получим:

$$\Delta G_{max} = 2,964 - 0,393X_2 + 0,539X_2^2. \quad (5)$$

Из уравнения следует, что наибольшая производительность MAO достигается при наименьших размерах капель $X_2 = -1,2154$. Подставив это значение в выражение (4) и решив полученную систему уравнений, найдем оптимальные значения факторов $X_1 = 1,256$ и $X_3 = -1,246$. Так как полученные значения факторов в нормированных координатах лежат за исследованной экспериментально областью, то для достижения максимальной производительности следует рекомендовать максимальное значение объемной концентрации масляной фазы $C_{СОЖ} = 54$ г/л и минимальное время обработки $t = 53$ с.

Таблица 3. План эксперимента, результаты и статистический анализ зависимости удельного съема $\Delta G_{уд}$, мг/(см²·мин) процесса МАО от свойств СОЖ

№	Нормированные значения факторов			Экспериментальные и расчетные значения параметра $\Delta G_{уд}$, мг/(см ² ·мин) и их дисперсии							
	X_1	X_2	X_3	$\Delta G_{уд1}$	$\Delta G_{уд2}$	$\Delta G_{уд3}$	$\Delta G_{удcp}$	S^2	$\Delta G_{удp}$	S_R^2	
1	1	1	1	1,54	1,64	2,03	1,74	0,067	1,69	0,003	
2	1	1	-1	3,09	3,47	3,30	3,29	0,036	3,08	0,045	
3	1	-1	1	1,93	2,80	2,61	2,45	0,209	2,46	0,000	
4	1	-1	-1	3,54	4,82	4,05	4,14	0,415	3,85	0,082	
5	-1	1	1	0,67	0,48	0,87	0,67	0,038	0,86	0,037	
6	-1	1	-1	1,54	0,58	0,58	0,90	0,307	0,99	0,008	
7	-1	-1	1	0,39	0,48	0,58	0,48	0,009	0,79	0,097	
8	-1	-1	-1	0,58	0,77	1,54	0,96	0,258	0,92	0,002	
9	0	0	0	1,93	2,19	2,57	2,23	0,104	2,24	0,000	
10	-1,215	0	0	0,39	0,77	0,65	0,60	0,038	0,14	0,208	
11	1,215	0	0	2,06	2,19	1,69	1,98	0,067	2,43	0,200	
12	0	-1,215	0	2,32	3,86	3,47	3,22	0,646	3,22	0,000	
13	0	1,215	0	3,47	2,90	2,06	2,81	0,503	2,80	0,000	
14	0	0	-1,215	1,93	2,33	1,49	1,92	0,177	2,29	0,135	
15	0	0	1,215	1,76	2,04	1,40	1,74	0,102	1,36	0,142	
Критерий Кохрена	экспериментальный			0,217			Дисперсия воспроизводимости				0,199
	критический			0,335			Дисперсия адекватности				0,480
Статистически значимые коэффициенты регрессии	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	Критерий Фишера					
	2,24	0,94	-0,18	-0,38	-0,21	экспериментальный		расчетный			
	b_{13}	b_{11}	b_{22}	b_{33}		2,410		2,421			
	-0,32	-0,65	0,52	-0,28							

$\Delta G_{уд1}$, $\Delta G_{уд2}$, $\Delta G_{уд3}$ – полученные экспериментальные значения удельного съема для каждого опыта; $\Delta G_{удcp}$ – выборочное среднее значение удельного съема для каждого опыта; S^2 – выборочная дисперсия для каждого опыта; $\Delta G_{удp}$ – расчетное значение удельного съема для каждого опыта; S_R^2 – квадрат разности экспериментальных и расчетных значений удельного съема для каждого опыта.

На рисунке 6 показаны максимальные значения производительности в зависимости от времени обработки при оптимальном размере масляных капель СОЖ и времени обработки.

Влияние свойств СОЖ (рис. 7б) на удельный съем показывает, что с ростом объемной концентрации масляной фазы до 35 г/л производительность процесса возрастает в 3...5 раз, а дальнейшее увеличение объемной концентрации масляной фазы на этот параметр существенно не влияет. Размер капель влияет на удельный съем менее интенсивно, но имеет оптимум, который по мере возрастания объемной концентрации смещается с 3 мкм до 1 мкм. Объяснить это можно тем, что увеличение объемной концентрации масляной фазы приводит к повышению вязкости, что, в свою очередь, приводит к большей вероятности заклинивания отверстий пор на режущем контуре ферроабразивной «щетки» каплями масла, через которые не смогут проникать последующие капли такого же размера или меньше. Постепенно на поверхности ФАП будет создаваться плотный слой (корка), который не даст режущим кромок ФАП продолжать дальнейшее удаление металла в том количестве, которое осуществлялось ранее, до образования данного слоя на поверхности ФАП [11]. В дальнейшем увеличение объемной концентрации до 35 г/л приводит к снижению подвижности и умень-

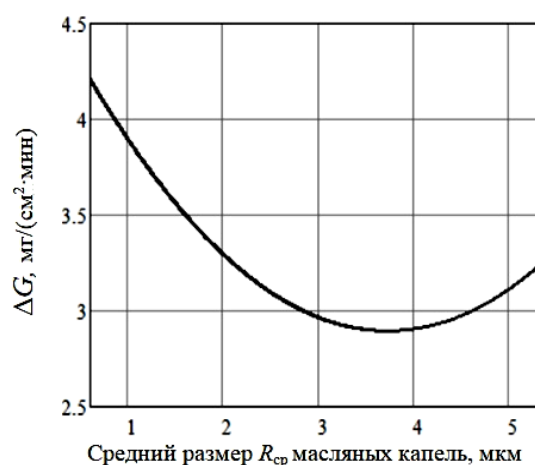


Рисунок 6. Зависимость максимальной производительности $\Delta G_{уд}$ от размеров капель при объемной концентрации масляной фазы $C_{сож} = 54$ г/л и времени обработки $t = 53$ с

шению самозатачивания ферроабразивного зерна, что сказывается на его работе в процессе обработки (изменяется диапазон угла наклона зерен). Все это приводит к уменьшению удельного съема металла. Размерность же масляных капель дисперсной фазы связана с проникновением в горло поры ФАП, то есть чем меньше размер капли дисперсной фазы, тем больше вероятность попадания в данную область [5].

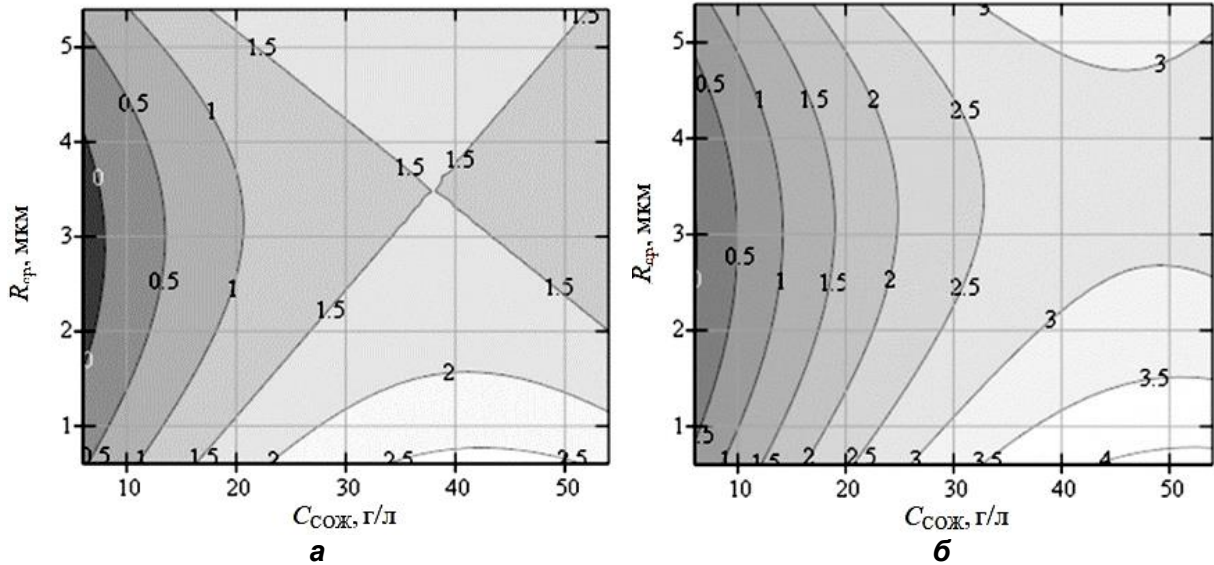


Рисунок 7. Уровни производительности МАО в зависимости от объемной концентрации $C_{сож}$ масляной фазы и среднего размера $R_{ср}$ масляных капель при времени МАО $t = 126$ с (а) и $t = 55$ с (б)

Полученные значения удельного съема и шероховатости разнятся с экспериментальными значениями, которые были представлены в работе [6]. Если сравнивать значения шероховатости Ra , то полученные значения будут больше в 1,9-3,0 раза, а по удельному съему $\Delta G_{уд}$ меньше в 5,2-5,6 раза по сравнению со значениями в вышеуказанной работе. Объясняется это главным образом тем, что увеличение рабочего зазора δ с 1 до 2 мм при проведении экспериментов приводит к снижению производительности и качества обрабатываемой поверхности за счет уменьшения давления ферроабразивной «щетки» на обрабатываемую поверхность и, соответственно, приводит к сведению к минимуму сил резания магнитного происхождения [12, 13].

Степень влияния дисперсности СОЖ на изменение шероховатости обработанной поверхности оценивали по отношению Ra_5/Ra_1 , показывающему, во сколько раз уменьшается шероховатость после МАО для различных образцов СОЖ за счет повышения дисперсности масляной фазы, т.е. при уменьшении среднего диаметра масляных капель от 5 мкм до 1 мкм. При этом для достижения минимальной шероховатости принимаем рекомендуемые оптимальные значения объемной концентрации масляной фазы $C_{сож} = 44$ г/л и времени МАО $t = 126$ с.

Результаты влияния дисперсности СОЖ на изменение шероховатости обработанной поверхности при подстановке рекомендуемых значений в уравнение регрессии представлены в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, с уменьшением размеров масляных капель с 5 до 1 мкм полученное значение шероховатости на основании подстановки в уравнение регрессии уменьшается в 1,22-1,68 раза,

что доказывает рассмотренные изменения, возникающие при уменьшении размеров масляных капель в характере влияния СОЖ на процесс МАО [6].

Для комплексной оценки влияния факторов МАО на шероховатость обработанной поверхности и производительность процесса, сравним контурные графики шероховатости (рис. 4) и производительности (рис. 8) в одной системе координат.

Сравнение показывает, что области оптимальных

Таблица 4. Результаты влияния дисперсности СОЖ на изменение шероховатости обработанной поверхности при $C_{сож} = 44$ г/л и $t = 126$ с

$R_{ср}$, мм	Ra , мкм	h_{30}/h_{3M}
5	0,627	–
4	0,513	1,22
3	0,432	1,45
2	0,385	1,63
1	0,373	1,68

решений не совпадают по фактору t – время обработки. Следовательно, на практике надо выбирать некоторое компромиссное решение. Например, фиксировать допустимое значение шероховатости и находить, при каких значениях факторов достигается наибольшая производительность.

На рисунке 8 приведен вариант компромиссного решения, при котором можно получить: $Ra < 0,5$ мкм и $\Delta G > 3$ мг/(см²·мин) при $R_{ср} < 1$ мкм, $C_{сож} = 45$ г/л, $t = 110$ с.

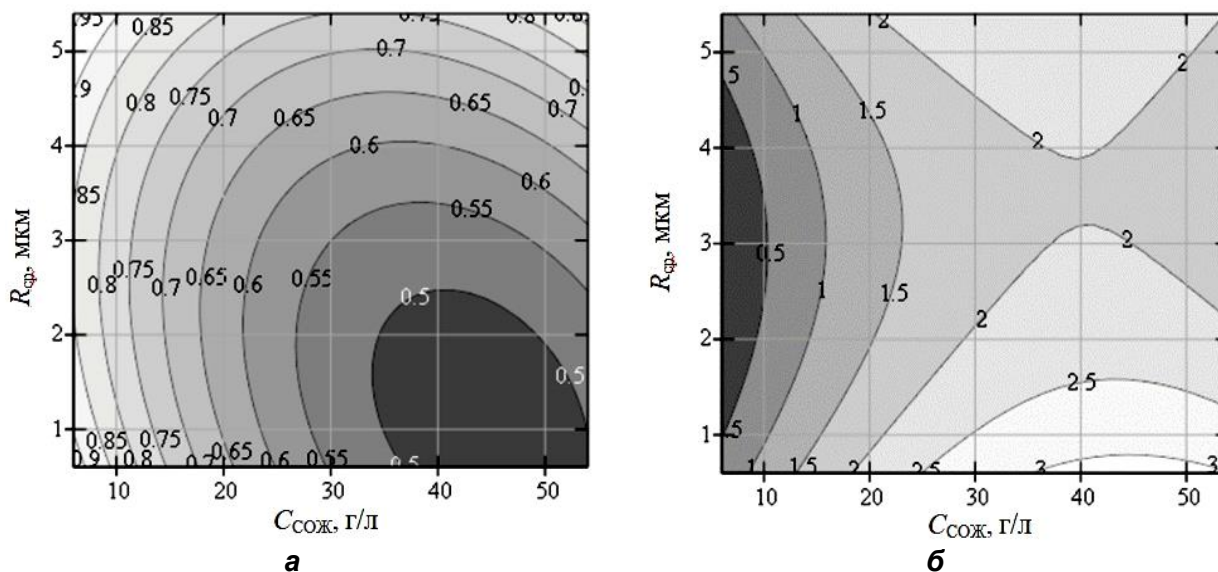


Рисунок 8. Уровни шероховатости обработанной поверхности (а) и производительности MAO (б) в зависимости от концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы и среднего размера $R_{\text{ср}}$ масляных капель при времени MAO $t = 110$ с

Заключение

По результатам многофакторного эксперимента получены регрессионные уравнения зависимости шероховатости Ra обработанной поверхности и удельного съема $\Delta G_{\text{уд}}$ от объемной концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы СОЖ, среднего размера $R_{\text{ср}}$ масляных капель и времени t MAO для эмульсии СОЖ, приготовленной на основе отходов масложирового производства.

Проведенные экспериментальные исследования позволили рекомендовать в качестве оптимальных значений:

- для шероховатости Ra обработанной поверхности объемную концентрацию масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 45$ г/л, средний размер масляных капель $R_{\text{ср}} < 1$ мкм и время MAO $t = 110$ с;

- для удельного съема $\Delta G_{\text{уд}}$ объемную концентрацию масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 40-45$ г/л, средний размер масляных капель $R_{\text{ср}} = 1..2$ мкм и время MAO $t = 126$ с.

Подтверждены ранее установленные экспериментальные данные, согласно которым использование СОЖ с более высокой дисперсностью способствует повышению производительности обработки и качества обработанной поверхности.

Результаты данной работы могут быть использованы при производстве деталей сельскохозяйственной техники, к которым предъявляются повышенные требования по качеству обработки. Применение СОЖ в процессе MAO с установленными оптимальными значениями для компромиссного решения сможет обеспечить максимальную производительность при MAO $\Delta G_{\text{уд}} > 3$ мг/(см²·мин) и шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,5$ мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
2. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, – 2019. – 272 с.
3. Энтелис, С.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / С.Г. Энтелис, Э.М. Берлинер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
4. Акулович, Л.М. Синергетическая связь технологических параметров магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей вращения / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В.К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. – Вып. 35. – С. 29-39.
5. Акулович, Л.М. Применение полусинтетических смазочно-охлаждающих технологических средств для магнитно-абразивной обработки / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, М.А. Залуцкий // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т; под ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2020. – С. 80-82.

6. Толочко, Н.К. Влияние дисперсности эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости на эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.К. Толочко, К.Л. Сергеев // Технология машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 31-35.

7. Сергеев, К.Л. Влияние ультразвуковой обработки на агрегативную устойчивость дисперсной фазы водомасляной эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости / К.Л. Сергеев, П.Н. Василевский, А.А. Лиора // Современные проблемы освоения новой техники, технологий и организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Беллагро-2018», г. Минск, 7–8 июня 2018 г./ Белор. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2018. – С. 234-240.

8. Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 380 с.

9. Леонов, А. Н. Основы научных исследований в примерах и задачах: учеб.-метод. пособие для студентов вузов группы специальностей 74 06 «Агроинже-

нерия» / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис; под общ. ред. А.Н. Леонова. – Минск, 2013. – 133 с.

10. Леонов, А.Н. Основы научных исследований и моделирования: учеб.-метод. комплекс для студентов вузов, обучающихся по группе специальностей 74 06 «Агроинженерия» / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.

11. Акулович, Л.М. Влияние свойств рабочей технологической среды на шероховатость поверхности и производительность при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, М.М. Дечко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2022. – № 1. – С. 39-48.

12. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

13. Бабич, В.Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Бабич Виталий Евгеньевич; ГНУ Физико-технический институт НАН Беларуси. – Минск, 2009. – 158 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.03.2025

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 распылителем и обрабатываемой поверхностью в процессе работы опрыскивателя, как на склонах, так и на равнинной местности.



