ISSN 2078-7138 (Print)
ISSN 2078-7146 (Online)
DOI: 10.56619/2078-7138-2026-176-4

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ РАБОТНИКОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

АГРОПАНОРАМА

№ 4
август
2026

В номере:

Формирование транспортно-тяговых агрегатов со сниженным уровнем уплотняющего воздействия на почву

К обоснованию параметров системы водоснабжения с регулируемым электроприводом насосного агрегата

Состояние и перспективы развития мирового рынка мяса и мясной продукции



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

АГРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе Международной научно-практической конференции

«ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АПК»,

которая состоится в Белорусском государственном аграрном техническом университете

29 - 30 октября 2026 г.

Основные направления работы конференции:

- *Сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, испытание*
- *Мобильные энергетические средства в сельском хозяйстве*
- *Инновационные технологии производства продукции растениеводства*
- *Инновационные технологии механизации животноводства и технического обеспечения переработки сельскохозяйственной продукции*
- *Инновационные технологии подготовки специалистов АПК*

г. Минск, пр-т Независимости, 99, корпус 2

Контактные телефоны:

(+375-17) 369-23-71; 272-23-43; 272-68-18; 272-25-23

E-mail: dekanat_amf@bsatu.by

www:bsatu.by

АГРОПАНОРАМА 4 (176) август 2026

Издается с апреля1997 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
П.П. Казакевич
В.М. Капцевич
А.Н. Карташевич
Н.В. Киреенко
И.П. Козловская
И.С. Крук
А.С. Сайганов
В.Н. Тимошенко
Н.К. Толочко
В.П. Чеботарёв
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, 2026.
Формат издания 60 х 84 1/8.
Подписано в печать с готового оригинала-макета 20.08.2026 г. Зак. № 492 от 19.08.2026 г.
Дата выхода в свет 31.08.2026 г.
Печать офсетная. Тираж 60 экз.
Статьи рецензируются.
Отпечатано в ИПЦ БГАТУ по адресу: г. Минск, пр-т Независимости, 99/2
ЛП № 02330/316 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 2026 г.: для индивидуальных подписчиков - 70,38 руб.; ведомственная - 72,39 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

Н.Н. Романюк, А.Н. Орда, В.А. Шкляревич, Н.Л. Ракова, Ж.И. Пантелеева, А.С. Воробей
Формирование транспортно-тяговых агрегатов со сниженным уровнем уплотняющего воздействия на почву.....2

Ю.В. Чигарев, И.С. Крук
Моделирование процесса движения капли рабочего раствора пестицидов с учетом изменения ее геометрических параметров и физических свойств при вылете из распылителя с траекторией, близкой к горизонтали.....9

Энергетика. Транспорт

М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова, С.А. Лихтар
К обоснованию параметров системы водоснабжения с регулируемым электроприводом насосного агрегата.....19

Технический сервис в АПК. Экономика

К.Л. Сергеев, М.М. Дечко, А.В. Гуд
Влияние модифицирования смазочно-охлаждающих жидкостей углеродными высокодисперсными материалами на износ инструмента при обработке металлов резанием.....24

Н.В. Киреенко, Е.А. Спиридонова
Цифровая зрелость как фактор обеспечения инновационного развития организаций аграрного бизнеса...31

А.В. Королев, К.Н. Соболь, Ж.К. Тарасевич
Состояние и перспективы развития мирового рынка мяса и мясной продукции.....36

Т.В. Гусарова
Научные основы инновационного развития организаций АПК.....43

УДК 631.43:629.1
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-2-8

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ТЯГОВЫХ АГРЕГАТОВ СО СНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ

Н.Н. Романюк,
ректор БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.Н. Орда,
профессор каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В.А. Шкляревич,
ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

Н.Л. Ракова,
доцент каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Ж.И. Пантелеева,
доцент каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент

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

Обоснованы пути формирования машинно-тракторных агрегатов, учитывающих тип и состояние почвенного агрофона. Рассмотрено влияние типа почвенного агрофона на глубину следа, уплотнение почвы и распределение плотности почвы по глубине при воздействии ходовых систем тракторов. Приведены рекомендации по формированию транспортно-тяговых агрегатов при работе на почвах различных агрофонов.

Ключевые слова: почва, плотность, напряжение, ходовая система, колесо, гусеница, агрегат, деформирование.

The ways of forming machine-tractor units that take into account the type and condition of the soil agro-background are substantiated. The influence of the type of soil agro-background on the depth of the track, soil compaction, and the distribution of soil density by depth under the influence of tractor running systems is examined. Recommendations for forming transport and traction units when working on soils of various agro-backgrounds are provided.

Keywords: soil, density, stress, running system, wheel, track, unit, deformation.

Введение

Из-за чрезмерного уплотняющего воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) на почву снижается урожайность сельскохозяйственных культур. Так, урожайность зерновых в следах тракторов снижается на 10…15 %, а корнеклубнеплодов – на 20…30 % [1-6].

Установлено, что повышение плотности почвы, вызванное воздействием движителей тракторов и сельскохозяйственных машин, приводит к увеличению твердости почвы в 2…3 раза. Удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15…65 %, а транспортных средств и комбайнов – на 60…90 % [7, 8].

Целью работы является обоснование путей улучшения приспособляемости ходовых систем машинно-тракторных агрегатов к различным почвенным агрофонам.

Основная часть

Для решения проблемы уплотнения почвы ходовыми системами известны три основных направления:

1) технологическое (совершенствование технологии выращивания сельскохозяйственных культур);

2) агрономическое (повышение способности почв противостоять уплотняющим нагрузкам);

3) конструкторское (совершенствование конструкций ходовых систем МТА) [8, 9].

Помимо радикальных средств снижения давления на почву, заключающихся в создании принципиально новых типов ходовых систем, значительного эффекта снижения уплотнения почвы можно добиться путем формирования машинно-тракторных агрегатов, учитывающих тип и состояние почвенного агрофона.

Для обоснования зависимости уплотнения почвы в различных режимах нагружения воспользуемся следующими зависимостями между напряжением сжатия и осадкой штампа:

$$\sigma = k \cdot h, \quad (1)$$

$$\sigma = c' \cdot h^{\mu}, \quad (2)$$

$$\sigma = p_0 \left(1 - e^{-h/k'}\right), \quad (3)$$

$$\sigma = p_0 \cdot th\left(\frac{k}{p_0} \cdot h\right), \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{p_0}{1 + c'' \cdot e^{-c_1 p_0 h}}, \quad (5)$$

$$\sigma = p_0 \left[\text{th}\frac{E_{\max}}{p_0}\left(\varepsilon' - \varepsilon_s\right) + \text{th}\frac{E_{\max}}{p_0}\varepsilon_s\right], \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{p_0}{1 + 1/\left(c'' \cdot h_b\right)}, \quad (7)$$

где k – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м^3;

h – осадка штампа, м;

c' – коэффициент пропорциональности деформируемости почвы, Н/м^3;

μ – показатель степени деформируемости почвы;

$\varepsilon = h / D_{ш}$ – относительная деформация;

$D_{ш}$ – диаметр штампа, м;

p_0 – предел несущей способности почвы, Па;

k' – константа деформируемости почвы, м;

c_1 – степенной показатель, характеризующий деформируемость почвы, м/Н;

$E_{\max}$ – максимальный модуль деформации почвы, Па;

$\varepsilon' = h / h_{\Sigma}$ – относительная осадка почвы;

h_{Σ} – высота деформируемого слоя почвы, м;

c'' – параметр, характеризующий деформируемость почвы;

ε_s – относительная деформация почвы, соответствующая точке перегиба кривой деформирования.

К недостаткам линейной (1) и степенной (2) функций следует отнести то, что в них не отражена физическая сущность деформации почвы. Линейная зависимость приводит к якобы непрерывному и беспредельному росту сопротивления сжатию с увеличением деформации. Степенная функция имеет, с одной стороны, тот же недостаток, с другой – приводит к маловероятному выводу о бесконечно большой интенсивности нарастания напряжения в начале процесса сжатия [10].

Теоретически более обоснована формула (3), предложенная С.С. Корчуновым, однако ее можно получить из преобразований зависимости (4), предложенной В.В. Кацыгиным [11], которая получена в результате более общего предположения о характере изменения свойств почвы при деформации.

Зависимость (5), предложенная Г.И. Покровским, имеет вид S-образной кривой. Анализ показал, что эта кривая симметрична относительно точки перегиба [10].

Д.И. Золоторевская, проанализировав особенности зависимостей (4) и (5), предложила формулу (6), основанную на функции гиперболического тангенса. Зависимость (7), предложенная В.В. Кацыгиным и А.Н. Ордой [10], является несимметричной относительно точки перегиба.

При сжатии почвы в жесткой обойме (компрессионном сжатии) зависимость между напряжением и осадкой штампа имеет вогнутый характер. При неограниченном увеличении напряжения деформация почвы имеет определенный предел. Зависимость между напряжением и деформацией при сжатии образца с возможностью бокового выпирания описывается выпуклой кривой. Выпуклый характер кривой деформации почвы подтвержден экспериментально.

При вдавливании штампа в массив почвы одновременно происходят процессы сжатия почвы и сдвига ее в стороны от вертикальной оси. Поэтому кривая вдавливания имеет сложный вогнуто-выпуклый характер (рис. 1) [10].

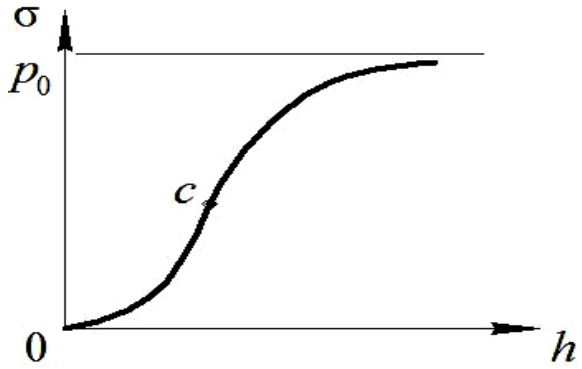


Рисунок 1. Сопротивление почвы при вдавливании штампа в почвенный массив

Зависимости (5) и (6) имеют вогнуто-выпуклый характер и являются симметричными относительно точки перегиба. Зависимость (7) имеет более общий характер, так как является несимметричной относительно точки перегиба.

Частные случаи почвенного массива (стерня, почва, подготовленная под посев) имеют более простой вид: выпуклый или вогнутый характер зависимостей между напряжением и осадкой.