Основные технические данные

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

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

В.П. Чеботарев,

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

Г.А. Радишевский,

доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Н.П. Гурнович,

доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Д.А. Яновский,

ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

А.А. Зенов,

ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

Д.Н. Бондаренко,

ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

А.А. Лаппо,

магистрант БГАТУ

В статье проведен анализ конструкций измельчающих аппаратов кормоуборочных машин и факторов, оказывающих влияние на энергоемкость процесса измельчения растительной массы. Приведена зависимость, устанавливающая влияние факторов на энергоемкость процесса измельчения, а также определен оптимальный режим работы измельчающего аппарата из условия минимальных затрат энергии на выполнение технологического процесса.

Ключевые слова: измельчающий аппарат, режимы резания, угол скольжения, кормоуборочный комбайн, кукуруза.

The article presents an analysis of the structures of forage harvesters chopping devices and factors influencing the energy intensity of plant mass chopping process. The dependence establishing the influence of factors on the energy intensity of the chopping process is presented, and the optimal operating mode of the chopping device is determined from the condition of minimal energy costs for the implementation of the technological process.

Key words: chopping device, cutting modes, sliding angle, forage harvester, corn.

Введение

В агропромышленном комплексе (АПК) Республики Беларусь отрасль животноводства занимает важное место в производстве сельскохозяйственной продукции. Эффективность отрасли животноводства зависит от производства сбалансированных по белку кормовых смесей, в состав которых входят грубые стебельные корма на основе кукурузы, содержащие питательные легкоусвояемые вещества, необходимые для организма жвачных животных.

В структуре кормовых смесей доля грубых стебельных кормов при производстве молока составляет 50-55 %, говядины – 65-70 %, свинины и птицы – 70-80 %. Важная роль в структуре производства грубых стебельных кормов принадлежит сенажу и силосу. В Республике Беларусь для производства силоса и сенажа (в среднем около 20 млн т в год) основной сельскохозяйственной культурой является кукуруза.

Ценность кукурузы как исходного материала для получения сенажа и силоса состоит в ее питательности, благодаря морфологическим частям растений. Так, в период цветения в 1 кг зеленой массы кукурузы содержится 1,69 МДж, в фазе молочной спелости зерна – 2,05 МДж, молочно-восковой – 2,34 МДж, восковой – 2,96 МДж, а в стадии молочной спелости 1 кг початков содержится 2,34 МДж, молочно-восковой – 3,65 МДж, восковой – 5,64 МДж. Кроме того, листостебельная масса кукурузы в фазе восковой спелости состоит в основном из клетчатки с низкой переваримостью, которая необходима при кормлении крупного рогатого скота [1].

Одним из факторов, оказывающих влияние на качество корма, является измельчение, которое относится к энергоемким процессам. Поэтому проблема снижения энергоемкости процесса измельчения грубых стебельных растений является актуальной и спо-

способствует повышению эффективности производства продукции животноводства за счет снижения себестоимости кормов.

Проблемам энергоемкости процесса измельчения растений большое внимание уделяли В.П. Горячкин, Н.Е. Резник, В.А. Желиговский, В.Н. Демченко, Л.Е. Бестаев и другие [2-6].

Целью данной работы является установление влияния физико-механических свойств грубых стебельных растений и параметров режущего инструмента на энергоемкость процесса измельчения.

Основная часть

Измельчение растений является основной операцией, выполняемой кормоуборочными машинами. Исследователи, занимающиеся процессом измельчения, установили, что качество кормов, заготовленных с помощью измельчающего аппарата кормоуборочных машин, зависит от соответствия длины резки агротехническим требованиям по качеству измельчения (массовой доли фракций частиц в заданном диапазоне длины резки) [5, 6].

В настоящее время для измельчения растительной массы применяются различные по конструктивному исполнению измельчающие аппараты кормоуборочных машин. Широкое распространение получили такие измельчающие аппараты, как роторный, дисковый и барабанный (цилиндрический).

Роторный аппарат применяется в косилке-измельчителе «ПОЛЕСЬЕ 1500» (ОАО «Гомсельмаш»), который осуществляет измельчение безподпорным срезом растений (рис. 1а) [7]. Благодаря шарнирному креплению ножей, на валу ротора обеспечивается высокая надежность выполнения технологического процесса среза и измельчения. Однако одним из недостатков этого аппарата является невозможность обеспечения изменения длины резки растений и загрязнение корма почвой из-за ее захвата ножами.

Дисковый измельчающий аппарат (рис. 1б), используемый в кормоуборочном комбайне КПК-3000, обеспечивает резку зеленой массы с регулируемой длиной [7]. Достоинством данного измельчающего аппарата является применение ножей прямолинейной формы, что упрощает изготовление и заточку, а недостатком является непостоянство угла защемления зеленой массы

между ножом и противорежущей пластиной, что способствует скольжению измельчаемой массы вдоль лезвия и сгуживанию ее у края питающего окна, а также непостоянство крутящего момента в приводе.

Наиболее широкое применение получили барабанные (цилиндрические) измельчающие аппараты: плосконожевой (рис. 1в) [8] и с винтообразными ножами (рис. 1г) [9]. В зависимости от назначения барабанные аппараты изготавливаются в двух вариантах: измельчающе-швыряющие и измельчающие. Измельчающе-швыряющий аппарат обеспечивает одновременно с измельчением транспортирование массы в транспортное средство. При использовании измельчающего аппарата для транспортирования измельченной массы дополнительно применяется доизмельчающее устройство с ускорителем выброса.

Достоинством плосконожевого барабанного измельчающего аппарата по сравнению с дисковым, является то, что ножи устанавливаются в несколько рядов с перекрытием. В результате этого происходит защемление растений под углом меньше угла трения (режим резки с продольным перемещением без скольжения), что обеспечивает постоянство нагрузки в приводе режущего аппарата. Недостаток плосконожевого аппарата заключается в неравномерности резки по длине.

Барабанные измельчающие аппараты с винтообразными ножами более эффективны по сравнению с плосконожевыми измельчающими аппаратами, так как в них сохраняется постоянный угол защемления растительной массы, что обеспечивает равномерную длину резки и меньшую энергоемкость процесса измельчения. Недостатком измельчающих аппаратов с винтообразными ножами является сложность изготовления, заточка и регулировка.

С учетом тенденций развития конструкций измельчающих аппаратов, в кормоуборочных комбайнах для измельчения грубых стебельчатых кормов наиболее эффективным является барабанный тип рабочего органа, так как он согласуется с питающим устройством и позволяет эффективно применять прямолинейные ножи, установленные в несколько рядов и обеспечивающие постоянство угла защемления растительной массы.

Факторами, определяющими энергоемкость процесса резания растений, являются физико-

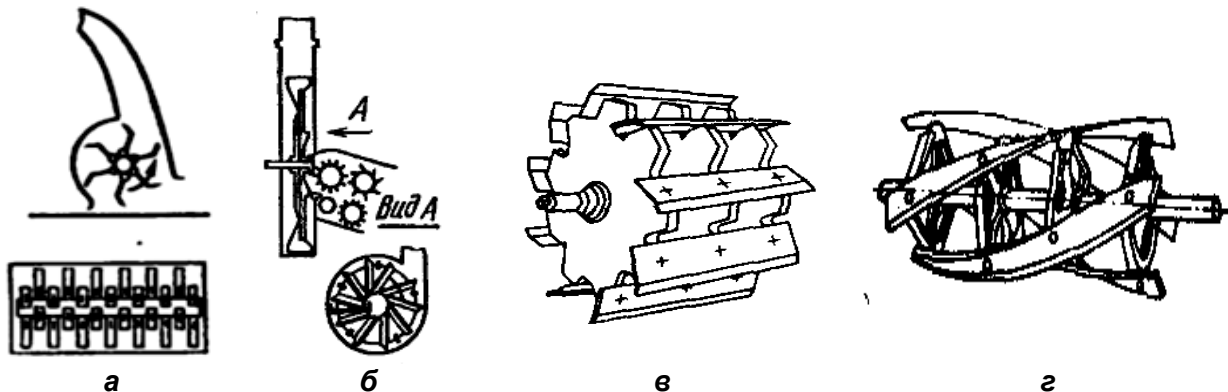


Рисунок 1. Конструктивные схемы измельчающих аппаратов: а – роторный; б – дисковый; в – плосконожевой барабанный; г – барабанный с винтообразными ножами

механические свойства культуры, режим резания и геометрические параметры режущего аппарата.

Физико-механические свойства культур, используемых для кормления животных, характеризуются размерными параметрами и прочностными свойствами растений. На работу измельчающего аппарата наибольшее влияние оказывает толщина стебля и состояние листовенной части растений.

По данным Особова В.И. [10], минимальный диаметр стеблей кукурузы на высоте 15 см от поверхности почвы (высота среза) составляет 14...15 мм, а максимальный – 35...40 мм, длина – от 140 мм до 269 мм.

По данным Резника Н.Е. [3], диаметр стеблей составляет 15...40 мм, а высота стеблей – до 4 м при удельной работе резания от 0,006 до 0,240 $H \cdot м/см^2$.

Технологический процесс измельчения растительного материала под воздействием режущей кромки лезвия состоит из предварительного сжатия до возникновения контактного разрушающего напряжения и процесса резания.

На процесс резания расходуется до 50 % от всех затрат на выполнение технологического процесса измельчения растительных остатков. Факторами, влияющими на энергоёмкость процесса резания растительного материала, являются скорость резания и геометрические параметры режущей пары [1].

Скорость резания (V) является основным фактором, оказывающим влияние на энергоёмкость процесса измельчения. Для обеспечения резания необходимо, чтобы направление точек режущей кромки ножа отклонялось на угол $\xi < \varphi$ (рис. 2) [11; 15]. В этом случае сила нормального давления N раскладывается на две составляющие: N_T и N_V . Сила N_T направлена вдоль лезвия, но она не вызывает скольжение растительной массы, так как численное значение ее меньше силы трения F , что обеспечивает равномерность нагрузки на режущую кромку и в приводе измельчающего барабана (рис. 2).

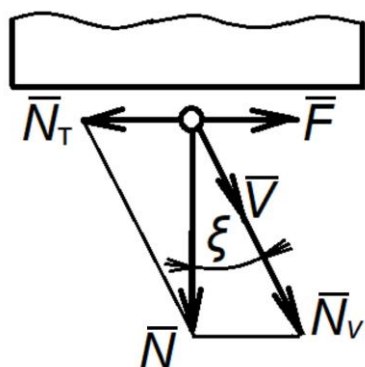


Рисунок 2. Режим резания растительной массы без скольжения вдоль лезвия

Одним из условий снижения усилия, затрачиваемого на резание растений в режущем аппарате, является резание без скольжения растительного материала вдоль лезвия.

$$0 < \xi < \varphi,$$

где ξ – угол между направлением скорости перемещения лезвия и нормалью к его поверхности, град.;
 φ – угол трения растительных материалов о лезвие, град.

На энергоёмкость процесса резания также оказывают влияние геометрические параметры ножа: угол заточки и толщина лезвия.

Угол заточки – это угол, образованный фасками лезвия у его режущей кромки, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к кромке. Установлено, что с увеличением угла заточки ножа удельная работа резания возрастает и, следовательно, энергоёмкость процесса измельчения увеличивается [16].

Угол заточки должен быть минимальным, однако в процессе резания вершина ножа приобретает закругленную поверхность (в поперечном сечении – форму дуги), поэтому при рассмотрении процесса резания необходимо исходить из представления, что лезвие будет иметь определенную толщину. В современных измельчающих аппаратах угол заточки находится в пределах 12...22 °.

При резании, когда лезвие внедряется в измельчающий материал вместе с фасками ножа, резко возрастает энергоёмкость процесса измельчения за счет увеличения толщины лезвия и возрастает усилие, необходимое для обеспечения резания растений [12].

В результате исследований, проведенных на кафедре сельскохозяйственных машин Белорусского государственного аграрного технического университета, установлено, что усилие перерезания стебля кукурузы находится в пределах от 0,53 до 2,02 H в зависимости от диаметра стебля (рис. 3).

Из анализа результатов проведенных исследований следует, что с увеличением влажности возрастает усилие, затрачиваемое на перерезание стебля.

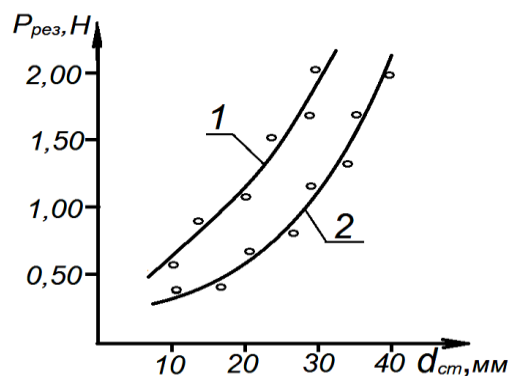


Рисунок 3. Зависимость усилия перерезания от диаметра стебля (высота резания $h_{ср} = 0,25$ м):
1 – влажность стебля $W = 82$ %; 2 – влажность стебля $W = 86$ %

Для оценки влияния на энергоёмкость процесса измельчения $\mathcal{E}_и$ (кВт·ч/т) зеленой массы оборотов n измельчающего барабана (об/мин) и подачи массы в измельчающий аппарат – q (кг/с) был проведен двухфакторный эксперимент [13, 14]. Уровни и значения факторов приведены в таблице 1.

Заключение

Таблица 1. Значение факторов в кодированном и натуральном виде

Факторы	Обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Обороты, об/мин.	<i>n</i>	50	950	1000	1050
Подача массы, кг/с	<i>q</i>	7	18,0	25	32,0
Функция отклика	\mathcal{E}_u – энергоёмкость процесса измельчения, кВт·ч/т				

Для обработки полученных опытных данных использовались программы *Statistica 8 for Windows* и *Mathcad 15*, при помощи которых были определены коэффициенты регрессии, по которым составлена математическая модель по критерию оптимизации как функций откликов от *n* и *q*.

Обработка экспериментальных данных позволила получить адекватную регрессивную модель, описывающую влияние оборотов измельчающего барабана и подачи зеленой массы на энергоёмкость процесса измельчения.

$$\mathcal{E}_u = 123,65135 - 0,57284 n + 0,00017 n^2 - 94,12000 q + 113,00610 \cdot q^2 + 0,069461 n q.$$

На рисунке 4 представлена поверхность отклика энергоёмкости процесса измельчения от оборотов измельчающего барабана и подачи зеленой массы.

Анализ поверхности отклика и ее двухмерного сечения для $\mathcal{E}_u = f(n, q_c)$ показал:

- наибольшее влияние на энергоёмкость процесса измельчения оказывает подача зеленой массы в измельчающий аппарат, о чем свидетельствует максимальный коэффициент регрессии;

- минимальная удельная энергоёмкость процесса измельчения обеспечивается $\mathcal{E}_u = 0,92$ кВт·ч/т при частоте вращения измельчающего барабана $n = 960 \dots 1015$ об/мин. и подачи зеленой массы $q = 22 \dots 30$ кг/с.

1. Измельчение кукурузы, используемой для приготовления грубых кормов, целесообразно производить при помощи аппарата, состоящего из барабана с прямыми ножами, установленными под углом $\xi < \varphi$ по отношению к противорезущему брусу, что обеспечивает равномерную загрузку режущей кромки ножей.

2. Следует использовать режим резания растительной массы без скольжения вдоль режущей кромки лезвия, так как при этом обеспечиваются минимальные затраты энергии на выполнение технологического процесса.

3. Оптимальным диапазоном частот вращения измельчающего барабана является $n = 850 \dots 1015$ об/мин., при котором удельная энергоёмкость процесса измельчения составляет 0,92 кВт·ч/т.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

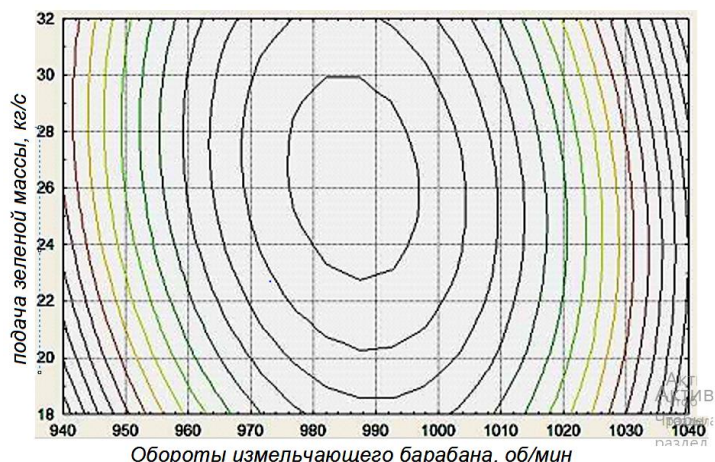
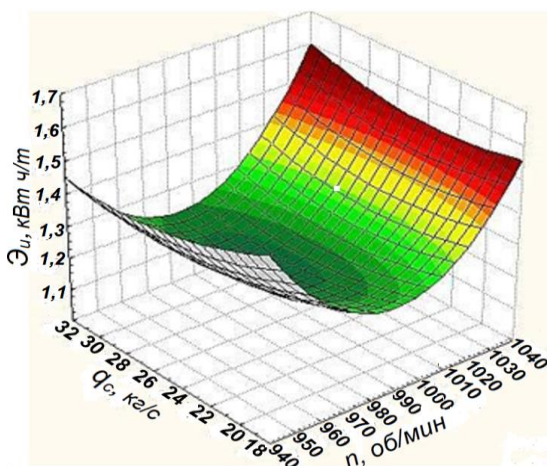
1. Радишевский, Г.А. Измельчающие аппараты кормоуборочных машин / Г.А. Радишевский, Н.П. Гурнович, А.А. Лапо // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международ. науч.-практ. конф., г. Минск, 16-17 октября 2024 г./ Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 1. – С. 72-74.

2. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин; под ред. Н.Д. Лучинского. – М.: Колос, 1965. – Т. 3. – 364 с.

3. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

4. Желиговский, В.А. Экспериментальная теория резания лезвием / В.А. Желиговский // Труды МИМЭСХ. – М., 1940. – Вып. 9. – С. 1-28.

5. Демченко, В.Н. Повышение эффективности



а **б**
Рисунок 4. а – поверхность отклика; б – двухмерное сечение

процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов / В.Н. Демченко, А.А. Вертий // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2011. – № 1-3. – С. 74-79.

6. Бестаев, Л.Е. Комплексная оценка показателей качества измельчения стебельчатых кормов / Л.Е. Бестаев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 2. – С. 49-53.

7. ОАО «Гомсельмаш»: [сайт]. – Республика Беларусь: Гомель, 2025. – URL: <https://www.gomselmash.by> (дата обращения: 28.04.2025).

8. Jhn Deere: [USA, Plnos], 2025. – URL: <https://www.deere.com> (date of access: 28.04.2025).

9. Nev Holland: [Global Web Site], 2025. – URL: <https://www.newholland.com> (date of access: 28.04.2025).

10. Особов, В.И. Механическая технология кормов / В.И. Особов. – М.: Колос, 2009. – 344 с.

11. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. – М.: Колос, 2008. – 816 с.

12. Белов, М.И. Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения / М.И. Белов // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. – № 2. – С. 279-294.

13. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

14. Хайлис, Г.А. Исследование сельскохозяйственной техники и обработки опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.

15. Маликов, Г.И. Определение углов скольжения лезвия в процессе опорного резания / Г.И. Маликов, В.Ф. Кондрашов // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. – 2012. – № 8 (129). – С. 40-42.

16. Патент РФ 131163, G 01M 7/08/ (2013). Стенд для исследования параметров процесса резания лезвием: № 2013113203/28: заявлено 25.03.2013: опубл. 10.08.2013 / Т.А. Гаврилов, В.Ф. Кондрашов, Е.А. Тихонов; заявитель КубГАУ. – 7 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 26.05.2025

Навесной оборотный плуг ПНО-3-40/55



Плуг навесной оборотный ПНО-3-40/50 предназначен для гладкой вспашки старопахотных не засоренных камнями почв с удельным сопротивлением до 0,09 МПа. Плуг агрегируется с тракторами класса 2,0 («Беларус 1221»).

Преимущества разработки:

- регулируемая ширина захвата;
- цена на 30-40% ниже зарубежных аналогов.

Производство плугов освоено на ДП «Минойтовский ремонтный завод».

В 2010 году на сельскохозяйственной выставке в г. Москве плуг удостоен золотой медали.

Основные технические данные

Тип.....навесной
 Тип корпуса.....полувинтовой
 Производительность за 1 ч сменного времени, га.....0,65...1,14
 Конструкционная ширина захвата корпуса, мм.....400/450/500/550
 Рабочая скорость движения на основных операциях, км/ч.....7...9
 Масса плуга конструкционная, кг.....не более 1150
 Конструкционная ширина захвата плуга, м.....1,20/1,35/1,50/1,65

СОВРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОГРУЖНЫХ ВОДОСНАБЖАЮЩИХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

М.А. Прищепов,

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

А.С. Козорез,

заместитель директора по коммерческим вопросам ОАО «Завод Промбурвод»

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.А. Лихтар,

инженер-электрик ОАО «Завод Промбурвод», магистрант БГАТУ

В статье приведены возникающие технические сложности при водоснабжении промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов. Проведен теоретический анализ рационального использования возможных вариантов электропривода погружных насосных агрегатов и обоснована целесообразность использования частотно-регулируемого асинхронного и синхронного электропривода. Приведено описание выпускаемых ОАО «Завод Промбурвод» насосных агрегатов с частотно-регулируемым синхронным электроприводом. Представлена принципиальная электрическая схема частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата с асинхронным двигателем или синхронным двигателем с постоянными магнитами, обеспечивающими высокую энергоэффективность электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, синхронный электропривод, насосный агрегат, механические характеристики, потери мощности, законы регулирования.

The article presents technical difficulties that arise in the water supply of industrial, agricultural and municipal facilities. As a result, the goal is to analyze the rational use of possible options for electric drives for submersible pumping units. The theoretical analysis showed the feasibility of using a frequency-controlled asynchronous and synchronous electric drive. The article further describes the pumping units with a frequency-controlled synchronous electric drive manufactured by PC Promburvod Plant and the basic electrical circuit of a frequency-controlled electric drive of a pumping unit with an asynchronous motor.

Key words: asynchronous motor, synchronous electric drive, pump unit, mechanical characteristics, power losses, control laws.

Введение

Водопотребление в промышленном, сельскохозяйственном и коммунально-бытовом секторе непрерывно изменяется во времени и в широком диапазоне.

Характер изменения водопотребления определяется случайно-вероятностными законами. В итоге эти изменения требуют непрерывного регулирования режима работы насосной установки.

Процесс регулирования осложняется несоответствием рабочих характеристик центробежных насосов и трубопроводов. Для того чтобы увеличить расход воды по трубопроводу, необходимо увеличить и напор на насосной станции, а рабочие характеристики центробежных насосов таковы, что при увеличении подачи воды напор, развиваемый насосом, падает. В то же время при уменьшении подачи воды напор насоса также следовало бы уменьшить, а он, наоборот, увеличивается. Поэтому в периоды уменьшенного водопотребления системы водоснабжения

работают с избыточным напором, который увеличивает утечки и непроизводительные расходы воды, а также при этом нерационально расходуется потребляемая насосным агрегатом электроэнергия, затрачиваемая на создание избыточного напора.

Несоответствие в режимах работы насосов и трубопроводов устраняют использованием накопительных емкостей (водонапорных башен, воздушно-водяных гидроаккумуляторов), дросселирующих устройств и/или регулированием скорости вращения насосных агрегатов параметрическими или частотными методами [1].

При уменьшении скорости вращения насоса уменьшается его подача воды и развиваемый напор, при увеличении скорости вращения подача и напор воды увеличиваются одновременно, что позволяет исключить вышеуказанный недостаток.

Регулированием скорости вращения насоса его рабочие параметры приводятся в соответствие с режи-

мом работы системы водоснабжения. Чтобы изменить скорость вращения насоса, необходимо использование регулируемого электропривода (ЭП). Значение скорости вращения насоса, с которой он должен работать в конкретный момент времени, определяется системой автоматического управления насосной установки.

Требуемое значение скорости вращения определяется многими факторами, к которым относятся расход жидкости и потери напора в системе водоснабжения, ее уровень в резервуарах, значения статического и динамического противодавления, количество параллельно и/или последовательно работающих насосов и насосных установок, подающих жидкость в систему водоснабжения и т.д.

Все это в конечном итоге снижает энергозатраты, но усложняет систему водоснабжения, так как наряду с механическими и гидравлическими устройствами, появилась достаточно сложная электромеханическая система – регулируемый ЭП насоса. Кроме того, ЭП насосных установок требует устройства защиты от возможных аварийных режимов.

Цель данной работы – провести анализ рационального использования возможных вариантов ЭП погружных насосных агрегатов систем водоснабжения.

Основная часть

Сравнение ЭП при вентиляторной нагрузке, к которой относятся насосы, по возможному диапазону регулирования и потерям в асинхронных электродвигателях (АД) проводилось авторами в работах [2, 3].

Анализ выражений, полученных в работе [2] при параметрическом регулировании скорости, показывает, что диапазон регулирования скорости будет зависеть от вида механической характеристики насоса. Чем более выражена зависимость момента нагрузки от скорости, тем возможен более широкий диапазон регулирования. Однако необходимо учитывать, что при росте нагрузки и приближении указанной зависимости к линейному закону, который происходит при росте напора (противодавления) в системе водоснабжения, этот диапазон значительно уменьшается, так как коэффициент жесткости механической характеристики насоса β_c растет медленнее, чем коэффициенты жесткости механической характеристики электродвигателя β_d . Следовательно, критерий статической устойчивости работы агрегата $\beta_d - \beta_c < 0$ перестанет выполняться при большей скорости, что говорит об уменьшении диапазона регулирования скорости. При этом необходимо учитывать, что работа ЭП в широком диапазоне скоростей, т.е. с большим скольжением, вызывает значительные потери в роторе АД (рис. 1). Потери в обмотке ротора при номинальной скорости ω_n , соответствующей номинальному напряжению питания обмоток статора U_{1n} , будет выражаться площадью прямоугольника $\omega_0 - \omega_n - \text{т.1} - a$, а потери в обмотке ротора при скорости ω_{y3} , соответствующей пониженному напряжению U_1 , – площадью прямоугольника $\omega_0 - \omega_{y3} - \text{т.3} - b$. Из

рисунка 1 очевидно, что они значительно выросли.

Полные же электромагнитные потери в АД будут определяться из следующего выражения:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{м1} + \Delta P_{м2} + \Delta P_{с1}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{м1}$ – потери в меди статора, Вт;

$\Delta P_{м2}$ – потери в меди ротора, Вт;

$\Delta P_{с1}$ – потери в стали статора, Вт.

При работе АД на естественной характеристике согласно [4, 5], эти потери определяются выражениями:

$$\Delta P_{м1} = \left(\frac{I_{\mu n}}{I_{1n}} + \left(1 - \frac{I_{\mu n}}{I_{1n}} \right) \mu_c^2 \right) \Delta P_{м1n}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{м2} = \mu_c^2 \Delta P_{м2n}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{с1} = [B + (1 - B) \mu_c^2] \Delta P_{с1n}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{м1n} = 3 I_{1n}^2 r_1$ – номинальные потери в меди статора, Вт;

I_{1n} – номинальный ток обмотки статора, А;

r_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$\Delta P_{м2n} = 3 (I'_{2n})^2 r'_2$ – номинальные потери в обмотке ротора, Вт;

I'_{2n} – приведенный номинальный ток обмотки ротора, А;

r'_2 – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$$\Delta P_{с1n} = \Delta P_n - \left(\Delta P_{м1n} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_n + 10^{-2} \frac{P_n s_n}{1 - s_n} \right) \quad \text{– номинальные потери в стали статора, Вт;}$$

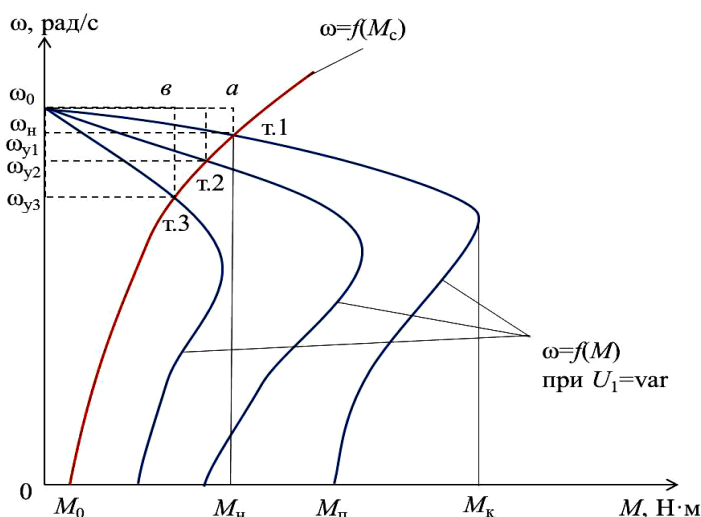


Рисунок 1. Естественная и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различных напряжениях обмоток статора U_1 и механическая характеристика погружного насоса $\omega=f(M_c)$: M_k, M_p, M_n – соответственно, моменты – критический, пусковой и номинальный АД, Н*м; M_0 – момент трогания насоса, Н*м.

s_n – номинальное скольжение АД, о.е.;
 P_n – номинальная мощность АД, Вт;

$$\Delta P_n = \frac{P_n(1 - \eta_n)}{\eta_n} \text{ – суммарные номинальные}$$

потери в АД, Вт;

η_n – номинальный КПД АД, о.е.;

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_n} \text{ – относительное значение момента}$$

статической нагрузки M_c по отношению к номинальному моменту M_n АД, о.е.;

B – конструктивный коэффициент, зависящий от серии АД, о.е. ($B=0,96-0,98$ – для серии АД 4А);

$I_{\mu n}$ – намагничивающий ток АД в номинальном режиме, А.

При работе АД на искусственных механических характеристиках, полученных за счет снижения напряжения питания обмотки статора U_1 , составляющие полных электромагнитных потерь в АД согласно [4, 5], определяются по выражениям:

$$\Delta P_{m1} = 1,1\mu_c^2 \left(\frac{I_0 s_n}{I_{1n} s} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1n}} \right) \frac{s_n}{s} \right) \Delta P_{m1n}; \quad (5)$$

$$\Delta P_{m2} = 1,1\mu_c^2 \left(\frac{s}{s_n} \right) \Delta P_{m2n}; \quad (6)$$

$$\Delta P_{c1} = \mu_c^2 \left[B \frac{s_n}{s} + (1 - B) \frac{s}{s_n} \right] \Delta P_{c1n}, \quad (7)$$

где $I_0 = i \cdot I_{\mu n}$ – намагничивающий ток, при значении питающего напряжения U_1 , А;

i – относительный намагничивающий ток (о.е.), который для используемых электротехнических сталей согласно [2; 5, 6], определяется из выражения:

$$i = (-0,988 + \sqrt{0,988^2 - 4 \cdot (-0,229)(0,242 - \Phi)}) / 2 \cdot (-0,229),$$

где $\Phi = U_1 / U_{1n}$ – относительное значение магнитного потока, о.е.

Анализ выражений (2)...(7) показывает, что при работе АД на искусственных механических характеристиках при пониженном напряжении питания обмоток статора U_1 увеличиваются потери в обмотке ротора ΔP_{m2} за счет увеличения отношения скольжений s/s_n , но уменьшаются потери в меди статора ΔP_{m1} и в стали статора ΔP_{c1} за счет уменьшения отношения скольжений s_n/s . При этом их суммарное соотношение таково, что общие электромагнитные потери $\Delta P_{эм}$ при работе на искус-

ственных характеристиках оказываются в 1,5-2 раза меньше, чем при работе на естественной характеристике в связи с тем, что статический момент насоса на искусственных характеристиках значительно меньше номинального.

При частотном регулировании скорости АД для насосного агрегата обеспечивается широкий диапазон скорости, при этом с уменьшением частоты f_1 напряжения питания обмоток статора АД U_1 уменьшается, соответственно, и относительная частота α , а также потери в обмотке ротора, которые эквивалентны площадям заштрихованных прямоугольников одной вершиной касающихся точек пересечения механических характеристик АД и насоса при соответствующих установившихся скоростях $\omega_{yn} - \omega_{y3}$ (рис. 2).

Для полной оценки энергоэффективности частотного регулирования скорости АД насосных агрегатов необходимо проанализировать суммарную мощность потерь ΔP в рассматриваемом ЭП, состоящую из постоянных $\Delta P_{пост}$ и переменных $\Delta P_{пер}$ потерь [7, 8]:

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер}. \quad (8)$$

Постоянные потери мощности в АД включают потери в стали статора $\Delta P_{ст1}$, потери в стали ротора $\Delta P_{ст2}$, потери в обмотке статора от протекания намагничивающего тока ΔP_{μ} и механические потери $\Delta P_{мех}$:

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{ст1} + \Delta P_{ст2} + \Delta P_{\mu} + \Delta P_{мех}. \quad (9)$$

Или в развернутом виде постоянные потери мощности можно записать следующим образом:

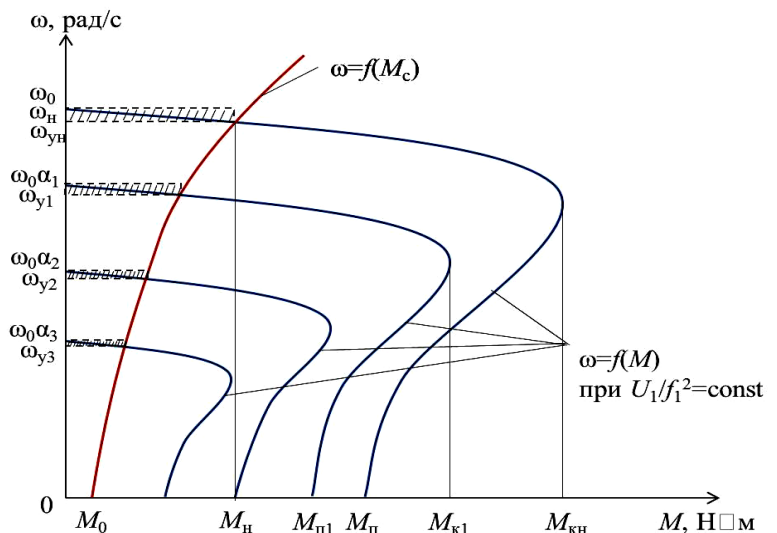


Рисунок 2. Естественная и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различной частоте напряжения его обмоток статора f_1 для закона регулирования $U_1/f_1^2=const$ при $1 > \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > 0$ и механическая характеристика погружного насоса $\omega=f(Mc)$: $M_{кн}$, M_n , M_n – соответственно, момент критический номинальный, пусковой, номинальный на естественной характеристике АД, Н•м; $M_{к1}$, $M_{п1}$ – момент критический и пусковой на искусственной характеристике АД, Н•м; M_0 – момент трогания насоса, Н•м

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пост}} = & \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m + \\ & + \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m s^m + \Delta P_{\text{мн}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + \\ & + \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \alpha^m (1 + s^m) + \\ & + \Delta P_{\text{мн}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{мехн}} \alpha^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta P_{\text{ст1н}}$ – потери в стали статора при номинальном режиме работы АД, Вт;

$\Delta P_{\text{мн}}$ – потери в обмотке статора от протекания намагничивающего тока в номинальном режиме, Вт;

Φ , $\Phi_{\text{н}}$ – текущее и номинальное значение магнитного потока, Вб;

m – показатель степени, принимающий значения $m = 1,3-1,5$ в зависимости от сорта электротехнической стали;

$f_{1\text{н}}$ – номинальная частота напряжения питания обмоток статора АД, Гц.