Для рыхлой почвы, подстилаемой прочным основанием (почва, подготовленная под посев), предложена следующая зависимость между сопротивлением и осадкой (рис. 2) [10]:

$$\sigma = \frac{a}{b} \cdot tg(a \cdot b \cdot h), \quad (8)$$

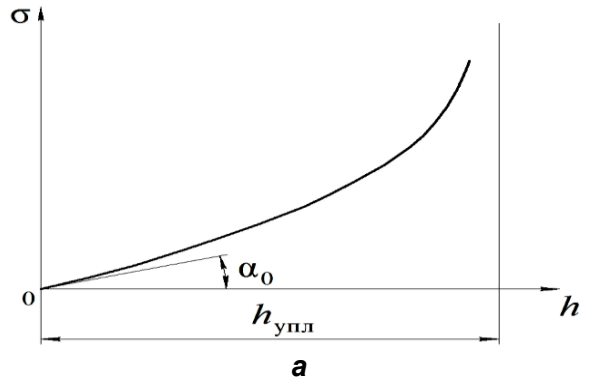
где $a = \sqrt{k_0}$;

$$b = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{h_{упл}\sqrt{k_0}};$$

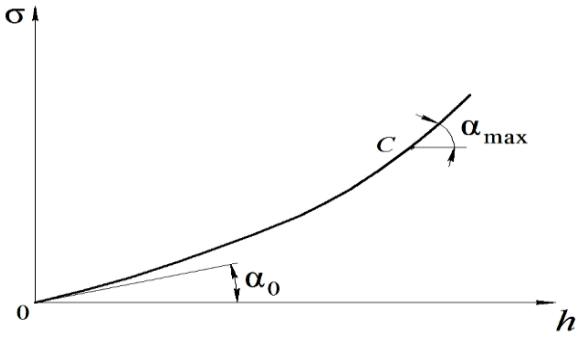
$$h_{упл} = H \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}{\left(1 + \varepsilon_0\right)\left[1 - 2 \cdot \nu\left(1 + \varepsilon_{\min}\right)\right]},$$

где $h_{упл}$ – предельная величина деформации, м;

H – высота пахотного слоя, м;



а



б

Рисунок 2. Зависимость между сопротивлением и осадкой для почвы, подготовленной под посев: а – недеформируемое подстилаемое основание; б – деформируемое подстилаемое основание

ε_0 – коэффициент пористости почвы до нагружения;

ε_{min} – минимально возможный коэффициент пористости почвы;

ν – коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

Осадка штампа после n нагружений для почв с плотным подстилаемым основанием имеет вид [12]:

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b} \arccos\left(d \cdot n^{-B_1}\right), \qquad (9)$$

где B_1 – коэффициент накопления повторных осадок для почв с плотным подстилаемым основанием.

Значение коэффициента d найдем из условия, что величина деформации при первом нагружении определяется по зависимости (8).

Зависимость (9) при первом нагружении принимает вид:

$$h_1 = \frac{1}{a \cdot b} \arccos d\,, \qquad (10)$$

Из зависимостей (8) и (10) после преобразования обратных тригонометрических функций получено, что

$$d = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(b^2 / a^2\right) \cdot \sigma^2}}\,.$$

С учетом найденного значения коэффициента d зависимость (9) накопления повторных осадок почв с плотным подстилаемым основанием примет вид:

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b} \arccos\left(\frac{n^{-B_1}}{\sqrt{1 + \left(b^2 / a^2\right) \cdot \sigma^2}}\right). \qquad (11)$$

Значение коэффициента b в формулах (8) и (9) определялось на основе предположения о недеформируемости подстилаемого основания.

В случае деформируемости подстилаемого слоя (рис. 2б) следует учитывать осадку подстилаемого основания.

Зависимость между сопротивлением почвы и осадкой примет вид (рис. 3).

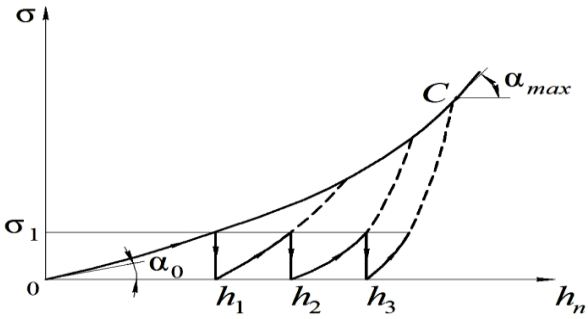


Рисунок 3. Закономерность накопления повторных осадок для слабоупрочняющейся почвы, подготовленной под посев

Величина осадки почвы после n нагружений определится из следующих зависимостей:

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b_1}\left(1 + k_u \cdot \lg n\right) \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{b_1}{a} \cdot \sigma\right), \qquad (12)$$

b_1 определяется по формуле [10]:

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{k_0} \cdot h_{упл}} \cdot \arccos\sqrt{\frac{k_0}{k_{max}}}\,.$$

Глубина следа при повторных нагружениях для слабоупрочняющихся почв (рис. 4) подчиняется зависимости [13]:

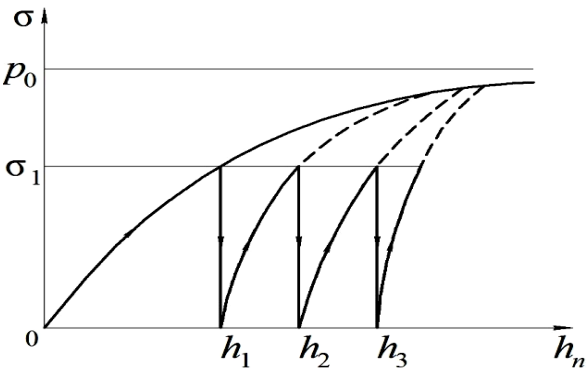


Рисунок 4. Закономерность накопления повторных осадок для слабоупрочняющейся почвы

$$h_n = \frac{p_0}{k}\left(1 + k_u \cdot \lg n\right) \cdot \operatorname{arth}\left(\frac{\sigma}{p_0}\right), \qquad (13)$$

где k_u– коэффициент интенсивности накопления повторных осадок для слабоупрочняющихся почв;

n – число нагружений, шт.

Зависимость между напряжением и повторными деформациями описывается кусочно-непрерывной функцией. Функция $\sigma = f(h)$ при каждом повторном нагружении подчиняется зависимости гиперболического тангенса. Рассмотрим, чему равны при этом константы p_0 и k. Сопротивление почвы при повторных нагружениях увеличивается по сравнению с первым приложением нагрузки. Коэффициент объемного смятия при этом возрастает.

Увеличение сопротивления в начальный период каждого повторного нагружения будем учитывать изменением коэффициента объемного смятия, который зависит от характера протекания процесса деформации в начальный период. Назовем его условным коэффициентом объемного смятия при n-м нагружении ($k_{уп}$). Тогда зависимость между напряжением и деформацией при n-м нагружении запишется следующим образом [13]:

$$\sigma_n = p_0 \cdot \mathrm{th}\left(\frac{k_{уп}}{p_0}\Delta h_n\right),$$

где Δh_n – приращение осадки при n-м цикле, м.

Напряжение σ_n в конце каждого цикла нагружения равно напряжению σ_1, развиваемому в конце первого цикла. Исходя из этого найдем условный коэффициент объемного смятия

$$k_{уп} = \frac{p_0}{\Delta h_n}\mathrm{arth}\left(\frac{\sigma_1}{p_0}\right). \qquad (14)$$

Приращение осадки при n-м приложении нагрузки найдем из уравнения (9)

$$\Delta h_n = k_u \cdot \lg\frac{n}{n-1}\cdot\frac{p_0}{k}\mathrm{arth}\left(\frac{\sigma_1}{p_0}\right).$$

Зависимость между напряжением и деформацией при n-м нагружении примет вид:

$$\sigma_n = p_0 \cdot \mathrm{th}\left(\frac{k}{p_0}\cdot\frac{1}{k_u\cdot\lg\left(n/(n-1)\right)}\cdot\Delta h_n\right).$$

Зависимость накопления повторных осадок для связных почв с одинаковыми по глубине свойствами (рис. 5) имеет вид:

$$h_n = \frac{p_0}{k}\cdot\mathrm{arch}\left(\frac{n^B}{\sqrt{1-\sigma^2/p^2}}\right), \qquad (15)$$

где B – коэффициент накопления повторных осадок связных почв.

При расчете уплотнения почвы применим энергетический метод, учитывающий влияние поглощенной энергии на изменения плотности почвы. В результате анализа поглощения энергии в почвенном массиве получено следующее уравнение распределения напряжений по глубине [14]:

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot e^{-\beta\cdot x}, \qquad (16)$$

где σ_x – напряжение в почве на глубине x, Па;

σ_0 – напряжение в контакте деформатора с почвой, Па;

β – коэффициент распределения напряжений, м$^{-1}$.

Зависимость распределения плотности почвы по глубине имеет вид [14, 15]:

$$\rho_x = \rho_П\left(1+\frac{\beta}{k}\sigma_0\cdot e^{-\beta\cdot x}\right), \qquad (17)$$

где ρ_x– плотность почвы на глубине x, кг/м^3;

$\rho_П$ – исходная плотность почвы, кг/м^3.

Зависимость (17) получена исходя из предположения, что распределение напряжений и плотности почвы по глубине не зависит от величины давления.

При проходе по одному следу колес с одинаковой нагрузкой происходит дополнительное уплотнение почвы после прохода каждого колеса. Величина уплотнения верхнего слоя связной почвы при повторных нагружениях равна [14, 15]

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_П}\right)_n = 1+\frac{\beta}{k}\cdot p_0\cdot\left(\mathrm{arch}\frac{n^B}{\sqrt{1-\sigma_0^2/p_0^2}}\right), \qquad (18)$$

где ρ_0 – плотность почвы в контакте с опорной поверхностью колеса, кг/м^3;

B– опытный коэффициент.

Так как на связных почвах с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами уплотнение распространяется на значительную глубину, то уровень воздействия ходовых систем следует оценивать не только уплотнением верхнего слоя, но и высотой уплотняемого слоя.

Высоту уплотняемого слоя почвы находим из зависимостей (17) и (18)

$$x_{hn} = \frac{1}{\beta}\cdot\ln\left[\frac{p_0}{\sigma_h}\cdot\mathrm{th}\left(\mathrm{arch}\frac{n^B}{\sqrt{1-\sigma_0^2/p_0^2}}\right)\right], \qquad (19)$$

где x_{hn} – высота уплотняемого слоя почвы после n нагружений.