Суммарные переменные потери АД можно определить используя следующее выражение [8]:

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пер2}} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right), \quad (11)$$

где $\Delta P_{\text{пер2}}$ – переменные потери в роторе АД, Вт. Так как

$$\Delta P_{\text{пер2}} = M \omega_0 \alpha s, \quad (12)$$

то

$$\Delta P_{\text{пер}} = M \omega_0 \alpha s \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right). \quad (13)$$

Учитывая, что магнитный поток АД при частотном регулировании скорости в зависимости от используемого скалярного закона регулирования или

$$\Phi = \frac{E_1}{Kf_1} \approx \frac{U_1}{Kf_1}, \quad (14)$$

или

$$\Phi = \frac{E_1}{Kf_1^2} \approx \frac{U_1}{Kf_1^2}, \quad (15)$$

где E_1 – ЭДС обмоток статора АД, В;
 K – конструктивный коэффициент, о.е.

то из анализа выражения (10) очевидно, что при постоянном магнитном потоке возбуждения АД, который обеспечивается законом регулирования скорости, не будет влиять на изменение постоянных потерь в процессе регулирования, но для закона регулирования по формуле (14) они будут выше, чем для закона, используемого при регулировании насосных агрегатов по формуле (15).

Двухзонное частотное регулирование скорости изменением (уменьшением) магнитного потока возбуждения для расширения диапазона регулирования в насосных агрегатах не используется из-за возможного возникновения явления кавитации, поэтому на практике, как правило, используется одна зона регулирования.

Для вентиляторной нагрузки при частотном регулировании скорости АД, скольжение его ротора s практически не изменяется, следовательно, для упрощения анализа потерь в расчетах можно использовать $s = s_{\text{н}}$.

Дальнейший анализ выражений (10) и (13) показывает, что на постоянные и переменные потери одновременно влияет относительная частота напряжения питания обмоток статора α . С ростом α они растут, с уменьшением – убывают. Кроме того, на переменные потери непосредственное влияние оказывает момент нагрузки M .

При использовании в насосном агрегате частотно-регулируемого ЭП с синхронным двигателем, ротор которого имеет постоянные магниты (СДПМ), из вышеприведенных потерь исключаются еще и потери в стали ротора $\Delta P_{\text{ст2}}$, которые пропорциональны аналогичным потерям в статоре $\Delta P_{\text{ст1}}$ и зависят от скольжения ротора АД s :

$$\Delta P_{\text{ст2}} = \Delta P_{\text{ст1}} \cdot s^m. \quad (16)$$

Так как $s = 0$, то и $\Delta P_{\text{ст2}} = 0$.

Применение в водоснабжении частотно-регулируемых синхронных ЭП с СДПМ позволяет значительно повысить энергоэффективность насосных агрегатов, уменьшить объемы водонапорных башен и воздушно-водяных гидроаккумуляторов, но требует применения сложных преобразователей частоты.

Одним из крупнейших производителей погружных водоснабжающих насосных установок в Беларуси является ОАО «Завод Промбурвод» (ежегодный выпуск погружных насосных агрегатов превышает 28 тыс. единиц), который с 2007 года входит в состав холдинга Российской Федерации Группа ГМС. Группа ГМС, в свою очередь, является одним из крупнейших производителей в России и СНГ насосного и компрессорного оборудования для нефтегазового комплекса, энергетики, жилищно-коммунального и водного хозяйства.

Благодаря совместному сотрудничеству было налажено производство насосных агрегатов консольного типа марки К и КМ, дренажных насосов погружного типа ГНОМ и другого оборудования. В последние годы «Завод Промбурвод» усовершенствовал уже известные своей надежностью агрегаты ЭЦВ используя нержавеющую сталь для производства корпусов и рабочих колес насосов, что повысило их долговечность.

В связи с дефицитом импортных комплектующих и возросшей конкуренцией со стороны иностранных производителей заводом были введены в производство новые скважные агрегаты марки СПА, которые аналогичны по конструкции скважным агрегатам ЭЦВ, но изготовленные с применением электродвигателей герметичного исполнения собственно-

го или импортного производства. При этом электродвигатели заводского производства не уступают импортным по качеству.

С 2018 года на заводе изготавливаются СПДМ для погружных скважных насосов трех типоразмеров мощностью от 4 до 37 кВт, которые позволяют обеспечивать подачу воды в широком диапазоне от 6 до 120 м³ и напор от 60 до 275 м при КПД η синхронного электродвигателя (СД) от 85 до 93% (рис. 3) [9].

Общий вид, конструкция статора и ротора СД герметичного исполнения, в ротор которого встроены (инкорпорированы) постоянные магниты, представлены на рисунке 4.

Ротор – вращающаяся часть электродвигателя, состоящая из сердечника, набранного из той же электротехнической стали, что и статор, в который во внутренние пазы инкорпорированы постоянные магниты. В качестве постоянных магнитов используются неодимовые магниты с высокой коэрцитивной силой по индукции, покрытые сплавом никель-медь-никель. При этом магнитное поле ротора, созданное постоянными магнитами, взаимодействуя с синхронным вращающимся магнитным полем статора, создает вращающий момент, заставляя ротор вращаться с такой же скоростью, что и вращающееся магнитное поле статора.

В связи с этим СД не может запуститься при прямом пуске, т.е. при прямом подключении обмотки статора к трехфазной сети 50 Гц. Для работы такого СД обязательно требуется система управления с частотным преобразователем, обеспечивающая плавный подъем частоты и амплитуды напряжения питания обмоток статора от нуля до максимально допустимой.

В СД с постоянными магнитами отсутствуют потери, как в меди, так и в стали ротора, которые составляют порядка 5-8 % от общих потерь, т.е. СД обладают более

высоким КПД по сравнению с АД. Основные технические характеристики СД, выпускаемых на ОАО «Завод Промбурвод», представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики синхронных электродвигателей

Мощность номинальная, кВт	Осевая нагрузка, кН	In, А	КПД, %	cos ϕ	Масса, кг	Длина, мм
4	15,5	8	88	0,92	41	655
5,5		10	89			
7,5		13	89,5			
9,3		18	91,5			
11	15,5	20	92	0,93	56	810
13		23	92,5			
15		26	92,5			
18,5		32	92,5			
22	27,5	39	93	0,94	72	970
26		46	92,5			
30		54	91,5			
37		72	90			

Во всех приведенных СДПМ:

- напряжение и частота питающей сети: 400 В (-10 %; +6 %); 50 Гц (± 6);
- максимальная частота питания обмоток статора синхронного двигателя 100 Гц, частота вращения ротора при этом 3000 об/мин.

СДПМ водонаполнен, выполнен герметичным (диаметр 144 мм) с узлом дыхания, изготовлен из нержавеющей материалов. Электродвигатель имеет IP68 степень защиты, при температуре перекачиваемой среды 30°C, со скоростью движения охлаждающей жидкости не менее 0,2 м/с. Двигатель допускает 20 пусков в час. Соединение фланца и хвостовика электродвигателя соответствует стандарту NEMA. Погружной СД может быть как вертикальной, так и горизонтальной установки.

Для управления и комплексной защиты погружных насосных агрегатов изготовитель, ОАО «Завод Промбурвод» рекомендует использовать микропроцессорное устройство МКЗ, выпускаемое ООО «Но-

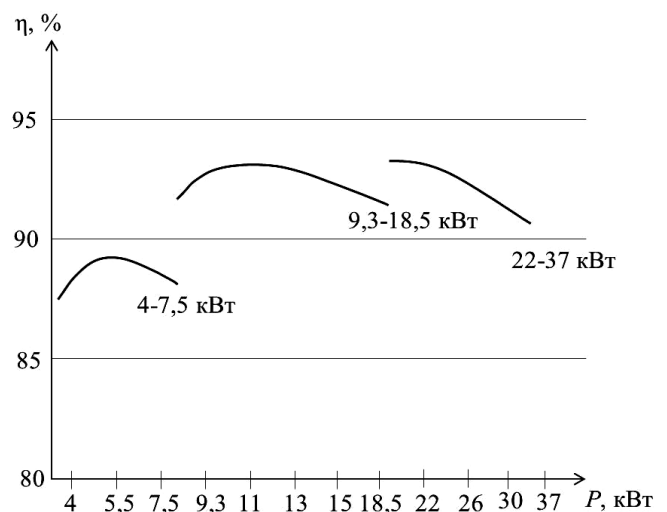
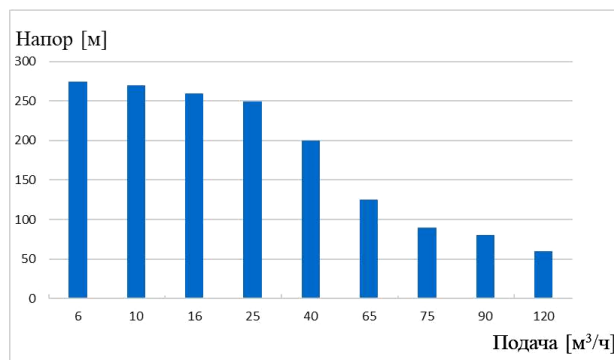


Рисунок 3. Рабочие характеристики насосных агрегатов СПА и их СДПМ



Рисунок 4. Погружной СДПМ герметичного исполнения

вая Автоматика», соответствующее климатическому исполнению УЗ.1 (эксплуатация в закрытых помещениях с естественной вентиляцией при температуре окружающего воздуха $-20...+40$ °С). Верхний предел относительной влажности воздуха – не более 80 % при 25 °С и более низких температурах, без конденсации влаги. Степень защиты МКЗ от воды и пыли: IP54 – лицевая панель; IP30 – задняя панель.

Однако использование для управления и защиты только устройства МКЗ не обеспечивает регулирование угловой скорости насосного агрегата, поэтому применяется, как правило, в башенных системах водоснабжения с большой накопительной емкостью, которая позволяет обеспечивать нечастые включения насосного агрегата. В системах водоснабжения с водонапорной башней или воздушно-водяным гидроаккумулятором относительно небольшого объема происходят, как правило, частые включения насосных агрегатов, поэтому микропроцессорные устройства МКЗ используются совместно с устройством плавного пуска или преобразователем частоты. Устройство плавного пуска облегчает пуск насосных агрегатов с АД, а преобразователь частоты обеспечивает плавный пуск и регулирование угловой скорости, как АД, так и СДПМ, что уменьшает число их включений.

На рисунке 5 представлена принципиальная электрическая схема частотно-регулируемого ЭП насосного агрегата с АД или СДПМ. В схеме используется микропроцессорное устройство МКЗ (А1), GPRS-модем (А2), обеспечивающее взаимодействие между программным обеспечением и внешним устройством по интерфейсу RS485 и/или RS232, устройство А3 для подключения датчика сухого хода и преобразователь частоты INVT35D (А4). Схема обеспечивает также подключение счетчика воды, электросчетчика, датчика температуры и датчика давления.

Заключение

1. Проведенный анализ возможных вариантов ЭП погружных насосных агрегатов систем водоснабжения

показывает, что частотно-регулируемый ЭП с СДПМ обладает наилучшей энергоэффективностью, так как в нем по сравнению с АД отсутствуют переменные потери и потери в стали ротора. Кроме этого, он позволяет уменьшить количество включений насосного агрегата в процессе обеспечения водоснабжения при малых объемах промежуточных емкостей.

2. Частотное регулирование скорости АД и СДПМ при скалярном законе $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и изменении частоты напряжения питания обмоток статора α в диапазоне от 1 до 0,1 приводит к уменьшению как постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$, так и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь электродвигателей.

3. Использование частотного регулирования скорости АД и СДПМ при скалярном законе $U_1/f_1 = \text{const}$ приводит к необоснованному завышению как постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$, так и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь электродвигателей, что в итоге способствует снижению энергоэффективности ЭП.

4. Совместное использование контроллера МКЗ и преобразователя частоты INVT350 в приведенной принципиальной схеме частотно-регулируемого ЭП насосного агрегата с АД и СДПМ обеспечивает плавный пуск и плавное регулирование угловой скорости насосного агрегата в зависимости от давления в системе водоснабжения, его защиту от сухого хода, перегрузок, учет расхода воды и электрической энергии, а также возможность обмена информацией по протоколу Modbus.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.

2. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и параметрическом

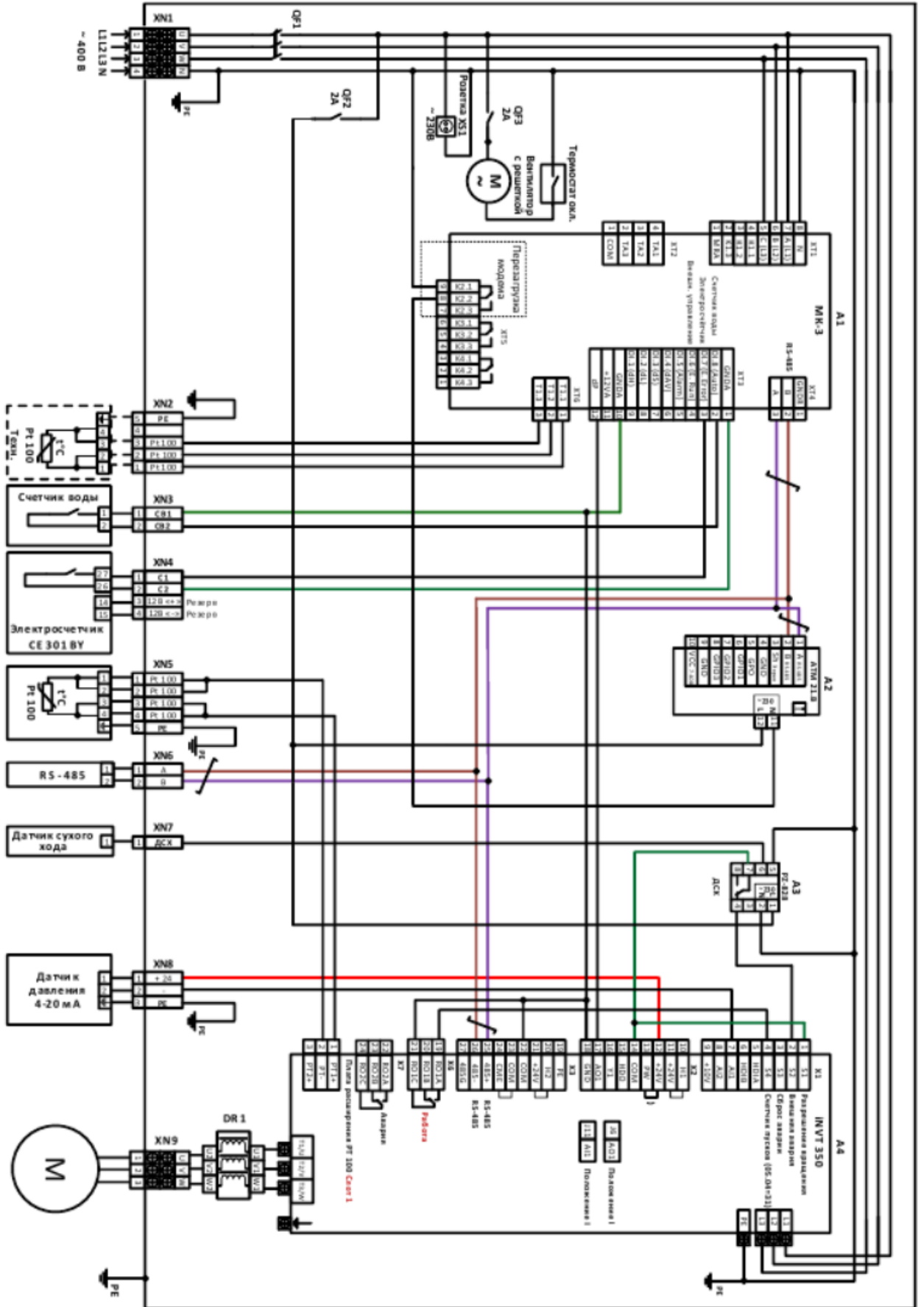


Рисунок 5. Принципиальная электрическая схема частично-регулируемого ЭГ насосного агрегата с АД или СДПМ

регулировании скорости / М.А. Прищепов // Агрорама. – 2022. – № 3 (151). – С. 29-38.

3. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и частотном регулировании скорости / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова, А.И. Зеленкевич // Агрорама. – 2022. – № 4 (152). – С. 19-23.

4. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.

5. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконяна. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

6. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным дан-

ным / В.М. Гридин // Электричество, 2012. – № 5. – С. 40-44.

7. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

8. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирыкин // Электричество, 1998. – № 4. – С. 38-42.

9. Козорез, А.С. Сквжинные электронасосные агрегаты с синхронными электродвигателями на постоянных магнитах / А.С. Козорез, В.О. Китиков, Ю.А. Башко; под общ. ред. В.О. Китикова. – Минск: Белорусская наука, 2023. – 163 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 04.06.2025

Программа балансирования рационов кормов для молочного скота

Программа балансирования рационов разработана по заданию РНТП «Развитие Минской области» и *предназначена* для создания рационов кормов для молочного скота с учетом показателей углеводного состава кормов и чистой энергии лактации.

Программа работает в интерактивном режиме. Пользователь имеет возможность выбрать корма, задав предварительно структуру рациона, и далее в процессе оптимизации отслеживать состояние баланса по всем показателям питательности.

Созданная программа предоставляет животноводам широкие возможности формирования рациона молочного скота.

Интерфейс программы позволяет конечному пользователю редактировать базу данных и пополнять ее за счет местных кормов.

Программа внедряется на молочных фермах Минской области.

Название корма	железный %	не более: КГ.
Корнеклубнеплоды, свекла кормовая	0	25
Сенаж из бобовых культур, люцерновый	0	25
Сено МТФ "Русакевичи"	0	24
Силос из злаковых культур, кукурузный, молочно-восковая спелость	0	23

Название корма	Запасы (т.)	Цена (руб/кг)	ОЗ, МДж	Сук. в-во, кг. л. прот.
Корнеклубнеплоды, свекла кормовая	71,74	1181	1,42	0,108
Сенаж из бобовых культур, люцерновый	93,89	2120	4,02	0,422
Сено МТФ "Русакевичи"	100	0	6,55	0,845
Силос из злаковых культур, кукурузный, молочно-восковая спелость	108,4	2160	2,27	0,255

УДК 537.568; 663.11

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-169-3-34-39>

АЭРОИОННАЯ АКТИВАЦИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ДРОЖЖЕЙ

М.В. Янко,

ст. преподаватель каф. практической подготовки студентов БГАТУ

*В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования, выполненные при создании аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Описана экспериментальная проверка математической модели аэроионной активации. Приведены результаты производственных испытаний технологии и оборудования аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей.*

Ключевые слова: количество электричества, аэроион, обработка, хлебопекарные дрожжи, продуктивность, производственные испытания.

*The article presents theoretical and experimental studies carried out to create aeroionic activation of *Saccharomyces cerevisiae* baker's yeast productivity. The mathematical model of aeroionic activation is described and experimentally verified. The production tests results of the technology and equipment for aeroionic activation of baker's yeast productivity are presented.*

Key words: amount of electricity, aeroion, processing, baker's yeast, productivity, production tests.

Введение

Производство хлебопекарных дрожжей в Беларуси составляет более 30 тысяч тонн в год. Дрожжи выращивают на культуральной среде, состоящей из воды, мелассы (побочного продукта свеклосахарного производства), микроэлементов и аминокислот. Проблема производства хлебопекарных дрожжей состоит в неполном использовании потенциала дрожжей и культуральной среды. Дрожжевой гриб *Saccharomyces cerevisiae* при ферментации использует до 80 % потенциала культуральной среды, при этом его штамм «200» обеспечивает выход биомассы до 95 г/л и продуктивность около 350 %, а более производительный штамм «Y-5142» – выход биомассы до 110 г/л и продуктивность около 500 %.

Исследователями ФГАОУ ВО «НИУ ИТМО» под руководством Т.В. Мелединой установлено, что на электрический заряд поверхности дрожжевой клетки влияют строение мембраны клетки, химический состав культуральной среды, время выращивания, кислотность и аэрация среды. Ученые Даляньского технологического и Шанхайского университетов Chen-Guang Liu, Chuang Xue, Yen-Han Lin, Feng-Wu Bai приводят результаты изменения концентрации ионов в культуральной среде электрическим током, пропущенным через среду с микроорганизмами. Научными сотрудниками университетов Сокён и Мён Джи На Byung-Kwan, Hwang Tae-Sik, Lee Sung-Hun, Ahn Dae-Hee, Park Doo-Hyun описано изменение биологической активности различных микроорганизмов, в том числе дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, электрическим током, пропущенным через среду с микроорганизмами.

Наши исследования показали, что повысить эффективность использования потенциала культуральной

среды и продуктивность дрожжей можно аэроионной активацией.

Аэроионная активация – обработка культуральной среды и микроорганизмов ионами воздуха для увеличения количественных и качественных показателей.

Анализ публикаций подтверждает отсутствие соответствующих теоретических и практических разработок по увеличению продуктивности дрожжей аэроионной обработкой культуральной среды с микроорганизмами [1].

Цель работы – провести теоретические, экспериментальные исследования и производственные испытания технологии и оборудования аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей.

Основная часть

Аэроионы изменяют концентрацию электрических зарядов в культуральной среде и на поверхности дрожжевой клетки, плотность поверхностного заряда клетки [2-4]. Поверхностный заряд клетки определяет потенциал ее поверхности и коэффициент диффузии питательных веществ из культуральной среды в клетку [3].

Согласно источникам [5, 6], клетка дрожжей обменивается ионами с культуральной средой путем диффузии через поры в своей мембране. Диффузия ионов культуральной среды через поры мембраны внутрь клетки зависит от потенциала поверхности клетки [7].

Математическое описание активации роста дрожжей аэроионами изложено в работе [8] и имеет следующий вид:

$$\text{Концентрация ионов в среде, моль/м}^3 \\ \text{положительных } C_{i^+}(\tau) = C_{0i^+} + \frac{Q_V(\tau)n_{i^+}}{F}; \quad (1)$$

$$\text{отрицательных } C_{i^-}(\tau) = C_{0i^-} + \frac{Q_V(\tau)n_{i^-}}{F}, \quad (2)$$

где C_{0i^+} , C_{0i^-} – начальная концентрация положительных и отрицательных ионов в среде моль/м³;
 τ – время обработки, с;

$Q_V(\tau)$ – удельное количество электричества, протекающего через среду, Кл/м³;

n_{i^+} , n_{i^-} – числа переноса положительных и отрицательных ионов;

$F = 96485$ Кл/моль – число Фарадея;

$$n_{i^+} = \frac{C_{0i^+}\lambda_{i^+}}{C_{0i^+}\lambda_{i^+} + C_{0i^-}\lambda_{i^-}}; \quad (3)$$

$$n_{i^-} = \frac{C_{0i^-}\lambda_{i^-}}{C_{0i^+}\lambda_{i^+} + C_{0i^-}\lambda_{i^-}}, \quad (4)$$

где λ_{i^+} и λ_{i^-} – подвижность положительных и отрицательных ионов, м²/(с·В).

Плотность поверхностного заряда дрожжевой клетки [8], Кл/м²:

$$\rho_{\Pi} = \alpha_b \rho_b - \alpha_a \rho_a, \quad (5)$$

где ρ_a , ρ_b – поверхностная плотность заряда кислотных и основных групп соответственно, Кл/м²;

α_a , α_b – степень диссоциации кислотных и основных групп соответственно.

Поверхностная плотность заряда групп, Кл/м²:

$$\text{кислотных } \rho_a = e\theta_a N_{Sa}; \quad (6)$$

$$\text{основных } \rho_b = e\theta_b N_{Sb}, \quad (7)$$

где e – элементарный заряд, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл;

θ_a , θ_b – доля диссоциированных кислотных и основных групп;

N_{Sa} , N_{Sb} – общее число групп на единицу площади, 1/м².

Доля диссоциированных групп:

$$\text{кислотных } \theta_a = \frac{C_a}{C_{H^+} + C_{i^-}(\tau)}; \quad (8)$$

$$\text{основных } \theta_b = \frac{C_b}{C_{OH^-} + C_{i^+}(\tau)}, \quad (9)$$

где C_{H^+} , C_{OH^-} – концентрация ионов водорода и гидроксида соответственно, моль/м³;

C_a , C_b – концентрация кислоты и щелочи в среде, моль/м³.

Общее число групп на единицу площади:

$$\text{кислотных } N_{Sa} = \frac{C_{H^+} + C_{i^-}(\tau)}{\pi R_K^2} N_A V_C; \quad (10)$$

$$\text{основных } N_{Sb} = \frac{C_{OH^-} + C_{i^+}(\tau)}{\pi R_K^2} N_A V_C, \quad (11)$$

где R_K – радиус дрожжевой клетки, м;

N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ 1/моль;

V_C – расчетный объем культуральной среды, $V_C = 1$ м³.

В соответствии с законом разбавления Оствальда степень диссоциации:

$$\alpha_a = \frac{-K_a + \sqrt{K_a^2 + 4C_a K_a}}{2C_a}, \quad (12)$$

$$\alpha_b = \frac{-K_b + \sqrt{K_b^2 + 4C_b K_b}}{2C_b}, \quad (13)$$

где K_a , K_b – константы диссоциации кислотной и основной групп, моль/м³

$$K_a = \frac{C_{H^+} C_{i^-}(\tau)}{C_a}; \quad (14)$$

$$K_b = \frac{C_{OH^-} C_{i^+}(\tau)}{C_b}. \quad (15)$$

Потенциал на входе в пору клетки [8], В:

$$\Phi_{\Pi}(\tau) = \frac{R_{\Pi} \rho_{\Pi}(\tau)}{2\varepsilon_0 \varepsilon_C} \ln \left(\frac{h + \sqrt{R_{\Pi}^2 + h^2}}{R_{\Pi}} \right), \quad (16)$$

где R_{Π} – радиус поры мембраны клетки, м;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

ε_C – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

h – толщина мембраны клетки (диффузионного слоя), м.

Диффузия ионов в клетку через пору ее мембраны, м²/с:

$$D_{\phi} = D_o \exp \left(- \frac{nF |\Phi_{\Pi}(\tau)|}{RT} \right), \quad (17)$$

где D_o – коэффициент диффузии вещества в среде, м²/с;

n – эмпирический коэффициент;

$\Phi_{\Pi}(\tau)$ – потенциал поверхности клетки, В;

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура, К.

Скорость роста массы микроорганизмов (диффузии вещества внутрь клетки) при их ферментации с начальными условиями при времени $\tau = 0$, $M = M_0$:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{M_0 \left(A + \sqrt{A^2 + 4K_C M_C} \right)}{K_C + A + \sqrt{A^2 + 4K_C M_C}}, \quad (18)$$

где M_0 – концентрация клеток в единице объема среды при $\tau = 0$, кг/м³;
 K_C – субстратная константа, кг/м³;
 M_C – концентрация вещества в среде, кг/м³;
 A – коэффициент упрощения, кг/м³:

$$A = M_C - K_C - \frac{3\alpha\mu h R_k M_0}{4XD_\phi}, \quad (19)$$

где α – коэффициент химической активности культуральной среды;
 μ – удельная скорость роста дрожжей, кг/с·м³;
 X – удельный объем клеток в среде, м³/м³.
 Прирост биомассы за время τ :

$$\Delta M = M_0 \tau \frac{A + \sqrt{A^2 + 4K_C M_C}}{K_C + A + \sqrt{A^2 + 4K_C M_C}}. \quad (20)$$

Система уравнений (1)...(20) представляет собой математическую модель аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей. Результаты расчетов по уравнениям (1)...(20) представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Математическое моделирование показывает увеличение прироста биомассы дрожжей до 15,4 кг/м³ при обработке количеством электричества 420...430 Кл/м³.

Проверка адекватности теоретических и экспериментальных исследований выполнена по средним значениям отклика прироста биомассы дрожжей при заданных значениях удельного количества электричества. Расхождение значений не превышает 5% ($\Delta = 0,75$ кг/м³) (рис. 1).

Воздействие аэроионами на хлебопекарные дрожжи (штамм «200») при количестве электричества от 420 до 450 Кл/м³ культуральной среды увеличивает в ней концентрацию кислорода на 35-37 %, свободных электронов – в 1,9-3,3 раза, формольное число (концентрацию свободного азота) – на 25-50 %, изменяет pH и Eh – на 11-12 % [10]. Все это, в конечном счете, стимулирует рост дрожжей и их качественные показатели увеличивают продуктивность на 15...20 %, концентрацию на 13...16 %, подъемную силу и коэффициент подъема теста на 48...59 % по сравнению с хлебопекарными дрожжами, выращенными без аэроионной обработки [9].

Методами статистической обработки установлены оптимальные технологические параметры аэроионной активации продуктивности дрожжей:

– удельное количество электричества – 425...455 Кл/м³;

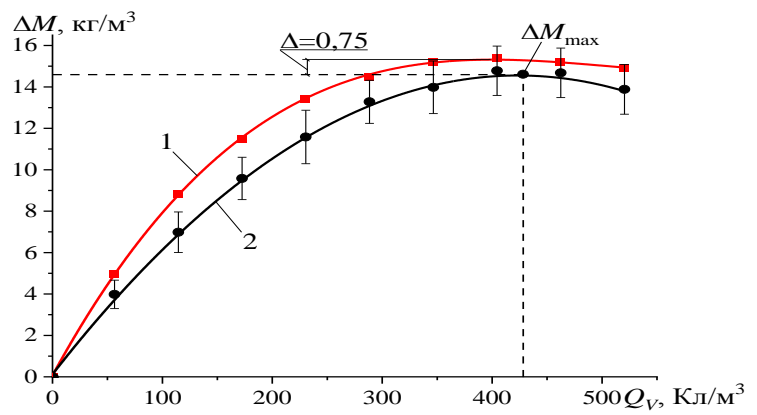


Рисунок 1. Зависимость прироста биомассы хлебопекарных дрожжей от удельного количества электричества аэроионной обработки: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Таблица 1. Результаты расчета параметров аэроионной активации дрожжей

τ , с	0	5895	12000	18105	24211	30316	3641	42526	48632	54737
Q_v , Кл/м ³	0	56	114	172	230	288	346	404	462	520
$C_i^- \cdot 10^{11}$, моль/м ³	0,009	0,536	1,08	1,63	2,18	2,72	3,27	3,81	4,36	4,91
$C_i^+ \cdot 10^{12}$, моль/м ³	0,02	0,753	1,51	2,27	3,03	3,79	4,55	5,31	6,06	6,82
$\theta_a \cdot 10^8$	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\theta_b \cdot 10^6$	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03
$N_{Sa} \cdot 10^{-22}$, 1/м ²	0,069	4,12	8,31	12,5	16,7	20,9	25,1	29,3	33,5	37,6
$N_{Sb} \cdot 10^{-21}$, 1/м ²	0,153	5,77	11,6	17,4	23,2	29,1	34,9	40,7	46,5	52,3
$K_a \cdot 10^5$, моль/м ³	0,18	10,7	21,7	32,6	43,5	54,5	65,4	76,3	87,3	98,2
$K_b \cdot 10^8$, моль/м ³	0,249	9,37	18,8	28,3	37,7	47,2	56,6	66	75,5	84,9
$\rho_a \cdot 10^5$, Кл/м ²	0,553	32,9	66,5	100	134	167	201	234	268	302
$\rho_b \cdot 10^3$, Кл/м ²	0,197	7,43	14,9	22,4	29,9	37,4	44,9	52,4	59,9	67,3
α_a	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
α_b	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ρ_p , мКл/м ²	0,192	7,10	14,3	21,4	28,6	35,7	42,9	50	57,2	64,3
ϕ_p , мВ	1,11	41,2	82,7	124	166	207	249	290	332	373
$D_\phi \cdot 10^{10}$, м ² /с	9,96	8,68	7,53	6,53	5,66	4,91	4,26	3,69	3,20	2,77
α_α	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
A	-18,6	-21,4	-24,6	-28,4	-32,8	-37,8	-43,6	-50,3	-58	-66,9
$dM \cdot 10^3/d\tau$, кг/(с·м ³)	97	84,6	73,5	63,7	55,3	48	41,6	36,1	31,3	27,2
ΔM , кг/м ³	0	4,99	8,82	11,5	13,4	14,5	15,2	15,4	15,2	14,9

- напряженность электрического поля между коронирующим и осадительным электродами – 41...44 кВ/м;
- время нахождения дрожжей в поле коронного разряда – 5,5...6,0 с;
- цикличность обработок – 2,35...2,57 1/ч;
- продолжительность обработки – 11,5...12,5 ч [9].

По результатам экспериментальных исследований сформулированы технологические требования на разработку аэроионного активатора, определено его место в технологическом процессе выращивания дрожжей, состав оборудования (рис. 2).

Аэроионный активатор продуктивности дрожжей должен работать совместно с ферментером, в котором выращивают дрожжи (рис. 2). Принципиальная конструктивная схема одного из вариантов активатора представлена на рисунке 3. Данная схема защищена патентом Республики Беларусь на изобретение BY23635C1 [11].

Культуральную среду вместе с дрожжами (далее среда) отбирают из ферментера 2, перекачивают насосом 10 через ионоактиватор 1 и возвращают назад в ферментер 2 (рис. 2). В аэроионный активатор среда поступает по трубопроводу 2 на решетку-распылитель 5, после которой капли среды попадают в «объем» аэроионов зарядной камеры 6, получают отрицательный заряд и возвращаются обратно в ферментер через патрубок 8 (рис. 3).

Поток воздуха насосом 13 (рис. 2) подают в зону коронного разряда вокруг коронирующего электрода 11 (рис. 3). Молекулы воздуха получают отрицательный заряд и под действием сил электрического поля и движущегося воздуха перемещаются к осадительному электроду 7 (рис. 3), встречая на своем пути капли среды и клетки дрожжей, и отдают им свой электрический заряд. Обработанная культуральная среда перетекает в ферментер 2 (рис. 2).

Воздух, подаваемый в поле коронного разряда, должен быть очищен от пыли, капель влаги, сторонних микроорганизмов. Для этого его обеззараживают и фильтруют в ультрафиолетовом дезинфекторе 12, оснащенный фильтрами необходимой степени очистки (рис. 2).