Уплотнение верхнего слоя слабо уплотняющейся

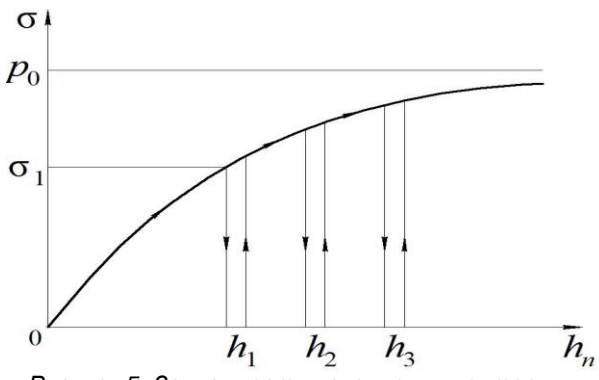


Рисунок 5. Зависимость накопления повторных осадок для связных почв с одинаковыми по глубине свойствами

почвы при повторном нагружении найдем, воспользовавшись тем, что условный коэффициент объемного смятия возрастает от нагружения к нагружению. С учетом значения этого коэффициента при *n*-м нагружении находим последующее приращение плотности:

$$\delta\left(\frac{\rho_0}{\rho_П}\right)_n = 1+\frac{\beta}{k}\cdot k_u\cdot\sigma_0\cdot\lg\left(\frac{n}{n-1}\right).$$

Уплотнение верхнего слоя почвы после *n* воздействий:

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho_П}\right)_n = 1+\frac{\beta}{k}\cdot\sigma_0\cdot\left(1+k_u\cdot\lg n\right). \quad (20)$$

Из зависимостей (8) и (17) найдем плотность верхнего слоя почвы, подготовленной под посев:

$$\rho_0 = \rho_n\frac{H-2\cdot\upsilon\cdot h}{H-h}+\frac{k_1\cdot\sigma_0}{H-h}\times$$
$$\times\left[\left(H-h\right)+\frac{1}{\beta}\left(e^{-\beta\cdot(H-h)}-1\right)\right]. \quad (21)$$

При выполнении различных технологических операций по-разному проявляется уплотняющее воздействие ходовых систем МТА. Отличительной особенностью пахотных машинно-тракторных агрегатов является то, что они работают в почвенных условиях, когда плотность верхнего пахотного слоя незначительно отличается от плотности подпахотного слоя (целина, многолетняя залежь, стерня). В данном случае верхний слой почвы имеет низкую поглотительную способность энергии (малые значения коэффициента распределения напряжений) и поэтому уплотняющее воздействие от ходовых систем в значительной мере передается в нижние необрабатываемые слои почвы. Вспашка почвы требует высоких тяговых усилий со стороны трактора. Поэтому часто для машинно-тракторных пахотных агрегатов используются тяжелые колесные тракторы со сдвоенными колесами. Проанализируем влияние размеров колес на процесс уплотнения почвы. Известно, что осадка различных по размерам деформаторов при сохранении постоянного давления неодинакова [16, 17]. При воздействии на почву колес с большой опорной поверхностью в процесс деформирования вовлекаются более глубокие слои почвы, что ведет к увеличению осадки. В закономерностях деформирования это явление находит отражение в том, что коэффициент объемного смятия почвы зависит от площади опоры и определяется по зависимости:

$$k_2 = k_1\cdot\sqrt{\frac{D_1\cdot B_1}{D_2\cdot B_2}}. \quad (22)$$

где D – диаметр колеса, м;

B – ширина колеса, м.

Анализ результатов экспериментальных исследований [10] показал, что зависимость коэффициента распределения напряжений от размеров колеса описывается аналогичной зависимостью:

$$\beta_2 = \beta_1\cdot\sqrt{\frac{D_1\cdot B_1}{D_2\cdot B_2}}. \quad (23)$$

Для расчета уплотнения почвы при передвижении МТА по многолетней залежи, целине или стерне применима зависимость (18), полученная в предположении однородности физико-механических свойств почвы по глубине. Анализ этой зависимости с учетом формул (22) и (23) показал, что плотность верхнего слоя почвы не зависит от размеров колес, а полностью определяется величиной давления и физическими свойствами почвы.

Однако на таких почвах размеры колес очень сильно влияют на характер и величину уплотнения почвы по глубине. Из рисунка 6, построенного на основании зависимостей (16), (22) и (23), видно, что

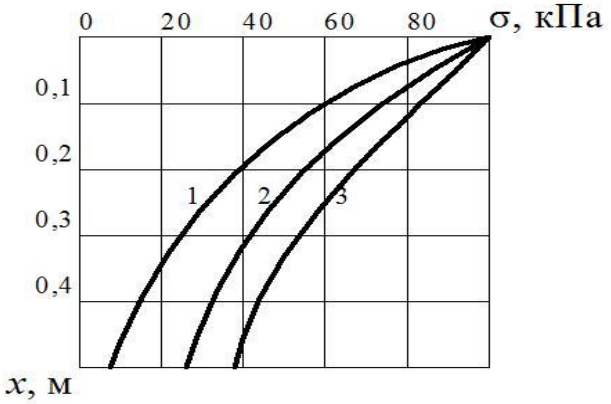


Рисунок 6. Распределение напряжений по глубине: 1– B = 0,3 м; D = 1м; 2– B = 0,5 м; D = 1,5м; 3 – B = 0,75 м; D = 2 м

на одинаковой глубине под колесами с равным давлением развиваются различные напряжения. Увеличение размеров колес, особенно их ширины, ведет к значительному росту плотности нижних слоев почвы.

Анализ зависимостей (18)-(20) показал, что требованиям снижения уплотнения как верхних, так и нижних слоев почвы в наибольшей мере удовлетворяет многоосный колесный ход. Расчет тягово-сцепных качеств свидетельствует о том, что такие ходовые системы обладают низким сопротивлением качению и высоким тяговым КПД [18].

Передача давлений на почву у гусеничных движителей происходит через опорные катки и гусеничную ленту. Характер накопления осадок почвы под опорными катками такой же, как и многоосных колесных систем. При использовании тракторов с узкими гусеницами напряжения концентрируются в пахотном слое. Поэтому при формировании пахотных машинно-тракторных агрегатов предпочтение следует отдавать гусеничным тракторам и тяговым средствам с многоосной колесной системой (таблица 1) по сравнению с колесными тракторами со сдвоенными колесами.

При формировании посевных машинно-тракторных агрегатов следует еще исходить из того, что почва, подготовленная под посев, обладает высокой способностью поглощения энергии, или высокой

Таблица 1. Рекомендуемое количество осей (пар колес) ходовой системы

Масса машины, т	Количество осей, шт.
5	2
5-10	2-3
10-20	3-4
20-30	4-5
30-40	5-6
40-50	6-8

распределительной способностью (имеет большие значения коэффициента распределения напряжений). В данном случае вертикальная нагрузка воспринимается в основном пахотным взрыхленным слоем почвы. Плотность почвы в контакте с колесами и распределение плотности по глубине определяются по зависимостям (17) и (21), в основу которых положены закономерности деформирования почвы (8)-(11).

Основной задачей для посевных МТА является снижение давления на почву. Следует также учитывать установленный исследованиями факт значительного прироста глубины следа и плотности почвы при повторных проходах колес. Поэтому в данном случае с целью снижения давления на почву рекомендуется увеличивать размеры колес, движущихся по следу друг за другом, а не их количество. Таким образом, для посевных агрегатов рекомендуется устанавливать сдвоенные шины на тракторах и сеялках, применять шины больших размеров, особенно высокоэластичные.

Машинно-тракторные агрегаты для внесения удобрений в почву имеют тенденцию к увеличению грузоподъемности и обладают высоким давлением на почву. При их работе на переувлажненных почвах поздней осенью или ранней весной можно допустить, что свойства почвы по глубине одинаковы, и расчет глубины следа и уплотнения почвы следует вести по зависимостям (11) и (20).

Для машин небольшой грузоподъемности допустимого давления на почву можно добиться с помощью сдваивания колес, установки колесно-гусеничного движителя или применения шины сверхнизкого давления (ШСНД) [13; 19].

Снижать давление на почву для машин большой грузоподъемности целесообразно за счет увеличения числа осей ходовой системы. С использованием зависимостей (13) было определено количество осей для машин различной массы.

Обобщенные рекомендации по формированию МТА приведены в таблице 2.

Таблица 2. Рекомендации по формированию МТА

Тип МТА	Рекомендуемый трактор и приспособления к ходовым системам	Примечания
Посевной	Колесный; сдвоенные шины с давлением воздуха ρ_w= 60 – 80 кПа	При влажности W=0,9–1,0 НВ применяются приспособления к колесам
Пахотный	Гусеничные тракторы; тракторы с многоосным колесным ходом	
Для работы в междурядьях	Универсальный пропашной трактор	При влажности W=0,9–1,0 НВ применяются сдвоенные колеса
Для внесения удобрений	Многоосный колесный ход с широкопрофильными шинами	При влажности W=0,9–1,0 НВ применяются приспособления к колесам
Транспортный	Многоосный колесный ход	

Заключение

1. При эксплуатации машинно-тракторных агрегатов воздействие их ходовых систем на почву оценивается глубиной следа, уплотнением верхнего слоя почвы, высотой уплотняемого слоя и характером распределения плотности по глубине. Для расчета показателей уплотнения почвы применен энергетический метод, основанный на закономерностях поглощения энергии различными слоями почвы. В результате получены закономерности уплотнения связных и рыхлых почв, подстилаемых плотным основанием в различных режимах нагружения.

2. При формировании посевных машинно-тракторных агрегатов рекомендуется применять колесные тракторы со сдвоенными шинами. Для пахотных машинно-тракторных агрегатов следует использовать гусеничные и перспективные трех-, четырехосные колесные тракторы. Снизить давление на почву машинно-тракторных агрегатов для внесения удобрений можно путем сдваивания шин, увеличения числа осей ходовой системы и установки колесно-гусеничного движителя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В.А. Русанов. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.

2. Кушнарев, А.С. Уменьшение вредного воздействия на почву рабочих органов и ходовых систем машинных агрегатов при внедрении индустриальных технологий возделывания сельскохозяйственных культур / А.С. Кушнарев, В.М. Мацепуро. – М.: Всесоюзный ордена «Знак Почета» с.-х. институт заочного образования, 1986. – 56 с.

3. Романюк, Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: дис. … канд. техн. наук: 05.20.03; 05.20.01 / Романюк Николай Николаевич; Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2008. – 206 л.

4. Чигарев, Ю.В. Агротехническая повреждаемость почв при ударных нагрузках от эксплуатируемых сельскохозяйственных машин и орудий / Ю.В. Чигарев,

Н.Н. Романюк, Ю.В. Устиненко // Весці акадэм. аграр. навук Рэсп. Беларусь. – 1997. – № 3. – С. 68-70.

5. Влияние параметров ходовых систем колесных машин на изменение плотности почвы / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, И.С. Крук [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2021. – № 5 – С. 30-37.

6. Влияние числа осей колесных транспортно-тяговых машин на сопротивление качению / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда, В.Г. Кушнир // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 1 – С. 41-46.

7. Афанасьев, Н.И. Влияние уплотнения машинно-тракторными агрегатами на свойства, режимы почвы и урожай сельскохозяйственных культур: дерново-подзолистые почвы Белоруссии / Н.И. Афанасьев, И.И. Подобедов, А.Н. Орда // Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения. – М.: Наука, 1987. – С. 46-59.

8. Романюк, Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву мобильных энергосредств: монография / Н.Н. Романюк. – Минск: БГАТУ, 2020. – 200 с.

9. Влияние ходовых систем тракторов на уплотнение почвы / Н.Н. Романюк, И.С. Крук, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2024. – № 1. – С. 2-7.

10. Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. … д-ра техн. наук: 05.20.03 / Орда Алксандр Николаевич; Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 1997. – 269 л.

11. Кацыгин, В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы с.-х. механики. – Минск: Ураджай, 1964. – Т. 13. – С. 5-147.

12. Закономерности накопления повторных осадок почвы при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2014. – № 6. – С. 2-7.

13. Влияние количества осей ходовой системы мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа / И.Н. Шило, А.Н. Орда, Н.Н. Романюк [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 4. – С. 37-41.

14. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2016. – № 2. – С. 2-7.

15. Влияние многоосной ходовой системы машинно-тракторных агрегатов на плотность почвы / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – № 1 – С. 31-36.

16. Обоснование закономерностей деформирования почв различных агрофонов под воздействием колес / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 2. – С. 2-6.

17. Влияние почвенных условий эксплуатации на проходимость колесных машин / И.Н. Шило, Н.Н. Романюк, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2020. – № 1. – С. 2-5.