На основании технического задания разработана документация и изготовлен лабораторный образец аэроионного активатора дрожжей (рис. 4).

Заводские испытания установки на ОАО «Дрожжевой комбинат» подтвердили эффективность и перспективность разработанной технологии и оборудования, определили вопросы для дальнейшей доработки. Испытания проводили с 18.02.2025 по 20.03.2025 по методике, изложенной в ТИ ВУ 100104781.033-2021

(Технологическая инструкция по производству дрожжей хлебопекарных прессованных «СТОЛИЧНЫЕ») и ТУ ВУ 100104781.020-2011 (Дрожжи прессованные «СТОЛИЧНЫЕ» (Технические условия) и инструкции по микробиологическому и технохимическому контролю дрожжевого производства.

Обработке подвергали хлебопекарные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, штамм «У-5142», имеющий лучшие качественные показатели по сравнению с дрожжами штамма «200». Результаты испытаний приведены в таблице 2.

По результатам испытаний производственно-технологическая лаборатория ОАО «Дрожжевой комбинат» сделала заключения:

1. Дрожжи после аэроионной активации имеют следующие органолептические свойства: цвет равномерный, без пятен, с сероватым оттенком; консистенция плотная, однородная; запах – свойственный дрожжам, без запаха плесени и других посторонних запахов; вкус – свойственный дрожжам, без постороннего привкуса [ГОСТ 171-2015];

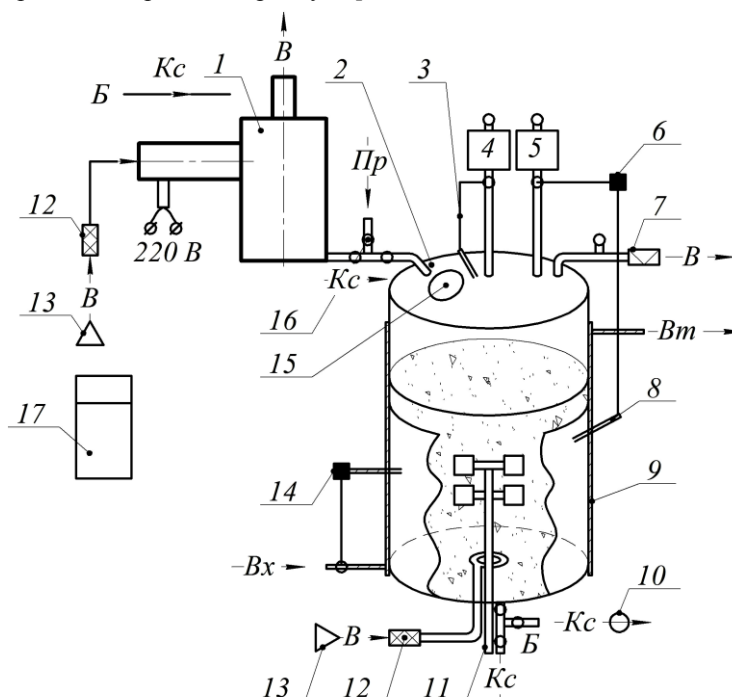


Рисунок 2. Принципиальная схема ферментера с аэроионным активатором: 1 – ионоактиватор; 2 – ферментер дрожжей; 3 – датчик пеногасителя; 4 – устройство пеногашения; 5 – устройство подачи аммиачной воды; 6 – регулятор Eh (pH); 7 – фильтр воздуха из ферментера; 8 – датчик Eh (pH); 9 – рубашка водяного охлаждения ферментера; 10 – насос подачи культуральной среды в аэроионный активатор; 11 – мешалка культуральной среды в ферментере; 12 – устройство фильтрации и дезинфекции воздуха; 13 – насосы подачи воздуха; 14 – регулятор температуры культуральной среды; 15 – смотровое окно; 16 – устройство подачи питательного раствора в ферментер; 17 – шкаф управления; В – трубопроводы подачи воздуха, Vx – вода холодная, Vt – теплая; Kc – культуральная среда; Б – устройство слива культуральной среды дрожжей; Пр – питательный раствор

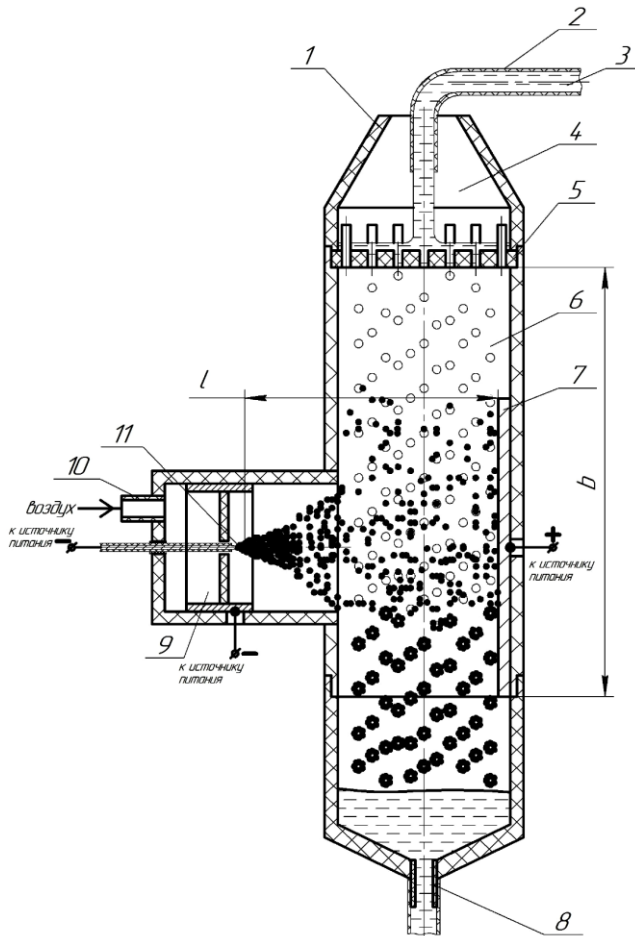


Рисунок 3. Принципиальная конструктивная схема ионоактиватора дрожжей:
 1 – корпус; 2 – трубопровод культуральной среды с дрожжами 3; 4 – оросительное устройство; 5 – решетка; 6 – камера аэроионной активации; 7 – электрод осадительный; 8 – патрубок слива; 9 – концентратор отрицательных зарядов; 10 – патрубок подачи воздуха; 11 – коронирующий электрод;
 l – расстояние между коронирующим и осадительным электродами; b – высота осадительного электрода

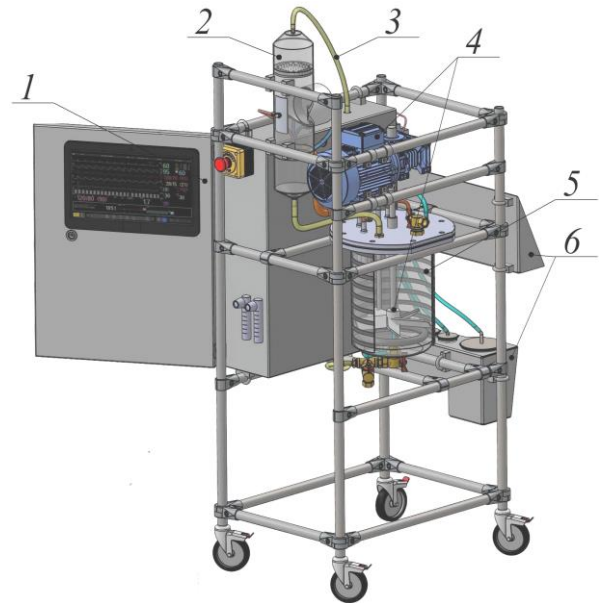


Рисунок 4. Установка аэроионного культивирования хлебопекарных дрожжей: 1 – шкаф управления; 2 – ионоактиватор; 3 – трубка для подачи обрабатываемой среды с дрожжами; 4 – мешалка с приводом; 5 – ферментер; 6 – отсек питательных растворов

2. Микробиологический контроль выращивания дрожжей при обработке аэроионами показал, что клетки более круглые и крупные, большее количество почкующихся клеток в момент времени роста по сравнению с дрожжами, культивированными в тот же день без активации. В культуральной среде не зафиксировано увеличение количества клеток посторонних дрожжевых грибов, бактерий, неправильно почкующихся клеток;

3. Образцы дрожжей штамма «У-5142», полученные после аэроионной активации, соответствуют требованиям ТУ ВУ 100104781.020-2011 и ГОСТ 171-2015 (для дрожжей высшего сорта). Обработка аэроионами увеличивает продуктивность на 7...15 %

Таблица 2. Результаты производственных испытаний

Номер и дата испытаний	Масса дрожжей, г		Продуктивность, %	Подъемная сила, мин	Кислотность, мг:		Массовая доля влаги, %
	нач.	кон.			до промывки / после промывки		
1. 18.02.2025	157,6	866,3	548,6	32	68	56	70
2. 20.02.2025	157,6	891	565,2	32	67	55	72
3. 25.02.2025	126,5	685,6	542	30,3	62	50	71,5
4. 27.02.2025	126	725,9	576,1	31	63	51	72
5. 04.03.2025	158	918,4	581,3	34	66	53	71
6. 06.03.2025	158	901,6	570,6	33	65	54	73
7. 11.03.2025	117,7	664,2	564,3	35	67	55	72,5
8. 13.03.2025	117	661,3	565,2	35	69	56	73
9. 18.03.2025	119,5	691,6	578,7	32	64	53	72
10. 20.03.2025	119,6	690,5	577,4	33	66	54	72
Средние значения после активации	135,75	769,64	566,94	32,73	65,7	53,7	71,9
Средние показатели по заводу	850 000	4 292 500	505	35	72	58	72,5

без ухудшения качественных показателей дрожжей и санитарных показателей культуральной среды.

Заключение

1. Сформулирована, теоретически обоснована и практически подтверждена научная идея аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей.

2. Впервые разработана новая технология обработки культуральных сред и микроорганизмов аэроионами (патент ВУ23635С1) [11]. Обработка хлебопекарных дрожжей штамма «200» повышает продуктивность дрожжей на 15...20 %, прирост биомассы до 14,7...15,1 кг/м³, увеличивает подъемную силу и коэффициент подъема теста на 48...59 % в лабораторных условиях [9]. Обработка на ОАО «Дрожжевой комбинат» хлебопекарных дрожжей штамма «У-5142» увеличивает продуктивность на 7...15 % без ухудшения качественных показателей дрожжей в заводских условиях.

3. Создан опытный образец активатора дрожжей, не имеющий аналогов, который прошел испытания в заводских условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Янко, М.В. Анализ способов активации продуктивности хлебопекарных дрожжей. Обзор / М.В. Янко, Е.М. Заяц // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2022. – № 2 (100) – С. 171-176.

2. Aguilar-Uscanga, B. A study of the yeast cell wall composition and structure in response to growth conditions and mode of cultivation / B. Aguilar-Uscanga, J.M. Francois // Letters in applied microbiology. – 2003. – Vol. 37. – № 3. – P. 268-274.

3. Факторы, влияющие на электрический заряд дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* / Т.В. Меледина [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2020. – № 2. – С. 73-84.

4. Vu, D.L. The Effect of Various Potentials on the Attachment of *Saccharomyces Cerevisiae* and Staphylo-

coccus Epidermidis to Carbon Paste Electrodes / D.L. Vu, M. Sys, L. Cervenka // International Journal of Electrochemical Science. – 2011. – Vol. 6. – P. 5265-5274.

5. Ризниченко, Г.Ю. Математическое моделирование биологических процессов. Модели в биофизике и экологии: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / Г.Ю. Ризниченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 181 с.

6. Мартинович, Г.Г. Окислительно-восстановительные процессы в клетках: монография / Г.Г. Мартинович, С.Н. Черенкевич. – Минск: БГУ, 2008. – С. 159.

7. Eide, D.J. Metal ion transport in eukaryotic microorganisms: insights from *Saccharomyces cerevisiae* / D.J. Eide // Advances in Microbial Physiology. – 2000. – Vol. 43. – P. 1-38.

8. Янко, М.В. Математическая модель влияния аэроионов на продуктивность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* / М.В. Янко, Е.М. Заяц // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2023. – № 3 (105) – С. 92-101.

9. Янко, М.В. Влияние аэроионной активации на продуктивность и качественные показатели дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* / М.В. Янко, А. Н. Кудинович, Е.М. Заяц // Агропанорама. – 2024. – № 3. – С. 21-27.

10. Заяц, Е.М. Влияние отрицательно заряженных аэроионов на среду выращивания *Saccharomyces cerevisiae* / Е.М. Заяц, М.В. Янко // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2022. – № 3 (101) – С. 62-68.

11. Патент ВУ 23635, МПК С12N1/18 (2006.01), С12N13/00 (2006.01). Способ культивирования хлебопекарных дрожжей : № а 20190290 : заявлено 10.11.2019 : опубл. 28.02.2022/ Заяц Е. М., Янко М.В., Чорный А. Д. ; заявитель Белорус. гос. аграрный техн. ун-т. – URL: <https://search.ncip.by/database/?page=3&target=40562> (дата обращения: 12.05.2025).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 26.05.2025

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ АГРАРНОГО БИЗНЕСА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Н.В. Киреенко,

зав. каф. инновационного развития АПК Института повышения квалификации и переподготовки кадров АПК БГАТУ, докт. экон. наук, профессор

В статье выделены направления инновационного развития мирового и отечественного бизнеса, базирующиеся на правовых, институциональных, экономических, финансовых и кадровых условиях. Обоснованы современные тренды в области инноваций и цифровизации аграрного бизнеса Республики Беларусь. Разработан комплекс действенных мероприятий по повышению инновационной активности субъектов хозяйствования с учетом современных экономических условий.

Ключевые слова: инновации, цифровизация, развитие, аграрный бизнес, субъект хозяйствования, инновационная активность, эффективность.

The article highlights the areas of innovative development of global and domestic business based on legal, institutional, economic, financial and personnel conditions. Modern trends in the field of innovation and digitalization of agricultural business in the Republic of Belarus are substantiated. A set of effective measures to increase the innovative activity of business entities, taking into account modern economic conditions, has been developed.

Key words: innovation, digitalization, development, agricultural business, business entity, innovative activity, efficiency.

Введение

Современная экономическая ситуация формирует новые условия стимулирования инновационного развития экономики Республики Беларусь, в том числе и аграрного бизнеса. При этом основное внимание уделяется внедрению новых технологий в сельскохозяйственное и пищевое производство, использование которых способствует повышению устойчивости субъектов агропромышленного производства.

В научный оборот понятие «инновация» как новая экономическая категория было введено австрийским ученым Йозефом Шумпетером, который, говоря о новых комбинациях факторов производства, трактовал инновации как любое возможное изменение, происходящее вследствие коммерческого использования новых или усовершенствования существующих решений технического, технологического, организационного характера в процессах производства, снабжения, сбыта продукции [1].

На современном этапе наибольшее распространение получили три подхода к трактовке этого понятия, каждый из которых определяет сущность, содержание, составляющие и сферу применения. Так, согласно первому направлению, инновация представляет собой предмет (результат, продукт, объект), полученный в ходе использования достижений науки и техники (продуктов научно-технической деятельности), процесс создания которого и его производственное применение следует изучать раздельно [2-4]. Это объясняется, прежде всего, тем, что часть изобретений никогда не доходит до стадии использования, а также убеждением, что одним из элементар-

ных составных частей технического прогресса являются инновации.

Согласно второй точке зрения, инновация – это процесс, включающий генерирование, принятие и внедрение новых идей, способов, продуктов, услуг, характеризующий переход системы из одного состояния в другое. В данном контексте Э. Хофмайстер считает, что под инновацией следует понимать сознательную, направленную на достижение определенной цели волю превращения изобретения в процесс или метод, или же умелое выведение изделия на рынок [5, 6].

В рамках третьего подхода инновации рассматриваются как инструмент управления бизнесом, приводящий к успеху. При этом в современных реалиях именно эффективное использование новых цифровых технологий будет определять международную конкурентоспособность, как отдельных компаний, так и целых стран, формирующих инфраструктуру и правовую среду для цифровизации. В международной практике разработан стандарт, определяющий понятие инновации как вполне определенной управленческой категории. Данный документ базируется на двух работах, известных под названиями «Руководство Фраскати» (город в Италии, где в 1963 г. была принята первая версия документа) и «Руководство Осло» (Осло, 1992 г.).

В контексте современных мировых тенденций внедрение инноваций и цифровизация аграрного бизнеса получили свое активное распространение и в Республике Беларусь. Государственная инновационная политика представляет собой комплекс организационных, экономических и правовых мер, направленных на регулирование инновационной деятельности. В настоящее время действует Государственная про-

грамма инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, целью которой является достижение нашей страной уровня инновационного развития стран – лидеров в регионе Восточной Европы на основе реализации интеллектуального потенциала белорусской нации.

Исходя из этого, цель статьи состоит в обосновании современных трендов и выявлении практических направлений объективного и субъективного характера, оказывающих влияние на инновационное развитие аграрного бизнеса Республики Беларусь с учетом современных экономических условий.

Материалы и методы

Научное исследование базировалось на данных Национального статистического комитета Республики Беларусь, Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, изучении и обобщении методических подходов отечественных и зарубежных авторов, национальной нормативной и правовой базы в сфере развития аграрного бизнеса. Используются методы системного и сравнительного анализа.

Основная часть

Инновационный путь развития мирового аграрного бизнеса имеет три взаимосвязанных и взаимообусловленных направления, включающих [2]:

1) инвестиции в человеческий капитал, что возможно лишь при приоритетном развитии образования, фундаментальных и прикладных научно-исследовательских организаций, создании банка данных по инновациям, а также информационно-консультационной системы, обслуживающей производителей АПК;

2) инвестиции в развитие биологических ресурсов на основе разработок и освоения нововведений, обеспечивающих повышение плодородия почвы, рост урожайности сельскохозяйственных культур и про-

дуктивности сельскохозяйственных животных;

3) инвестиции в разработку технологий, обеспечивающие совершенствование технико-технологического потенциала сельского хозяйства на основе применения энерго- и ресурсосберегающей техники, наукоемких технологий, позволяющих повысить производительность труда и эффективность сельскохозяйственной деятельности.

Установлено, что эффективность функционирования отечественного аграрного бизнеса, обеспечивающего национальную продовольственную безопасность, в значительной степени предопределяется повышением инновационной активности. Анализ показал, что действующая структура производства представлена производителями сельскохозяйственной продукции (сельскохозяйственные организации, хозяйства населения, крестьянские (фермерские) хозяйства), а также организациями пищевой промышленности (рис. 1). Это позволяет гарантировать физическую доступность за счет производства продукции собственного производства, что практически исключает голод и недоедание. При этом уровень питания не ограничен ресурсами собственного производства, хотя рацион белорусов и остается несбалансированным по качественным параметрам.

Современные тренды инновационного развития отечественного аграрного бизнеса базируются на правовых, институциональных, экономических, финансовых и кадровых условиях. Так, основным документом, регламентирующим деятельность субъектов хозяйствования в сфере внедрения инноваций, является Закон Республики Беларусь от 10 июля 2012 г. № 425-3 «О государственной инновационной политике и инновационной деятельности». В целом государственная инновационная политика формируется в соответствии с приоритетными направлениями научной, научно-технической и инновационной деятельности, которые определяются на каждые пять лет. Указом Президента Республики Беларусь от 1 апреля



Рисунок 1. Структура продукции сельского хозяйства по категориям хозяйств Республики Беларусь, 2019-2023 гг. (в текущих ценах; в процентах к итогу)

2025 г. № 135 утверждены новые приоритетные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 годы. В отношении аграрного бизнеса можно выделить следующие приоритетные направления:

- 1) цифровые технологии и искусственный интеллект;
- 2) инновационные технологии в агропромышленном комплексе и пищевой промышленности.

С целью обеспечения внедрения информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий в отрасли национальной экономики и сферы жизнедеятельности общества в Республике Беларусь принят комплекс нормативных правовых документов, основными из которых являются: Декрет Президента Республики Беларусь от 21 декабря 2017 г. № 8 «О развитии цифровой экономики»; Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы; Программа деятельности Правительства Республики Беларусь до 2025 года; Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы; Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2035 года. В рамках мероприятий, направленных на цифровую трансформацию производственных процессов и управления ими, предусматривается выполнение реинжиниринга и оптимизации бизнес-процессов отечественных организаций, в том числе в аграрных, с использованием передовых производственных технологий, соответствующих концепции «Индустрия 4.0», включая:

- создание «цифровых двойников» технологических и бизнес-процессов, выпускаемой (планируемой к производству) продукции;
- внедрение платформенных решений для управления производством, активами организаций, обеспечения накопления и обработки данных в режиме реального времени, использования систем поддержки принятия решений, инструментов предсказательной и отчетной аналитики;
- развитие современных инструментов работы с заказчиками и поставщиками, каналов товароподвижения и взаимодействия с клиентами.

Наряду с этим, предусмотрен комплекс мер поддержки прямого и косвенного характера (прямое субси-

дирование, льготы в сфере налогообложения, консультационная и информационная поддержка), осуществляется финансирование мероприятий в рамках государственных программ. Так, Государственной программой «Аграрный бизнес» на 2021–2025 годы определены мероприятия, которые способствуют цифровизации отраслей и подотраслей АПК, направлены на повышение устойчивости функционирования и внедрение инновационных технологий и бизнес-моделей. Документ соответствует приоритетам Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы и предусматривает финансовое обеспечение в размере 291 536,7 млн руб. (таблица).

В стране действует система инфраструктуры поддержки малого и среднего предпринимательства Республики Беларусь, представляющая собой 85 центров поддержки предпринимательства и 18 инкубаторов малого предпринимательства (рис. 2-3).

В малых и средних городских поселениях и сельской местности осуществляются деятельность 38 субъектов инфраструктуры (35 центров поддержки предпринимательства и 3 инкубатора) или 36,9 % от общего количества таких субъектов. В 2024 г. субъектами инфраструктуры оказано 81,2 тысячи услуг, организовано и проведено 2 681 мероприятие (курсы, семинары и т.д.).

В то же время отмечается низкая активность частного капитала в финансировании инновационных проектов субъектов аграрного бизнеса, недостаточное развитие рынка ценных бумаг и невысокая активность его субъектов, слабая система коммуникаций науки и бизнеса в части разработки и внедрения инноваций. Наряду с этим, в последние годы имеет место снижение притока иностранных инвестиций в экономику, а также сокращение возможностей бюджета, инновационных фондов и частного капитала по финансированию инноваций вследствие проявления экономического кризиса, вызванного пандемией и экономическими санкциями в отношении нашей страны [2; 7].

Изучение зарубежного опыта и отечественной методической практики показало, что на данном этапе могут быть реализованы мероприятия по созданию условий для развития системы венчурного финансирования, в том числе с возможностью привлечения частного капитала. Учитывая действующую законо-

Таблица. Финансовое обеспечение Государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы

Источник финансирования	Объем финансирования, млн руб.	Доля в общем объеме финансирования, %
Средства республиканского бюджета	5 096,9	1,75
Средства местных бюджетов	6 196,0	2,13
Кредиты банков	36 716,4	12,58
Кредиты открытого акционерного общества «Банк развития Республики Беларусь»	956,2	0,33
Собственные средства субъектов	242 546,3	83,20
Средства внебюджетного централизованного инвестиционного фонда Министерства энергетики	25,0	0,01
ИТОГО	291 536,7	100,00

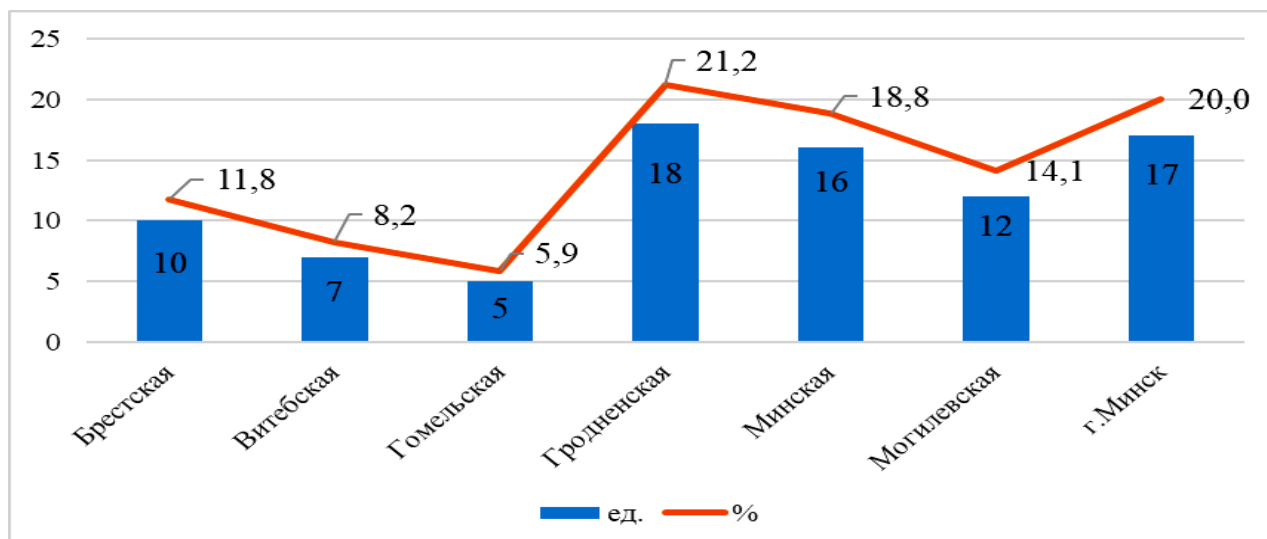


Рисунок 2. География размещения центров поддержки предпринимательства в Республике Беларусь, 2024 г.

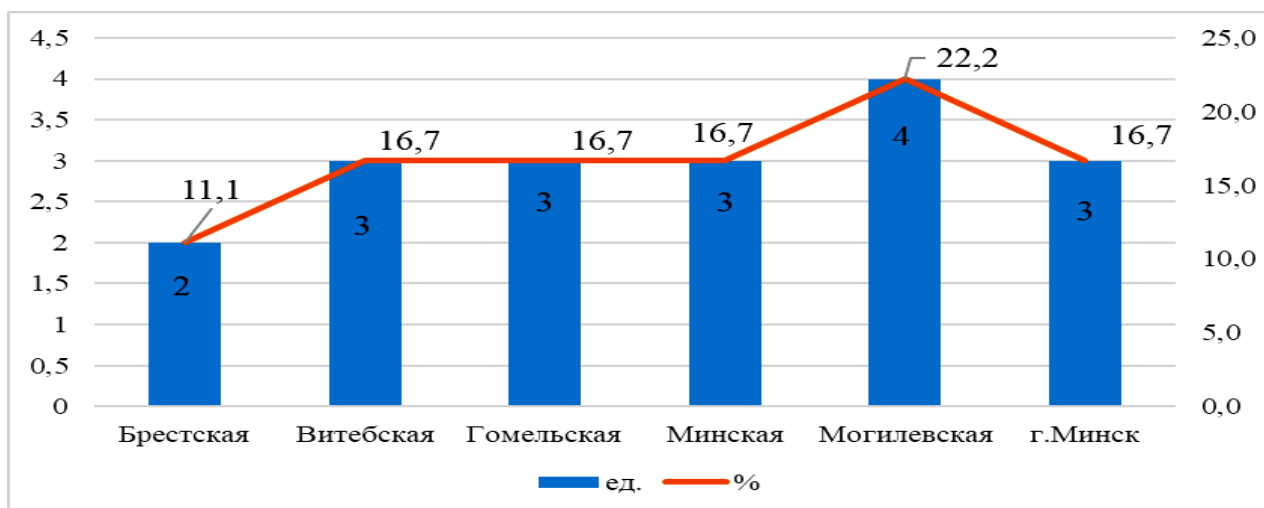


Рисунок 3. География размещения инкубаторов в Республике Беларусь, 2024 г.

дательную базу, процесс формирования венчурных фондов в аграрной сфере Республики Беларусь должен включать в себя разработку:

- 1) концепции, в которой следует определить основные направления развития финансирования субъектов хозяйствования в аграрном бизнесе;
- 2) правил отбора, функций, прав и обязанностей управляющей компании венчурного финансирования;
- 3) мероприятий по информационному продвижению возможностей венчурного финансирования субъектов аграрного бизнеса.

Ключевым направлением инновационного развития аграрного бизнеса Республики Беларусь должно стать решение проблем кадрового обеспечения. Инновационная модель развития системы дополнительного образования взрослых должна базироваться на компетентностном подходе, акцентирующем внимание на результате образования, в качестве которого рассматривается способность человека действовать в

различных проблемных ситуациях [8, 9].

Учитывая мировые тренды, для Республики Беларусь важной становится стратегия развития, ориентированная на борьбу за внешние рынки и стимулирование внутреннего потребления. Это обусловлено следующим:

во-первых, ключевым средне- и долгосрочным приоритетом определена многовекторность внешне-экономического курса страны;

во-вторых, нарушение глобальных рыночных связей и беспрецедентные экономические санкции в отношении республики требуют поиска новых направлений диверсификации экспорта с ориентацией на национальные бренды и высокотехнологичный экспорт;

в-третьих, сохранение традиционных внешних рынков и выход на новые сегменты стимулирует производителей и экспортеров к расширению ассортимента за счет инновационной и высокотехнологич-

ной продукции с высокой добавленной стоимостью.

Согласно Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года и проекту данного документа на период до 2040 года, в части диверсификации внешних рынков предстоит обеспечить сбалансированное развитие внешнеэкономической деятельности за счет недопущения сокращения присутствия национальной экспортной продукции на традиционных рынках сбыта, а также сохранения многовекторности внешней торговли. Выбранная стратегия развития аграрного бизнеса Республики Беларусь предусматривает увеличение объема экспортных поставок товаров и услуг, расширение географической и товарной структуры, улучшение экспортной корзины, увеличение доли инновационных и высокотехнологичных товаров.

Статья подготовлена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору № Г25У-003 от 2 мая 2025 г. на выполнение НИР «Формирование системы адаптивного маркетинга в аграрном бизнесе Республики Беларусь как инструмента инновационного развития экономики» на 2025–2027 гг.

Заключение

Таким образом, мировое аграрное хозяйствование демонстрирует использование различных моделей эффективного ведения агропромышленного производства, предусматривающего решение национальной продовольственной безопасности и повышение экспортного потенциала отрасли. Установлено, что современные тренды в области инноваций и цифровизации аграрного бизнеса Республики Беларусь базируются на правовых, институциональных, экономических, финансовых и кадровых условиях. С целью повышения инновационной активности субъектов хозяйствования с учетом современных экономических условий разработан комплекс действенных мероприятий, включающий совершенствование процесса венчурного финансирования в стране и, соответственно, привлечение частного капитала, внедрение инновационной модели построения системы дополнительного образования взрослых и повышения кадрового потенциала отрасли, реализацию внешнеэкономической стратегии по обеспечению сбалансированного развития внешней торговли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шумпетер, Й. Теория экономического развития: (Исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры) / Й. Шумпетер; перевод с нем. В.С. Автономова [и др.]. – М.: Прогресс, 1982. – 455 с.
2. Механизмы устойчивого инновационного развития аграрного бизнеса Республики Беларусь / Н.В. Киреенко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – 204 с.
3. Byrski, B. Procesy innowacyjne w przemyśle / B. Byrski. – Krakow: Akademia Ekonomiczna w Krakowie, 1986. – 55 p.
4. Poznanski, K. Innowacje w gospodarce kapitalistycznej / K. Poznanski. – Warszawa: Państwowe Wydawn, Naukowe, 1979. – 32 p.
5. Королева, И.В. К вопросу об инновационной составляющей национальной модели развития российской экономики / И.В. Королева // Национальная модель развития экономики России: материалы VI–II Чайновских чтений / Под ред. Н.И. Архиповой. – М.: РГГУ, 2008. – С. 133–134.
6. Платонова, Т.Е. Проблемы внедрения инновационных процессов в развитии сельского хозяйства в регионах мира / Т.Е. Платонова // Региональная экономика и управление. – 2018. – № 1. (53). – С. 1-12.
7. Войтко, И.А. Роль государственных программ развития аграрного бизнеса в обеспечении бюджетной поддержки сельского хозяйства Республики Беларусь / И.А. Войтко // Агропанорама. – 2021. – № 4 (146). – С. 38-44.
8. Шестаков, Ю.Н. От внедрения «цифры» в АПК к цифровой трансформации общества / Ю.Н. Шестаков // Цифровизация агропромышленного комплекса: сборник научных статей III Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т., г. Тамбов, 25-27 октября 2022 г. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – Т. 2. – С. 364-368.
9. Киреенко, Н.В. Модели развития аграрного бизнеса в международной практике / Н.В. Киреенко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59. – №1. – С. 23-42.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.05. 2025

УДК 631:338.43

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-169-3-45-48>

РАЗВИТИЕ АПК ГРОДНЕНСКОЙ ОБЛАСТИ В КОНТЕКСТЕ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ «АГРАРНЫЙ БИЗНЕС» НА 2021-2025 ГОДЫ

С.И. Горанец,

ст. преподаватель каф. экономики и управления на предприятии ГрГУ им. Я. Купалы

В статье проанализированы промежуточные результаты функционирования агропромышленного комплекса (АПК) Гродненской области и целевые показатели по выполнению государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы. Выделены перспективные направления развития и обоснованы мероприятия по повышению финансовой устойчивости и конкурентоспособности АПК региона, способствующие обеспечению национальной и региональной продовольственной безопасности.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, государственная программа, аграрный бизнес, финансовая устойчивость, конкурентоспособность, сельское хозяйство.

The article analyzes the intermediate results of the functioning of the agro-industrial complex (AIC) of the Grodno region and target indicators to achieve the goals and objectives of the state program "Agricultural Business" for 2021-2025. Promising areas of development are identified and measures to improve the financial stability and competitiveness of the region's AIC are substantiated, contributing to national and regional food security.

Key words: agro-industrial complex, state program, agrarian business, financial stability, competitiveness, agriculture.

Введение

АПК является одной из важнейших составляющих региональной экономики Гродненской области, обеспечивая продовольственную безопасность региона, создание рабочих мест и развитие экспортного потенциала. В условиях динамично меняющихся рыночных условий, мировых тенденций и внутренней необходимости повышения эффективности и конкурентоспособности продукции, развитие АПК приобретает особую значимость. Исходя из этого, в государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы определены новые механизмы поддержки сельскохозяйственных производителей, стимулируются инновационные инициативы и достижения технологического прогресса [1].