18. Влияние типа опорной поверхности на сопротивление качению колесных транспортно-тяговых средств / Н.Н. Романюк, И.С. Крук, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 6. – С. 2-7.

19. Обоснование параметров ходовых систем колесных тракторов с допустимым уровнем воздействия на почву / Н.Н. Романюк, И.С. Крук, А.Н. Орда [и др.] // Агропанорама. – 2025. – № 5. – С. 2-7.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.06.2026

“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).
Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.
Стоимость подписки на 2-е полугодие 2026 года: для индивидуальных подписчиков - 70,38 руб., ведомственная подписка - 72,39 руб.

УДК 631.348.45
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-9-18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ РАБОЧЕГО РАСТВОРА ПЕСТИЦИДОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ВЫЛЕТЕ ИЗ РАСПЫЛИТЕЛЯ С ТРАЕКТОРИЕЙ, БЛИЗКОЙ К ГОРИЗОНТАЛИ

Ю.В. Чигарев,
профессор каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ, докт. физ.-мат. наук, профессор

И.С. Крук,
проректор по научной работе БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Одними из основных элементов опрыскивателя являются распылители, тип конструкции и технологические параметры которых, наряду с состоянием окружающей среды, определяют качество внесения рабочих растворов пестицидов. При моделировании следует учитывать воздействие внешних факторов на изменение поведения капель в окружающей среде при уменьшении их размеров вследствие испарения, изменении траекторий падения в результате воздействия ветра и восходящих воздушных потоков. В данной статье получены зависимости для определения кинематических параметров движения капель переменной массы и радиуса с учетом состояния окружающей среды и физических свойств рабочего раствора пестицидов. Разработка новых конструкций и правильная эксплуатация существующих распылителей требуют знаний по оценке кинематических и физических свойств капель жидкости с момента их образования до обрабатываемых поверхностей целевого объекта.

Ключевые слова: капля, рабочий раствор, опрыскивание, распылитель, падение, движение, радиус, масса, скорость, положение, изменение.

One of the main components of a sprayer is the sprayer nozzles, the design type and technological parameters of which, along with the state of the environment, determine the quality of applying working solutions of pesticides. When modeling, it is necessary to take into account the impact of external factors on the change in the behavior of droplets in the environment when their size decreases due to evaporation, and the change in their fall trajectories due to the influence of wind and ascending air currents. This article presents dependencies for determining the kinematic parameters of the movement of droplets of variable mass and radius, taking into account the state of the environment and the physical properties of the working pesticide solution. The development of new designs and the proper operation of existing sprayers require knowledge of how to assess the kinematic and physical properties of liquid droplets from the moment they are formed until they reach the treated surfaces of the target object.

Keywords: droplet, working solution, spraying, sprayer nozzle, fall, movement, radius, mass, speed, position, change.

Введение

Эффективность внесения рабочих растворов средств химизации в растениеводстве, наряду с другими показателями, определяется равномерностью распределения препарата и густотой покрытия обрабатываемой поверхности. Данные качественные показатели зависят от размеров капель и закономерностей их падения до полного осаждения на объекте обработки.

При движении капель от распылителя к обрабатываемой поверхности сказывается существенное влияние состояния окружающей среды, поверхности поля, метеорологических и начальных условий формирования факела распыла на закономерности движения и осаждения капель. Диспергирование жидкости и движение капель в воздушной среде являются сложными взаимосвязанными процессами, закономерности протекания которых определяют большое количество управляемых и неуправляемых связанных между собой факторов. Оценить степень их влияния в полной мере не представляется возможным как при теоретическом моделировании, так и при проведении экспериментов в лабораторных и полевых условиях. В большинстве случаев их результаты могут существенно различаться.

Механизм осаждения капель рабочего раствора определяется закономерностями формирования и гидродинамической структурой воздушно-капельного потока, воздействием различных сил, взаимодействием капель между собой и окружающей средой, физико-химическими свойствами рабочего раствора и воз-

духа, наличием и движением восходящих потоков, возникающими инверсиями, состоянием обрабатываемой поверхности и другими факторами [1-6]. Моделирование движения капель в факеле распыла является сложной задачей, решение которой требует комплексного подхода, основанного на применении моделей, представляющих собой совокупность уравнений, описывающих зависимости между главными параметрами факелов распыла и состоянием окружающей среды. Испарение капель в условиях полевого опрыскивания – сложный физический процесс. Он происходит на трех этапах полета капель: при формировании факела распыленной жидкости, при их падении и осаждении, а также во время нахождения на поверхности обрабатываемого объекта. Опытами установлено, что при тонком распыле процесс испарения идет значительно быстрее, чем при крупном, так как меньшие капли обладают большей удельной поверхностью.

Процесс диспергирования рабочей жидкости обуславливают ее физико-механические свойства (вязкость, плотность, поверхностное натяжение), технологические параметры (тип, параметры и форма выходного сопла распылителя, давление в напорной жидкостной магистрали, рабочая скорость агрегата), определяемые распыливающими рабочими органами и настройками опрыскивающей аппаратуры, и состояние окружающей среды (влажность, плотность, атмосферное давление).

На скорость и время падения капель влияют температура и влажность воздуха, воздействие направленных воздушных потоков, в том числе и ветра, а также высота установки распылителя по отношению к обрабатываемому объекту [1-6]. При использовании стандартных щелевых распылителей образуются капли, медианно-массовый диаметр которых составляет 210-270 мкм, а инжекторных – 400-600 мкм. Это оказывает существенное влияние на закономерности процессов падения, взаимодействия и осаждения капель на целевом объекте, определяет величину их потерь вследствие испарения, сноса и скатывания на почву с листьев растений и сорняков [5].

Использование воды в качестве растворителя активного вещества препарата приводит к тому, что капли диаметром 100 мкм при температуре 32 °С, влажности воздуха 46 % и скорости ветра 1...2 м·с$^{-1}$ теряют от испарения 50 % массы [1; 3, 4]. Относительная скорость испарения капель удваивается, если относительная влажность воздуха снижается с 95 до 85 %, с 85 до 70 %, с 70 до 45 %, с 45 до 0 % или при каждом повышении температуры воздуха на 10 °С в пределах от 10 до 30 °С [1; 3; 6]. При этом происходит изменение траектории движения, увеличение проходимого пути и времени их нахождения в воздухе. Поэтому исследованиям дисперсности факела распыла, закономерностям осаждения капель рабочих растворов пестицидов с учетом состояния окружающей среды в настоящее время уделяется большое внимание.

Одной из малоизученных задач является уменьшение массы капель раствора в процессе выполнения технологической операции внесения рабочих растворов средств химизации. Оно происходит за счет теплообмена с воздушным потоком на пути от сопла распылителя до обрабатываемой поверхности. Определение некоторых кинематических параметров движения капель постоянной массы рабочего раствора пестицидов приведено в работах [1, 2; 7, 8]. Изучение движения тел переменной массы было начато в работах И.В. Мещерского [9] и в дальнейшем продолжено в ряде других исследований, связанных с различными физическими задачами [10-15]. Вопросы распыления и осаждения капель различных рабочих жидкостей рассматривались в научных работах Броунштейна Б.И., Вульфа Т., Гордеенко О.В., Дмитрачкова В.П., Келбалиева Г.И., Клочкова А.В., Кот Т.П., Лысова А.К., Маркевича А.Е., Нагорского И.С., Никитина Н.В., Ньюттенса Д., Ольшевского В.П., Рогова В.П., Севрикова В.В., Спиридонова Ю.Я., Степука Л.Я., Фишбейна Г.А., Шестакова В.Г. и других. Фундаментальные положения, определяющие кинетику испарения капель жидкости, отражены в работе Б.И. Срезневского [16]. Исследованиям процесса испарения капель различных жидкостей в движущейся и неподвижной газовой среде посвящено большое количество научных работ [17-24]. В связи с возрастающими экологическими требованиями и высокой токсичностью пестицидов проблеме потерь капель рабочих растворов вследствие сноса и испарения в настоящее время уделяется повышенное внимание в растениеводстве и сельскохозяйственном машиностроении.

Цель работы – разработать теоретические основы, позволяющие оценить изменение параметров движения капли рабочего раствора пестицидов и ее геометрических размеров в зависимости от начальных условий: скорости и радиуса капли, ее физических свойств и свойств окружающей среды.

Рассмотрим движение капли или элемента струи жидкости массой $m_к$, выброшенной из сопла распылителя в окружающую безветренную среду с начальной горизонтальной скоростью $v_{кх_0}$. Будем считать форму капли шарообразной с начальным радиусом $r_{к_0}$. Примем, что во время полета на каплю действуют: сила лобового аэродинамического сопротивления воздуха $F_с$ и сила тяжести $G_к$ [1, 2; 6-8; 13-15; 18]. Предположим, что сила лобового сопротивления направлена по касательной к траектории полета в сторону, противоположную направлению движения, и является заданной функцией скорости капли $v_к$:

$$F_с = -k_\lambda v_к^2 = -\frac{\xi \rho_в S_к}{2} v_к^2, \qquad (1)$$

где $k_\lambda = \frac{\xi \rho_в S_к}{2}$;

ξ – безразмерный коэффициент сопротивления движению капли;

$\rho_в$ – плотность среды, кг·м$^{-3}$;

$S_к$ – площадь поперечного сечения капли, м^2.

Сила тяжести, действующая на каплю, определяется по формуле

$$G_к = m_к g,$$

где g – ускорение свободного падения, м·с$^{-2}$.

Перемещение капли в направлении движения опрыскивателя считаем незначительным. Тогда параметры движения капли можно определять в плоскости xOz, начало которой поместим в точку вылета капли из сопла распылителя O (рис. 1).