Научно-методические направления развития АПК Республики Беларусь в современных условиях хозяйствования рассматриваются многими авторами. Так, В.И. Бельский обосновал экономический механизм государственного регулирования сельскохозяйственного производства; И.А. Войтко определила роль государственных программ развития аграрного бизнеса в обеспечении бюджетной поддержки сельского хозяйства; В.Г. Гусаков выделил факторы и методы эффективного хозяйствования, в том числе инвестиции в развитие производства, государственное регулирование АПК, развитие предпринимательства и подготовка кадров [2-5]. В свою очередь, Н.В. Киреенко определила приоритетные направления повышения эффективности управления государственными активами в аграрном бизнесе Республики Беларусь [6].

Вместе с тем, в современных исследованиях недостаточно подробно представлены промежуточные результаты реализации отраслевых стратегий, предусмотренных программой, что обуславливает необходимость оценки их эффективности и выявления потенциала дальнейшего развития в регионах.

Целью данной работы является анализ развития АПК Гродненской области в контексте реализации государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы, а также выявление основных факторов, влияющих на выполнение поставленных стратегических задач. На основе проведенного исследования предполагается разработка мероприятий по более эффективному внедрению стратегий программы с учетом региональных особенностей, способствующих повышению конкурентоспособности АПК Гродненской области.

Основная часть

Развитие АПК является ключевым аспектом обеспечения продовольственной безопасности, устойчивого экономического роста и повышения уровня жизненного стандарта населения. В рамках государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы реализуется комплекс мероприятий, направленных на модернизацию сельского хозяйства, повышение конкурентоспособности отечественного агропромышленного производства и создание условий для его инновационного развития [1].

Гродненская область обладает значительным потенциалом для развития сельскохозяйственного производства за счет благоприятных природно-

климатических условий, современной производственной базы и наличия квалифицированных кадров. В рамках реализации государственной программы по развитию аграрного бизнеса в регионе предпринимаются меры по модернизации сельскохозяйственных организаций, развитию производственной и рыночной инфраструктуры, поддержке фермерских инициатив, что нацелено на достижение устойчивых результатов и повышение уровня жизни сельских жителей.

Рассмотрим выполнение сводных целевых показателей государственной программы «Аграрный бизнес» на период 2021-2025 годов. Анализ данных показателей позволит выявить тенденции в развитии АПК, а также оценить эффективность реализуемых мер и определить направления дальнейших стратегических инициатив.

В таблице 1 представлены показатели рентабельности продаж в сельском хозяйстве по областям и Республике Беларусь.

Таблица 1. Рентабельность продаж в сельском хозяйстве по областям и Республике Беларусь, 2017-2023 гг., % [7]

Область	Годы						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Брестская	9,3	8,5	9,1	9,4	10,2	13,2	10,9
Витебская	3,3	1,0	0,02	-0,1	0,9	2,9	-0,2
Гомельская	5,4	0,8	0,4	0,6	-1,6	1,8	-1,3
Гродненская	10,1	7,0	6,1	8,4	6,9	13,2	9,1
Минская	6,1	3,3	5,5	6,0	8,1	10,5	6,9
Могилевская	5,0	3,3	1,9	3,0	4,1	7,4	4,3
Республика Беларусь	6,8	4,4	4,7	5,4	6,1	9,3	6,4

Анализируя динамику рентабельности продаж в сельском хозяйстве по регионам Республики Беларусь за рассматриваемый период, следует отметить, что Гродненская область является одним из лидеров, опередив в 2023 г. Минский (6,9 %), Гомельский (-1,3 %), Витебский (-0,2 %) и Могилевский (4,3%) регионы.

В рамках реализации государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы наблюдается существенное колебание в показателях. В 2021 г. рентабельность продаж снизилась по сравнению с 2020 г., что связано с сопутствующими рыночными и погодными факторами. Тем не менее, уже в 2022 г. происходит значительный рост до 13,2%, что подтверждает эффективность внедрения инновационных и цифровых технологий, увеличение производительности труда и оптимизацию управленческих процессов в АПК Гродненской области. В 2023 г. отмечается повторное сниже-

ние рентабельности продаж до 9,1 %.

Сравнение показателей рентабельности продаж в сельском хозяйстве Гродненской области и в целом по стране представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что уровень рентабельности в Гродненской области в 2017 г. значительно превышал показатель по стране (10,1% против 6,8 %), что указывает на более эффективное использование ресурсов в регионе. В последующие годы наблюдается снижение рентабельности продаж на национальном и региональном уровнях, достигая минимальных значений в 2018-2019 гг. Однако с 2020 г. отмечается увеличение данного показателя. С началом реализации государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы продолжался его рост. Так, в 2021 г. рентабельность продаж по Гродненской области составила 6,9 %, а по стране – 6,1 %, в 2022 г. 13,2 % и 9,3 % соответственно. В 2023 г. наблюдалось снижение до 9,1 % и 6,4 % соответственно. Возможным объяснением наблюдаемой динамики служит снижение цен на сельскохозяйственную продукцию на внутреннем и международном рынках, а также колебания урожайности, обусловленные неустойчивыми погодными условиями и агротехническими факторами.

В продолжение исследования эффективности реализации государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021-2025 гг. представлены данные, позволяющие сопоставить запланированные показатели рентабельности с фактическими значениями по областям за 2023 г. (табл. 2).

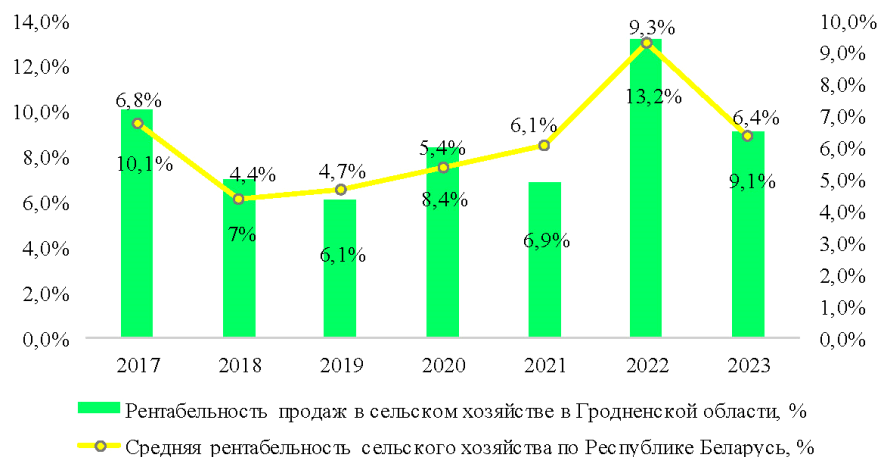


Рисунок 1. Рентабельность продаж в сельском хозяйстве в Гродненской области и Республике Беларусь, 2017-2023 гг., % [7]

Из таблицы 2 следует, что Гродненская область характеризуется относительной стабильностью показателей рентабельности продаж в сельском хозяйстве. В соответствии с программой рентабельность продаж составляла 9,3 %, а фактический показатель – 9,10 %, что свидетельствует о выполнении запланированных ориентиров с минимальными отклонениями.

В сравнении с другими регионами Гродненская

Таблица 2. Сравнительный анализ рентабельности продаж сельского хозяйства по областям и Республике Беларусь, 2023 г., % [7]

Область	Значение показателя:	
	по программе	фактически
Брестская	9,5	10,9
Витебская	5,3	-0,2
Гомельская	5,1	-1,3
Гродненская	9,3	9,1
Минская	9,4	6,9
Могилевская	6,3	4,3
Республика Беларусь	8,1	6,4

область демонстрирует более высокие показатели по рентабельности продаж в сельском хозяйстве, уступая только Брестскому региону (запланированная рентабельность – 9,5 %, фактический показатель – 10,9 %). При этом она существенно превосходит Гомельскую и Витебскую области, где зафиксированы отрицательные значения показателя (-1,3 % и -0,2 % вместо запланированных 5,3 % и 5,1 % соответственно).

Значимым сводным целевым показателем выполнения программы является также отношение кредиторской задолженности и задолженности по кредитам и займам к выручке от реализации продукции, товаров, работ, услуг сельскохозяйственных организаций. Сравнение запланированных и фактических значений показателя представлено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительный анализ отношения кредиторской задолженности и задолженности по кредитам и займам к выручке от реализации продукции, товаров, работ, услуг сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь, 2023 г., коэффициент [7]

Область	Значение показателя:	
	по программе	фактически
Брестская	0,80	0,63
Витебская	1,03	1,01
Гомельская	1,22	1,36
Гродненская	0,80	0,70
Минская	0,90	0,81
Могилевская	1,25	1,21
Республика Беларусь	0,95	0,90

Анализ данных по Гродненской области свидетельствует о сравнительно низком уровне отношений кредиторской задолженности и задолженности по кредитам и займам к выручке от реализации сельскохозяйственной продукции. В соответствии с программными показателями коэффициент составил 0,80, фактическое значение в 2023 г. – 0,70. Последнее значение свидетельствует о достаточно высоком уровне финансовой устойчивости сельскохозяйственных организаций региона, что способствует снижению рисков неплатежеспособности и улучшению

кредитного рейтинга области.

При сопоставлении с другими регионами Гродненская область занимает позицию с одними из наиболее благоприятных показателей. Например, в Минской области коэффициенты по программе и фактически близки к показателю Гродненской – 0,90 и 0,81 соответственно. В то же время Гомельский и Могилевский регионы демонстрируют значительно более высокие показатели (1,22 и 1,36 по программе, а также 1,21 и 1,36 фактически), что указывает на более высокий уровень долговой нагрузки и потенциальные финансовые риски для сельского хозяйства. Гродненская область имеет невысокую нагрузку по кредитной задолженности, что свидетельствует о более эффективной финансовой политике и финансовой устойчивости АПК региона.

Согласно сводному отчету о реализации государственных программ за 2021–2023 годы Министерства экономики Республики Беларусь, государственная программа «Аграрный бизнес» признана средне-эффективной. В целом в 2023 г. выполнено 94,4 % от общего числа запланированных мероприятий (101 из 107 мероприятий). Данный показатель свидетельствует о стабильной реализации программы и отсутствии существенных сбоев на данном этапе [8].

Гродненская область занимает относительно устойчивое положение в структурных планах развития аграрного бизнеса, демонстрируя результаты, близкие к запланированным значениям. Это свидетельствует о достаточно эффективной реализации программных мероприятий данным административным субъектом, однако остается потенциал для повышения и устранения выявленных отклонений.

Заключение

Для повышения экономической эффективности и финансовой устойчивости развития АПК Гродненской области предлагается сосредоточить усилия на следующих направлениях:

1. Разработка действенных мер по стабилизации и повышению рентабельности продаж сельскохозяйственных организаций, в том числе через повышение управленческой компетентности, создание системы обучения и повышения квалификации кадров АПК с учетом современных требований и тенденций.

2. Усиление научно-исследовательской деятельности и внедрение инновационных технологий посредством расширения сотрудничества между научными учреждениями и сельскохозяйственными организациями с целью адаптации современных достижений науки к условиям региона.

3. Оптимизация кредитной политики с целью обеспечения достаточного уровня инвестиций в развитие АПК, без угрозы чрезмерной долговой нагрузки. Разработка и внедрение дополнительных мероприятий, ориентированных на повышение эффективности использования кредитных ресурсов и снижение операционных затрат.

4. Расширение поддержки малых форм хозяйствования, что позволит повысить эффективность их дея-

тельности и подготовленность к рыночным вызовам.

В целом, реализация поставленных целей и задач в государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы осуществляется в соответствии с запланированными сроками. Однако требуется системный подход к устранению выявленных недостатков для достижения стратегических целей развития АПК Гродненской области в рамках утвержденного периода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. О Государственной программе «Аграрный бизнес» на 2021-2025 годы // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100059> (дата обращения: 10.05.2025).

2. Бельский, В.И. Экономический механизм государственного регулирования сельскохозяйственного производства: монография / В. И. Бельский. – Минск: Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2018. – 265 с.

3. Войтко, И.А. Роль государственных программ развития аграрного бизнеса в обеспечении бюджетной поддержки сельского хозяйства Республики Беларусь / И.А. Войтко // Агропанорама. – 2021. – № 4 (146). – С. 38-44.

4. Гусаков, В.Г. Факторы и методы эффективного хозяйствования. Ч 2. Кооперация и интеграция субъектов хозяйствования, инвестиции в развитие

производства, государственное регулирование АПК, развитие предпринимательства и подготовка кадров / В.Г. Гусаков // Весці НАН Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2020. – Т. 58. – № 2. – С. 135-142.

5. Цифровое сельское хозяйство Республики Беларусь / Под общ. ред. В.Г. Гусакова; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т систем, исслед. в АПК НАН Беларусі. – Минск: Беларуская навука, 2024. – 553 с.

6. Киреенко, Н.В. Приоритетные направления повышения эффективности управления государственными активами в аграрном бизнесе Республики Беларусь на основе зарубежного опыта / Н.В. Киреенко // Уфимский гуманитарный научный форум. – 2023. – № 1 (13). – С. 46-51.

7. Сельское хозяйство Республики Беларусь, 2024 // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_brochures/index_10_0486 (дата обращения: 10.05.2025).

8. Сводный отчет о реализации государственных программ в 2021–2023 годах // Министерство экономики Республики Беларусь. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/gos-progr-2021-2025/Svodnyj-otchet-za-2021-2023.pdf> (дата обращения: 10.05.2025).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.05.2025

Станция для доильных установок с вакуумным насосом малой мощности

Предназначена для создания вакуумметрического давления в системах машинного доения коров. Может применяться в отраслях промышленности, технологические процессы которых требуют создания вакуума.

Применение установки обеспечивает снижение энергоемкости процесса доения коров до 0,052 кВт/ч/м³ при стабильном вакуумном режиме.



Основные технические данные

Станция вакуумная водокольцевая	ВВН-75
Тип	передвижная
Быстрота действия при вакууме 50 %, м ³ /ч	75
Предельное вакуумметрическое давление, кПа	90
Потребляемая мощность, кВт	3,9
Расход рециркуляционной воды, литров в минуту	8
Габаритные размеры, мм	1500x600x1500
Масса, кг, не более	35

Правила для авторов

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

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

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

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

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

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

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

4) при наборе формул необходимо следовать общепринятым правилам:

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

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

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

г) цифры набираются шрифтом прямого начертания;

д) аббревиатуры функций набираются прямо;

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

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

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

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

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

графиков не следует применять выделение цветом, заливку фона.

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

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

индекс УДК;

название статьи;

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

аннотацию на русском и английском языках;

ключевые слова на русском и английском языках;

введение;

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

заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

список цитированных источников;

дату поступления статьи в редакцию.

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

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

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

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

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

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

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

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

9. Плата за опубликование научных статей не взимается.

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

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

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

Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»
объявляет прием в аспирантуру в 2025 году
по следующим специальностям:

- 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»
- 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве»
- 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»
- 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»
- 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)»
- 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»
- 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности)»
- 06.01.04 «Агрехимия»

Прием документов – с 1 августа по 30 сентября 2025 г.
Вступительные экзамены по специальной дисциплине в объеме учебной программы I ступени высшего образования – с 10 по 21 октября 2025 г.
Начало занятий в аспирантуре – с 1 ноября 2025 г.

Поступающие в аспирантуру представляют в приемную комиссию следующие документы:

1. Заявление на имя руководителя учреждения образования, организации, реализующей образовательные программы послевузовского образования, по установленной форме.
2. Личный листок по учету кадров.
3. Автобиографию.
4. Копии диплома о высшем образовании и прилагаемой к нему выписки из зачетно-экзаменационной ведомости.
5. Копии диплома магистра и прилагаемой к нему выписки из зачетно-экзаменационной ведомости (при наличии).
6. Копию удостоверения о сдаче кандидатских зачетов (дифференцированных зачетов) и кандидатских экзаменов по общеобразовательным дисциплинам (для лиц, поступающих для обучения в форме соискательства, – при наличии).
7. Копию трудовой книжки либо иные документы, подтверждающие необходимый стаж работы, или рекомендация ученого совета (совета) учреждения высшего образования или факультета этого учреждения (для поступающих в год окончания обучения в данном учреждении).
8. Заявку организации – заказчика кадров (при наличии).
9. Список и копии опубликованных научных работ, а при их отсутствии – научный реферат по профилю избранной специальности.
10. Материалы, относящиеся к объектам интеллектуальной собственности, зарегистрированные в установленном порядке, выписки из отчетов, справки об участии в выполнении научно-исследовательских и инновационных проектов, акты об использовании результатов научных разработок, копии материалов и (или) тезисов докладов на научных, научно-практических конференциях, съездах, симпозиумах и других подобных мероприятиях (при наличии).
11. Заключение научного семинара лаборатории (заседания кафедры) об актуальности темы, качестве и объеме самостоятельно выполненных данным лицом исследований по теме подготавливаемой диссертации (для поступающих в аспирантуру для обучения в форме соискательства).
12. Документы, дающие преимущественное право для зачисления в аспирантуру (при наличии).
13. Три фотографии размером 4×6 см (для поступающих в аспирантуру для обучения в форме соискательства – 2 фотографии).
14. Медицинскую справку о состоянии здоровья по форме, установленной Министерством здравоохранения.

Документ, удостоверяющий личность, и подлинники документов об образовании предъявляются лично.

*Подробная информация на сайте БГАТУ: <http://www.bsatu.by>
и по телефону аспирантуры (+375 17) 385 91 07; 373-34-74*

Адрес приемной комиссии:

*220012, г. Минск, пр-т Независимости, 99, к. 5-1,
каб. 504; 529*