Уравнения движения капли относительно осей запишем в виде [1, 2; 6-8; 13]

$$Ox:\ m_к \cdot \frac{\mathrm{d}v_{кx}}{\mathrm{d}t} = -k_\lambda v_{кx}^2; \qquad (2)$$

$$Oz:\ m_к \cdot \frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t} = m_к \cdot g - k_\lambda v_{кz}^2, \qquad (3)$$

где $v_{кx}$, $v_{кz}$ – составляющие скорости движения капли вдоль осей Ox и Oz:

$$v_{кx} = v_к \cdot \sin\gamma_р;\ v_{кz} = v_к \cdot \cos\gamma_р.$$

Разделим уравнения (2) и (3) на $m_к$, получим

$$\frac{\mathrm{d}v_{кx}}{\mathrm{d}t} = -\frac{k_\lambda}{m_к} \cdot v_{кx}^2;$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t} = g - \frac{k_\lambda}{m_к} \cdot v_{кz}^2.$$

Далее считаем, что масса капли $m_к$ за время полета меняется, т.е. $m_к \neq$ const. Однако не все компоненты, составляющие массу $m_к = \rho_к V_к$ ($\rho_к$ – плотность рабочей жидкости, $V_к$ – объем капли), могут быть величинами переменными. Так, для некоторых рабочих растворов пестицидов при изменении объема капли $V_к$ плотность капли $\rho_к$ не изменяется. Преобразуем зависимости к виду

$$\frac{\mathrm{d}v_{кx}}{\mathrm{d}t} = -\frac{\xi\rho_в S_к}{2\rho_к V_к} \cdot v_{кx}^2;$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t} = g - \frac{\xi\rho_в S_к}{2\rho_к V_к} \cdot v_{кz}^2.$$

Учитывая шарообразную форму капли, ее объем $V_к = (3/4)\pi r^3_к$, площадь сечения $S_к = \pi r^2_к$ ($r_к$ – радиус капли) и обозначив через $C_V = \xi\rho_в/\rho_к$, тогда уравнения движения можно привести к виду

$$\frac{\mathrm{d}v_{кx}}{\mathrm{d}t} = -\frac{3}{8}\frac{C_V}{r_к} \cdot v_{кx}^2; \qquad (4)$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t} = g - \frac{3}{8}\frac{C_V}{r_к} \cdot v_{кz}^2. \qquad (5)$$

Предположим, что радиус капли $r_к$ с течением времени убывает по закону [17]

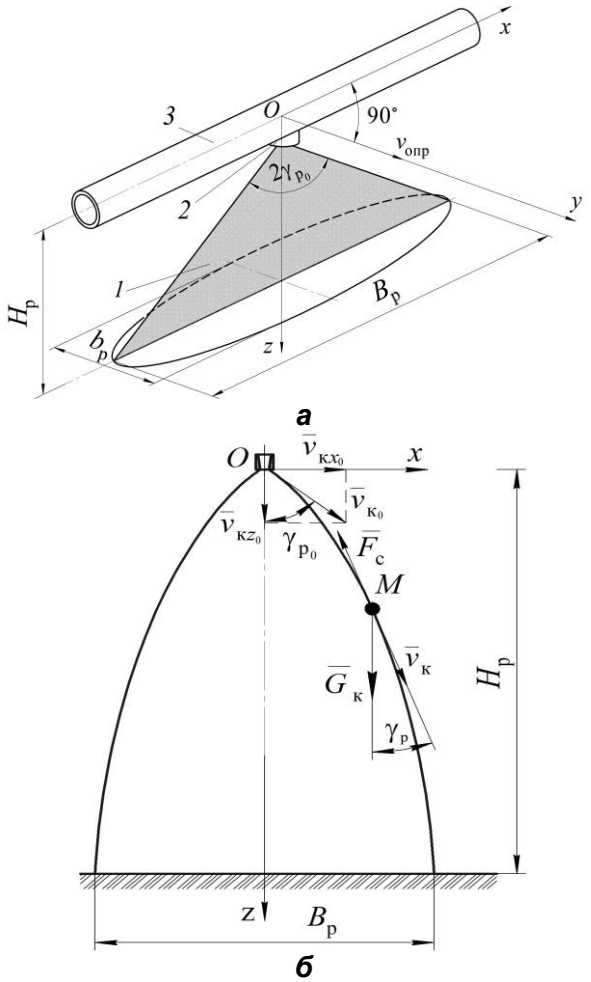


Рисунок 1. Объемная (а) и плоскостная (б) расчетные схемы движения капли жидкости при вылете из сопла вертикально установленного распылителя: 1 – факел распыла; 2 – распылитель; 3 – штанга; $H_р$ – высота установки распылителя над обрабатываемым объектом; $B_р$ x $b_р$ – параметры основания факела распыла; $v_{опр}$ – направление движения опрыскивателя

$$r_к = \frac{r_{к_0}}{1 + \psi t}, \qquad (6)$$

где $r_{к_0}$ – радиус капли, который соответствует времени $t = 0$, т.е. начальному объему при образовании капли в результате распада струи, вылетающей из сопла распылителя;

Ψ – интенсивность убывания радиуса капли, с$^{-1}$.

Из работ [1, 2; 7] имеем

$$\frac{\mathrm{d}v_к}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v_к}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{\mathrm{d}r_к}{\mathrm{d}r_к} = \frac{\mathrm{d}v_к}{\mathrm{d}r_к} \cdot \frac{\mathrm{d}r_к}{\mathrm{d}t} = -\frac{r_к^2\psi}{r_{к_0}} \cdot \frac{\mathrm{d}v_к}{\mathrm{d}r_к}. \qquad (7)$$

Тогда уравнения (4) и (5) с учетом уравнения (7) преобразуются к виду

$$-\frac{r_к^2\psi}{r_{к_0}} \cdot \frac{\mathrm{d}v_{кx}}{\mathrm{d}r_к} + \frac{3}{8}\frac{C_V}{r_к} \cdot v_{кx}^2 = 0; \qquad (8)$$

$$-\frac{r_к^2\psi}{r_{к_0}}\cdot\frac{dv_{кz}}{dr_к}+\frac{3}{8}\frac{C_V}{r_к}\cdot v_{кz}^2=g, \quad (9)$$

которые перепишем как

$$-\frac{dv_{кx}}{dr_к}+\frac{3}{8}\frac{r_{к_0}C_V}{r_к^3\psi}\cdot v_{кx}^2=0; \quad (10)$$

$$-\frac{dv_{кz}}{dr_к}+\frac{3}{8}\frac{r_{к_0}C_V}{r_к^3\psi}\cdot v_{кz}^2=\frac{gr_{к_0}}{r_к^2\psi}. \quad (11)$$

Особенный аналитический и практический интерес представляют зависимости изменения кинематических и физических характеристик капли при ее полете относительно осей координат. Обозначим

$$k_1=\frac{3}{8}\cdot\frac{r_{к_0}C_V}{\psi};\ k_2=\frac{gr_{к_0}}{\psi}. \quad (12)$$

Рассмотрим движение капли вдоль оси *Ox*. Уравнение (10) с учетом обозначений (12) примет следующий вид:

$$\frac{dv_{кx}}{dr_к}=\frac{k_1}{r_к^3}\cdot v_{кx}^2,\ \text{или}\ \frac{dv_{кx}}{v_{кx}^2}=k_1\frac{dr_к}{r_к^3}. \quad (13)$$

После интегрирования получим

$$-\frac{1}{v_{кx}}=-\frac{k_1}{2r_к^2}+C_1, \quad (14)$$

где C_1 – постоянная интегрирования. При начальных условиях $t = 0$, $r_к = r_{к_0}$, $v_{кx} = v_{кx_0}$, получим

$$C_1=\frac{k_1}{2r_{к_0}^2}-\frac{1}{v_{кx_0}}. \quad (15)$$

Равенство (14) с учетом (15) запишем

$$-\frac{1}{v_{кx}}=-\frac{k_1}{2r_к^2}+C_1=-\frac{k_1}{2r_к^2}+\frac{k_1}{2r_{к_0}^2}-\frac{1}{v_{кx_0}}. \quad (16)$$

Из равенства (16) найдем скорость $v_{кx}$

$$v_{кx}=\frac{v_{кx_0}r_{к_0}^2r_к^2}{2r_{к_0}^2r_к^2+v_{кx_0}k_1(r_{к_0}^2-r_к^2)}. \quad (17)$$

Из равенства (16) с учетом зависимостей (6) и (12) получим выражение для изменения радиуса капли при ее полете относительно оси *Ox* в зависимости от текущей и начальной скоростей, параметров аэродинамического сопротивления, начального радиуса $r_{к_0}$, плотностей внешней среды и капли

$$r_к=\sqrt{\frac{3C_Vr_{к_0}^3v_{кx_0}v_{кx}}{16\psi r_{к_0}^2(v_{кx_0}-v_{кx})+3v_{кx}v_{кx_0}C_Vr_{к_0}}}. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что при полете капли за счет испарения ее радиус уменьшается. При $v_{кx} = 0$ происходит полное испарение капли, т.е. $r_к = 0$ или она движется вертикально вниз. Предположим, что при достижении скорости $v_{кx} = v_{кx_0}/2$, капля за счет испарения приобретает размеры, соответствующие $r_к = r_{к_0}/2$, тогда из выражения (18) можно получить формулу для коэффициента интенсивности убывания радиуса

$$\psi=\frac{9C_Vv_{кx_0}}{16r_{к_0}}. \quad (19)$$

Формула (19) получена для частного случая оценки движения капли вдоль оси *Ox*. Подставив формулу (19) в выражение (6), получим закон убывания радиуса капли в зависимости от плотностей внешней среды и рабочей жидкости, начальной скорости движения вдоль оси *Ox* и времени.

$$r_к=\frac{16r_{к_0}^2}{16r_{к_0}+9C_Vv_{кx_0}t}=\frac{16r_{к_0}^2\rho_к}{16r_{к_0}\rho_к+9\xi\rho_вv_{кx_0}t}. \quad (20)$$

Можем записать следующую зависимость:

$$m_к=\frac{4}{3}\rho_к\pi r_к^3. \quad (21)$$

Откуда

$$r_к^2=\sqrt[3]{\frac{9m_к^2}{16\rho_к^2\pi^2}}. \quad (22)$$

Выражение (6) возведем в квадрат, получим

$$r_к^2=\frac{r_{к_0}^2}{(1+\psi t)^2}. \quad (22')$$

Приравнивая правые части равенств (22) и (22'), и учитывая, что $r_{к_0}^2=\sqrt[3]{\frac{9m_{к_0}^2}{16\rho_к^2\pi^2}}$ ($m_{к_0}$ – начальная масса капли, соответствующая $t = 0$), получим формулу

$$m_к^2=m_{к_0}^2\frac{1}{(1+\psi t)^6}.$$

После ряда преобразований найдем

$$m_к=m_{к_0}\frac{1}{(1+\psi t)^3}=\frac{m_{к_0}}{1+3\psi t+3\psi^2t^2+\psi^3t^3}.$$

Учитывая только линейные члены, получим

$$m_к=\frac{m_{к_0}}{1+3\psi t}. \quad (23)$$

При принятом законе убывания радиуса капли с течением времени (6) и принятыми условиями, что при $v_{кx} = v_{кx_0}/2$ радиус капли соответствует $r_к = r_{к_0}/2$, с учетом уравнения (19) имеем

$$m_{к} = \rho_{к} V_{к} = \frac{m_{к_0}}{1 + \dfrac{3 \cdot 3 C_v v_{кх_0} t}{16 r_{к_0}}} =$$

$$= \frac{16 r_{к_0} m_{к_0}}{16 r_{к_0} + 9 C_v v_{кх_0} t}. \qquad (24)$$

Таким образом, при вышеприведенных условиях изменение компонентов $\rho_к$, $V_к$ массы капли с течением времени зависит от начальных параметров капли, физических свойств капли и среды, начальной скорости $v_{кх0}$ вдоль горизонтальной оси.

Предположим, что объем $V_к$, соответствующий радиусу $r_к = r_{к0}/2$, будет $V_{к_0} = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{r_{к_0}}{2}\right)^3 = \frac{1}{6}\pi r_{к_0}^3$.

В этом случае текущая плотность $\rho_к$ из выражения (24) будет

$$\rho_{к} = \frac{16 m_{к_0} r_{к_0}}{(16 r_{к_0} + 9 C_v v_{кх_0} t) V_{к}} =$$

$$= \frac{96 m_{к_0}}{(16 r_{к_0} + 9 C_v v_{кх_0} t)\pi r_{к_0}^2}. \qquad (25)$$

Скорость изменения массы капли получим, взяв производную от выражения (24)

$$\frac{\mathrm{d}m_{к}}{\mathrm{d}t} = \frac{-144 r_{к_0} m_{к_0} C_v v_{кх_0}}{(16 r_{к_0} + 9 C_v v_{кх_0} t)^2} = -\frac{9 m_{к_0} C_v v_{кх_0}}{16 r_{к_0} + 18 C_v v_{кх_0} t}.$$

Вернемся к уравнению (16), которое запишем в следующем виде:

$$\frac{1}{v_{кх}} = \frac{k_1}{2}\left(\frac{1}{r_к^2} - \frac{1}{r_{к_0}^2}\right) + \frac{1}{v_{кх_0}}, \qquad (26)$$

или

$$\mathrm{d}t = \frac{k_1}{2}\left(\frac{1}{r_к^2} - \frac{1}{r_{к_0}^2}\right)\mathrm{d}x + \frac{1}{v_{кх_0}}\mathrm{d}x.$$

Так как

$$r_к = \frac{r_{к_0}}{1 + \psi t}, \quad r_к^2 = \frac{r_{к_0}^2}{(1 + \psi t)^2}.$$

Имеем

$$\mathrm{d}t = \left[\frac{k_1}{2}\left(\frac{(1 + \psi t)^2}{r_{к_0}^2} - \frac{1}{r_{к_0}^2}\right) + \frac{1}{v_{кх_0}}\right]\mathrm{d}x =$$

$$= \left[\frac{k_1}{2 r_{к_0}^2}\left[(1 + \psi t)^2 - 1\right] + \frac{1}{v_{кх_0}}\right]\mathrm{d}x.$$

Или

$$\int \frac{\mathrm{d}t}{\dfrac{k_1}{2 r_{к_0}^2}\left[(1 + \psi t)^2 - 1\right] + \dfrac{1}{v_{кх_0}}} = \int \mathrm{d}x. \qquad (27)$$

Обозначим через $A = \frac{k_1}{2 r_{к_0}^2}$, $B = \frac{1}{v_{кх_0}}$, тогда выражение (27) примет следующий вид:

$$\int \frac{\mathrm{d}t}{A((1 + \psi t)^2 - 1) + B} = \int \mathrm{d}x. \qquad (28)$$

Сделаем замену

$$1 + \psi t = Z.$$

Откуда

$$t = \frac{Z - 1}{\psi}, \text{ или } \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}Z} = \frac{1}{\psi}, \ \mathrm{d}t = \frac{1}{\psi}\mathrm{d}Z.$$

Тогда левая часть уравнения (28) преобразуется к виду

$$\frac{1}{\psi}\int \frac{\mathrm{d}Z}{AZ^2 - A + B} = \frac{1}{\psi}\int \frac{\mathrm{d}Z}{AZ^2 - D} = \frac{1}{\psi A}\int \frac{\mathrm{d}Z}{Z^2 - \dfrac{D}{A}},$$

где $D = A - B = \frac{k_1}{2 r_{к_0}^2} - \frac{1}{v_{кх_0}}$.

Обозначим $D / A = N^2$

или

$$N^2 = \frac{\left(\dfrac{k_1}{2 r_{к_0}^2} - \dfrac{1}{v_{кх_0}}\right) 2 r_{к_0}^2}{k_1}.$$

Проинтегрируем выражение для $N \neq 0$

$$\frac{1}{\psi A}\int \frac{\mathrm{d}Z}{Z^2 - N^2} = -\frac{1}{\psi A}\int \frac{\mathrm{d}Z}{N^2 - Z^2} =$$

$$= -\frac{1}{2\psi A}\ln\frac{N + Z}{N - Z} + C_2. \qquad (29)$$

Подставим выражение (29) в (28), после интегрирования правой части (28) и вернувшись к переменной t, получим

$$-\frac{r_{к_0}^2}{\psi k_1}\ln\frac{\sqrt{\dfrac{2 r_{к_0}^2}{k_1}\left(\dfrac{k_1}{2 r_{к_0}^2} + \dfrac{1}{v_{кх_0}}\right)} + 1 + \psi t}{\sqrt{\dfrac{2 r_{к_0}^2}{k_1}\left(\dfrac{k_1}{2 r_{к_0}^2} + \dfrac{1}{v_{кх_0}}\right)} - 1 - \psi t} =$$

$$= x + C_2, \qquad (30)$$

где C_2 – постоянная интегрирования.

Обозначим $\sqrt{1+\frac{2r_{к_0}^2}{k_1 v_{кx_0}}} = J$ и определим C_2 из начальных условий при $t = 0$, $x_0 = 0$

$$C_2 = -\frac{r_{к_0}^2}{\psi k_1}\ln\frac{J+1}{J-1}. \quad (31)$$

Подставим равенство (31) в (30), получим

$$-\frac{r_{к_0}^2}{\psi k_1}\ln\frac{J+1+\psi t}{J-1-\psi t} = -\frac{r_{к_0}^2}{\psi k_1}\ln\frac{J+1}{J-1} + x.$$

Откуда получим уравнение движения капли относительно оси x

$$x = \frac{r_{к_0}^2}{\psi k_1}\ln\left[\frac{J+1}{J-1}\cdot\frac{J-1-\psi t}{J+1+\psi t}\right]. \quad (32)$$

Преобразуем равенство (32) и определим время горизонтального полета капли

$$\frac{J+1}{J-1}\cdot\frac{J-1-\psi t}{J+1+\psi t} = e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x}.$$

Далее уравнение перепишем так

$$\frac{J-1-\psi t}{J+1+\psi t} = \frac{J-1}{J+1}e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x},$$

или

$$J-1-\psi t = \frac{J-1}{J+1}(J+1)e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} + \frac{J-1}{J+1}\psi t e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x}.$$

Или

$$t\left(\frac{J-1}{J+1}\psi e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} + \psi\right) = -(J-1)e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} - 1 + J.$$

Откуда время полета капли в зависимости от координаты x будет

$$t = \frac{(1-e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x})(J^2-1)}{(J-1)\psi e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} + \psi(J+1)}.$$

С учетом, что $J = \sqrt{1+\frac{2r_{к_0}^2}{k_1 v_{кx_0}}}$, получим

$$t = -\frac{\frac{2r_{к_0}^2}{k_1 v_{кx_0}}\left(e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} - 1\right)}{\psi\left[\sqrt{1+\frac{2r_{к_0}^2}{k_1 v_{кx_0}}}\left(e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} + 1\right) - \left(e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} - 1\right)\right]}. \quad (33)$$

Выражение (26) перепишем в следующем виде:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{k_1}{2}\left(\frac{1}{r_к^2} - \frac{1}{r_{к_0}^2}\right) + \frac{1}{v_{кx_0}},$$

или

$$1 = \left[\frac{k_1}{2}\left(\frac{1}{r_к^2} - \frac{1}{r_{к_0}^2}\right) + \frac{1}{v_{кx_0}}\right]\frac{dx}{dt}. \quad (34)$$

Воспользуемся представлением

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt}\cdot\frac{dr_к}{dr_к} = \frac{dx}{dr_к}\cdot\frac{dr_к}{dt} = \frac{dx}{dr_к}\cdot\frac{r_к^2\psi}{r_{к_0}}. \quad (35)$$

Подставим выражение (35) в (34), получим уравнение

$$\frac{r_{к_0}}{r_к^2\psi} = \left[\frac{k_1}{2}\left(\frac{1}{r_к^2} - \frac{1}{r_{к_0}^2}\right) + \frac{1}{v_{кx_0}}\right]\frac{dx}{dr_к},$$

которое преобразуем к виду

$$\frac{r_{к_0}dr_к}{r_к^2\psi\left[\frac{k_1}{2r_к^2} - \frac{k_1}{2r_{к_0}^2} + \frac{1}{v_{кx_0}}\right]} = dx.$$

Или

$$\frac{dr_к}{\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}} - \frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)\cdot\left(r_к^2 - D_1^2\right)} = \frac{1}{r_{к_0}}dx,$$

где $D_1^2 = \frac{k_1\psi}{2}\cdot\frac{2r_{к_0}^2 v_{кx_0}}{(2r_{к_0}^2\psi - v_{кx_0}k_1\psi)} = \frac{k_1 r_{к_0}^2 v_{кx_0}}{2r_{к_0}^2 - k_1 v_{кx_0}}$.

Или

$$-\frac{dr_к}{D_1^2 - r_к^2} = \frac{\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}} - \frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)}{r_{к_0}}dx. \quad (36)$$

Проинтегрируем данное выражение

$$-\int\frac{dr_к}{D_1^2 - r_к^2} = \frac{1}{r_{к_0}}\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}} - \frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)\int dx.$$

Получим

$$-\frac{1}{2D_1}\ln\left|\frac{D_1+r_к}{D_1-r_к}\right|=\frac{1}{r_{к_0}}\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}}-\frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)x+C_3, \quad (37)$$

где C_3 – постоянная интегрирования.

При начальных условиях $x_0 = 0$, $r_к = r_{к0}$

$$C_3=-\frac{1}{2D_1}\ln\left|\frac{D_1+r_{к_0}}{D_1-r_{к_0}}\right|. \quad (38)$$

Подставив равенство (38) в (37), придем к выражению

$$\frac{1}{2D_1}\left[\ln\left|\frac{D_1+r_{к_0}}{D_1-r_{к_0}}\right|-\ln\left|\frac{D_1-r_к}{D_1+r_к}\right|\right]=$$

$$=\frac{1}{r_{к_0}}\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}}-\frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)x,$$

которое перепишем так

$$\ln\left[\left|\frac{(D_1+r_{к_0})}{(D_1-r_{к_0})}\right|\cdot\left|\frac{(D_1-r_к)}{(D_1+r_к)}\right|\right]=$$

$$=\frac{2D_1}{r_{к_0}}\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}}-\frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)x,$$

или

$$\frac{\left|(D_1+r_{к_0})\right|}{\left|(D_1-r_{к_0})\right|}\cdot\frac{\left|(D_1-r_к)\right|}{\left|(D_1+r_к)\right|}=e^{(W\cdot x)}, \quad (39)$$

где $W=\frac{2D_1}{r_{к_0}}\left(\frac{\psi}{v_{кx_0}}-\frac{k_1\psi}{2r_{к_0}^2}\right)$. (40)

Далее равенство (39) запишем в виде

$$\frac{\left|D_1-r_к\right|}{\left|D_1+r_к\right|}=\frac{\left|D_1-r_{к_0}\right|}{\left|D_1+r_{к_0}\right|}e^{(W\cdot x)}, \quad (41)$$

или

$$r_к\left(\frac{\left|D_1-r_{к_0}\right|}{\left|D_1+r_{к_0}\right|}e^{W\cdot x}+1\right)=D_1\left(1-\frac{\left|D_1-r_{к_0}\right|}{\left|D_1+r_{к_0}\right|}e^{(W\cdot x)}\right).$$

Откуда получим зависимость изменения радиуса капли от координаты x, т.е. относительно горизонтального перемещения

$$r_к=\frac{D_1\left(1-\frac{\left|D_1-r_{к_0}\right|}{\left|D_1+r_{к_0}\right|}e^{(W\cdot x)}\right)}{\left(\frac{\left|D_1-r_{к_0}\right|}{\left|D_1+r_{к_0}\right|}e^{(W\cdot x)}+1\right)}. \quad (42)$$

Таким образом, формулы (18) и (42) определяют изменение радиуса капли в зависимости от скорости полета и перемещения ее вдоль оси Ox при начальных условиях ее вылета $x_0 = 0$, $v_{кx0} \neq 0$ при $t = 0$.

Рассмотрим полет капли вдоль оси Oz, для чего уравнение (5) представим в следующем виде:

$$\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t}=g-k_3v_{кz}^2, \quad (43)$$

где $k_3=\frac{3}{8}\frac{C_V}{r_к}$.

Уравнение (43) запишем как

$$\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t}=k_3\left(\frac{g}{k_3}-v_{кz}^2\right),$$

или

$$\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{\mathrm{d}t}=k_3\left(k_4^2-v_{кz}^2\right), \quad (44)$$

где $k_4^2=\frac{g}{k_3}$

Для условия $k_4^2 > v_{кz}^2$ разделим переменные и проинтегрируем

$$\int\frac{\mathrm{d}v_{кz}}{k_4^2-v_{кz}^2}=k_3\int\mathrm{d}t.$$

Решение данного уравнения при начальных условиях $t = 0$, $v_{кz0} = 0$ будет иметь следующий вид [7; 13]:

$$v_{кz}=\frac{k_4\left(e^{2k_4k_3t}-1\right)}{e^{2k_4k_3t}+1}. \quad (45)$$

Из формулы (45), учитывая, что $k_4=\sqrt{\frac{g}{k_3}}=\sqrt{\frac{8gr_к}{3C_V}}$, запишем

$$v_{кz}=\left(\sqrt{\frac{8gr_к}{3C_V}}\right)\frac{\left(e^{2k_4k_3t}-1\right)}{(e^{2k_4k_3t}+1)}.$$

Или

$$v_{кz}=\left(\sqrt{\frac{8gr_к}{3C_V}}\right)\frac{\left(e^{wt}-1\right)}{(e^{wt}+1)},$$

где $w=2k_4k_3=2\sqrt{\frac{g}{k_3}}k_3=2\sqrt{\frac{8gr_к}{3C_v}}\cdot\frac{3C_v}{8r_к}$.

Возведем в квадрат

$$v_{кz}^2 = \frac{8gr_к}{3C_V}\left(\frac{e^{(w\cdot t)}-1}{e^{(w\cdot t)}+1}\right)^2.$$

Откуда получим изменение радиуса капли в зависимости от скорости вдоль оси *Oz* при начальных условиях $v_{кz_0} = 0$

$$r_к = \frac{v_{кz}^2(e^{(w\cdot t)}+1)^2\cdot 3C_V}{8g(e^{(w\cdot t)}-1)^2}. \quad (46)$$

Найдем закон движения капли вдоль оси *Oz*, представив в формуле (45) скорость $v_{кz} = \mathrm{d}z/\mathrm{d}t$

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} = \frac{k_4\left(e^{k_4k_3t}-1\right)}{e^{k_4k_3t}+1}. \quad (47)$$

При начальных условиях $t = 0$, $z_0 = 0$, после интегрирования получим уравнение

$$z = \frac{1}{k_3}\ln\left|\frac{e^{2k_3k_4t}+1}{2}\right| - k_4t. \quad (48)$$

Запишем выражение (48) в виде

$$tk_3k_4 = -zk_3 + \ln\left|\frac{e^{2k_3k_4t}+1}{2}\right|.$$

Обозначим

$$T = 2k_3k_4t.$$

Тогда

$$\frac{1}{2}T = -zk_3 + \ln\left|\frac{e^T+1}{2}\right| =$$

$$= -zk_3 + \ln\left(e^T+1\right) - \ln 2. \quad (49)$$

Разложим в ряд Маклорена функцию e^T

$$e^T = 1 + \frac{T}{1!} + \frac{T^2}{2!} + \ldots \quad (50)$$

Подставим в выражение (49) только линейные члены разложения, имеем

$$\frac{1}{2}\cdot 2k_3k_4t = -zk_3 + \ln 2\cdot\left(k_3k_4t+1\right) - \ln 2.$$

Или с учетом T

$$k_3k_4t = -zk_3 + \ln\left(k_3k_4t+1\right) + \ln 2 - \ln 2 =$$
$$= -zk_3 + \ln\left(k_3k_4t+1\right). \quad (51)$$

Разложим в ряд Маклорена выражение

$$\ln\left(k_3k_4t+1\right) = k_3k_4t - \frac{\left(k_3k_4t\right)^2}{2} + \ldots \quad (52)$$

При учете в уравнении (51) только линейных членов разложения (52) будем иметь

$$k_3k_4t = -zk_3 + k_3k_4t.$$

Откуда

$$-zk_3 = 0.$$

Ограничившись в выражении (52) двумя первыми членами ряда, уравнение (51) примет следующий вид:

$$k_3k_4t = -zk_3 + k_3k_4t + \frac{\left(k_3k_4t\right)^2}{2}.$$

Или

$$2zk_3 = k_3^2k_4^2t^2. \quad (53)$$

Откуда из (53)

$$t = \sqrt{\frac{2zk_3}{k_3^2k_4^2}}. \quad (54)$$

В уравнении (33) разложим функцию $e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x}$ в ряд

$$e^{\frac{\psi k_1}{r_{к_0}^2}x} = 1 + \frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2!r_{к_0}^4} + \ldots$$

Подставим данные разложения в выражение (33) и, учитывая первые три члена, получим

$$t = -\left(\frac{2r_{к_0}^2}{k_1v_{кx_0}}\left(\frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{к_0}^4}\right)\right)\times$$

$$\times\left\{\psi\left\{\sqrt{1+\frac{2r_{к_0}^2}{k_1v_{кx_0}}\left(\frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{к_0}^4} + 2\right)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \left(\frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{к_0}^4}\right)\right]\right\}^{-1}. \quad (55)$$

Приравнивая правые части равенств (54) и (55), получим уравнение траектории движения капли

$$\sqrt{\frac{2zk_3}{k_3^2k_4^2}} = -\left\{\frac{2r_{к_0}^2}{k_1v_{кx_0}}\left(\frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{к_0}^4}\right)\right\}\times$$

$$\times\left\{\psi\left[\sqrt{1+\frac{2r_{к_0}^2}{k_1v_{кx_0}}\left(\frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{к_0}^4} + 2\right)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \left(\frac{\psi k_1x}{r_{к_0}^2} + \frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{к_0}^4}\right)\right]\right\}^{-1}.$$

Или

$$\sqrt{\frac{2z}{k_3k_4^2}}=-\left[\frac{2}{v_{\text{кx}_0}}\left(x+\frac{\psi k_1x^2}{2r_{\text{к}_0}^2}\right)\right]\times$$

$$\times\left[\sqrt{1+\frac{2r_{\text{к}_0}^2}{k_1v_{\text{кx}_0}}}\left(\frac{\psi k_1x}{r_{\text{к}_0}^2}+\frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{\text{к}_0}^4}+2\right)-\right.$$

$$\left.-\left(\frac{\psi k_1x}{r_{\text{к}_0}^2}+\frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{\text{к}_0}^4}\right)\right]^{-1}.$$

Возведем обе части равенства в квадрат, получим

$$\frac{2z}{k_3k_4^2}=\left(-\frac{\frac{2}{v_{\text{кx}_0}}\left(x+\frac{\psi k_1x^2}{2r_{\text{к}_0}^2}\right)}{\sqrt{1+\frac{2r_{\text{к}_0}^2}{k_1v_{\text{кx}_0}}}\left(\frac{\psi k_1x}{r_{\text{к}_0}^2}+\frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{\text{к}_0}^4}+2\right)-\left(\frac{\psi k_1x}{r_{\text{к}_0}^2}+\frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{\text{к}_0}^4}\right)}\right)^2.$$

Откуда после несложных преобразований получим уравнение траектории движения капли

$$z=\left[2k_3k_4^2\left(x+\frac{\psi k_1x^2}{2r_{\text{к}_0}^2}\right)^2\right]\times$$

$$\times\left[v_{\text{кx}_0}^2\left(\sqrt{1+\frac{2r_{\text{к}_0}^2}{k_1v_{\text{кx}_0}}}\times\right.\right.$$

$$\times\left(\frac{\psi k_1x}{r_{\text{к}_0}^2}+\frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{\text{к}_0}^4}+2\right)-$$

$$\left.\left.-\left(\frac{\psi k_1x}{r_{\text{к}_0}^2}+\frac{\left(\psi k_1x\right)^2}{2r_{\text{к}_0}^4}\right)\right)^2\right]^{-1}. \qquad (56)$$

Как следует из принятых обозначений $\psi=\frac{9C_V\nu_{\text{кx}_0}}{16r_{\text{к}_0}}$, $k_1=\frac{3}{8}\cdot\frac{r_{\text{к}_0}C_V}{\psi}$, $k_3=\frac{3}{8}\frac{C_V}{r_{\text{к}}}$, $k_4^2=\frac{g}{k_3}$, траектория зависит от заданных начальных условий плотностей рабочего раствора пестицидов и окружающей среды, силы сопротивления движению капли, начального радиуса капли.

Заключение

Проведены аналитические исследования движения капли рабочего раствора пестицидов в плоскости *xOz* при воздействии силы тяжести, силы сопротивления в условиях постоянной температуры окружающей среды, вызывающей уменьшение ее радиуса. Рассмотрен случай, когда начальная скорость капли при распаде струи жидкости параллельна горизонтальной составляющей.

Получены уравнения скоростей падения капли вдоль осей *Ox* и *Oz*, которые учитывают начальную скорость, начальный и текущий радиус, физические свойства капли и окружающей среды. Получено уравнение уменьшения радиуса капли в зависимости от изменения параметров ее полета относительно оси *Ox*. При определенных условиях движения капли, связанных с ее скоростью и размерами, получен коэффициент интенсивности убывания капли, который зависит от начальных размеров капли, начальной скорости движения, начальных плотностей капли и окружающей среды, свойств сопротивления движению капли.

Получено выражение для определения текущей плотности капли, которая определяется ее начальной массой, начальных радиуса, скорости, плотностей капли и окружающей воздушной среды, а также времени.

Получены уравнения движения капли относительно осей *Ox* и *Oz* плоской системы координат, которые позволяют выполнить анализ падения капель относительно каждой из осей, учитывая изменения их физических свойств и геометрических размеров. Для заданных начальных условий получено уравнение траектории полета капли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крук, И.С. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей / И.С. Крук, Т.П. Кот, О.В. Гордеенко. – Минск: БГАТУ, 2015. – 284 с.

2. 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. акад. – Горки, 2004. – 169 л.

3. Защита растений в устойчивых системах землепользования: в 4 кн. / Под общ. ред. Д. Шпаара. – Минск: Орех, 2004. – Кн. 4. – 374 с.

4. Клочков, А.В. Механизация химической защиты растений: монография / А.В. Клочков, А.Е. Маркевич. – Горки: БГСХА, 2008. – 228 с.

5. Крук, И.С. Комплексный подход к аппликации рабочих растворов пестицидов в растениеводстве / И.С. Крук // Агропанорама. – 2026. – № 3 (175). – С. 2-8.

6. Крук, И.С. Особенности моделирования процесса падения капель при внесении рабочих растворов пестицидов полевыми штанговыми опрыскивателями / И.С. Крук // Агропанорама. – 2025. – № 3 (169). – С. 2-10.

7. Математическое моделирование падения капли пестицида при химической защите посевов / Ю.С. Биза [и др.] // Агропанорама. – 2013. – № 3 (97). – С. 9-11.

8. Методика инженерного расчета кинематических параметров движения капель рабочего раствора пестицидов в воздушной среде / О.В. Гордеенко [и др.] // Агропанорама. – 2011. – № 6. – С. 6-10.

9. Мещерский, И.В. Механика тел переменной массы. Избранные труды / И.В. Мещерский. – М.: Юрайт, 2017. – 233 с.

10. Динамика капель диспергированной струи в поперечном потоке газа / О.В. Долгушина [и др.] // Вестник ЧГУ. – 2012. – Вып. 14, № 30 (284). – С. 26-31.

11. Гурьяшкин, Л.П. Испарение и динамика капель азота в воздухе / Л.П. Гурьяшкин, А.Л. Стасенко // Ученые записки ЦАГИ. – 1991. – Т. XXII, № 6. – С. 70-74.

12. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.

13. Чигарев, Ю.В. Определение кинематических параметров падения капель рабочего раствора пестицидов при опрыскивании с учетом изменения их геометрических размеров / Ю.В. Чигарев, И.С. Крук, В. Романюк // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2020. – Т. 58, № 3. – С. 352-363.

14. Ольшанский, В.П., Ольшанский, С.В. Аналитическое решение задачи о падении шара, радиус которого убывает по дробно-линейному закону // Техническая механика. – 2014. – № 2. – С. 73-78.

15. Ольшанский, В.П. К моделированию падения испаряющейся капли диспергированного огнетушащего вещества / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 1. – С. 41-45.

16. Срезневский, Б.И. Об испарении жидкостей / Б.И. Срезневский // ЖРФХО. – 1882. – Т. 14, вып. 8. – С. 420-442.

17. Емельянов, А.Л. Кинематика испарения капель в системах охлаждения теплонагруженных элементов приборов / А.Л. Емельянов, Е.С. Платунов // Известия вузов приборостроения. – 2011. – Т. 54, № 1. – С. 84-88.

18. Севриков, В.В. Автономная автоматическая противопожарная защита промышленных сооружений: монография / В.В. Севриков. – Киев, Донецк: Вища школа, 1979. – 188 с.

19. Кузьмин, М.К. Анализ формул для вычисления времени полного испарения одиночных капель воды / М.К. Кузьмин // Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика. – 2015. – № 1. – С. 56-63.

20. Кузьмин, М.К. Формула для вычисления времени полного испарения аэрозольных капель с учетом коэффициентов испарения и поверхностного натяжения / М.К. Кузьмин, А.С. Хасанов // Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика. – 2017. – № 3. – С. 68-75.

21. Кузьмин, М.К. Учет влияния коэффициента испарения на скорость изменения радиуса капли / М.К. Кузьмин, Ю.И. Яламов // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45, вып. 3. – С. 415-421.

22. Кузьмин, М.К. Теория нестационарного испарения сферической аэрозольной капли с учетом зависимости давления насыщенного пара от кривизны поверхности / М.К. Кузьмин // Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика. – 2012. – № 3. – С. 39-49.

23. Апробация модели теплообмена и испарения капель диспергированной жидкости / А.Ю. Снегирёв [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 2. – С. 48- 59.

24. Снегирёв, А.Ю. Модель и алгоритм расчета теплообмена и испарения капель диспергированной жидкости / А.Ю. Снегирёв, С.С. Сажин, В.А. Талалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 1. – С. 44-55.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 11.08.2026

Микропроцессорная система кормления свиней

Предназначена для оперативного изменения доз кормления, контроля процесса кормления, учета расхода сухого и жидкого корма.

Разработанная система позволяет автоматизировать процесс кормления свиней, повысить эффективность и снизить издержки производства свинины.



Основные технические данные

1. Полная совместимость с типовым технологическим оборудованием КПС-54, КПС-108.
2. Нормированное кормление, оперативное изменение норм кормления.
3. Расчет фактических объемов замеса и раздачи жидкого корма без остатков.
4. Сокращение времени кормления в 1,5…2 раза.
5. Значительно дешевле и лучше западных аналогов.

УДК 62-83: 628.12
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-19-23

К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

М.А. Прищепов,
зав. каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Е.М. Прищепова,
доцент каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.А. Лихтар,
инженер-электрик ОАО «Завод Промбурвод», аспирант каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ

В статье приведен теоретический анализ параметров системы водоснабжения, влияющих на частоту включений ее насосных агрегатов, а также сформулирована задача оптимизации этих параметров, приводящая к минимизации частоты их включений.

Ключевые слова: насосный агрегат, регулируемый электропривод, частота включений, система водоснабжения, водонапорная башня, гидроаккумулятор.

The article provides the theoretical analysis of the parameters of the water supply system that affect the frequency of activation of its pumping units, and also formulates the task of optimizing these parameters to minimize the activation frequency.

Keywords: pump unit, adjustable electric drive, switching frequency, water supply system, water tower, hydraulic accumulator.

Введение

В структуре себестоимости услуг водоснабжения до 50…60 % приходится на долю стоимости электроэнергии, затраченной на транспортирование воды от источника к потребителю. В Республике Беларусь в среднем удельная энергоемкость добычи, подъема и подачи питьевой воды к потребителю составляет около 0,7 кВт·ч/м^3. Одним из основных направлений рационального использования энергетических ресурсов в системах водоснабжения является применение регулируемого электропривода в насосах, что позволяет повысить энергоэффективность процесса водоснабжения потребителей, т.е. снизить энергозатраты и повысить надежность системы водоснабжения. Однако это требует новых подходов к обоснованию их параметров и построению систем управления водоснабжением, так как все это осложняется случайно-вероятностными законами водопотребления, зависящими от времени суток, поры года и технологических процессов водопотребителей. Несоответствие режимов работы трубопроводов водоснабжения и насосов с регулируемым электроприводом устраняется в определенной степени использованием накопительных емкостей (водонапорных башен, воздушно-водяных гидроаккумуляторов) и регулированием производительности (подачи) насосных агрегатов путем изменения скорости их вращения, как правило, частотными методами [1-5]. При хорошем согласовании режимов водопотребления сети водоснабжения и подачи насосов воды режимы пуска и останова насосов будут сведены к минимуму. Это значительно снизит энергопотери, связанные с пуском насосов, и повысит надежность работы насосных агрегатов, так как их пуск является одним из самых тяжелых режимов работы для электродвигателей.

Цель данной работы – установить зависимости параметров, влияющих на количество включений насосных агрегатов и предложить способы их снижения.

Основная часть

Режим работы насосного агрегата определяется подачей насоса $Q_н$ (м^3/ч), расходом или водопотреблением воды в системе водоснабжения $Q_р$ (м^3/ч) и рабочим объемом бака $V_р$ (м^3) водонапорной башни или воздушно-водяного гидроаккумулятора [6].

Продолжительность работы насосного агрегата

$$t_р = \frac{V_р}{Q_н - Q_р}. \quad (1)$$

Продолжительность паузы в работе агрегата

$$t_о = \frac{V_р}{Q_р}. \quad (2)$$

Тогда длительность одного цикла при конкретном водопотреблении $Q_р$, подаче насоса $Q_н$ и рабочем объеме бака $V_р$

$$t_ц = t_р + t_о = \frac{V_р}{Q_н - Q_р} + \frac{V_р}{Q_р} =$$

$$= \frac{V_р Q_н}{Q_р (Q_н - Q_р)} = \frac{V_р Q_н}{Q_р Q_н - Q_р^2}. \quad (3)$$

Число включений насосного агрегата в единицу времени (частота включений)

$$Z = \frac{1}{t_ц} = \frac{Q_р Q_н - Q_р^2}{V_р Q_н}. \quad (4)$$

Таким образом, число включений насосного агрегата будет зависеть от контролируемого, но не управляемого насосной станцией расхода воды $Q_р$ от управляемой насосной станцией подачи насоса $Q_н$, изменением угловой скорости насоса, и от постоянного конструктивно принятого рабочего объема бака $V_р$.

Далее определим, при каком расходе воды насосный агрегат будет включаться наибольшее число раз

$$\frac{dZ}{dQ_р} = \frac{1}{V_р Q_н}(Q_н - 2Q_р) = 0; \quad (5)$$

$$Q_н - 2Q_р = 0; \quad (6)$$

$$Q_р = \frac{Q_н}{2}. \quad (7)$$

Тогда, подставив выражение (7) в выражение (4) и проведя преобразование, получим:

$$Z_{max} = \frac{1}{t_ц} = \frac{\frac{Q_н}{2}\left(Q_н - \frac{Q_н}{2}\right)}{V_р Q_н} = \frac{Q_н}{4V_р}. \quad (8)$$

Относительная продолжительность включения насосного агрегата

$$\varepsilon = \frac{t_р}{t_ц} = \frac{V_р}{Q_н - Q_р} \cdot \frac{Q_н Q_р - Q_р^2}{V_р Q_н} = \frac{Q_р}{Q_н} \quad (9)$$

определяется отношением расхода воды к подаче насоса.

Если в выражение (9) подставить выражение (7), то очевидно, что при относительной продолжительности включений ε = 0,5 частота включений будет максимальной.

Таким образом, относительная продолжительность включения насосного агрегата будет определяться расходом в сети водоснабжения и подачей насоса, а количество включений насосного агрегата еще и соотношением подачи насоса к рабочему объему бака.

Получим зависимость количества включений в единицу времени насосного агрегата для различных соотношений расхода воды в сети и производительности насоса используя выражение (4):

$$\text{при } Q_р=0 \quad Z = \frac{0(Q_н - 0)}{V_р Q_н} = 0; \quad (10)$$

$$\text{при } Q_р = \frac{Q_н}{8} \quad Z = \frac{\frac{Q_н}{8}\left(Q_н - \frac{Q_н}{8}\right)}{V_р Q_н} = \frac{7}{64}\frac{Q_н}{V_р}; \quad (11)$$

$$\text{при } Q_р = \frac{Q_н}{4} \quad Z = \frac{\frac{Q_н}{4}\left(Q_н - \frac{Q_н}{4}\right)}{V_р Q_н} = \frac{3}{16}\frac{Q_н}{V_р}; \quad (12)$$

$$\text{при } Q_р = \frac{Q_н}{2} \quad Z = \frac{\frac{Q_н}{2}\left(Q_н - \frac{Q_н}{2}\right)}{V_р Q_н} = \frac{1}{4}\frac{Q_н}{V_р}; \quad (13)$$

$$\text{при } Q_р = \frac{3}{4}Q_н \quad Z = \frac{\frac{3}{4}Q_н\left(Q_н - \frac{3}{4}Q_н\right)}{V_р Q_н} = \frac{3}{16}\frac{Q_н}{V_р}; \quad (14)$$

$$\text{при } Q_р = Q_н \quad Z = \frac{Q_н(Q_н - Q_н)}{V_р Q_н} = 0. \quad (15)$$

Далее построим графики зависимостей количества включений в единицу времени (частоты включений) насосного агрегата при различной относительной продолжительности включений $\varepsilon = Q_р / Q_н$ и различных значениях соотношения $Q_н / V_р$ (рис. 1).

Из графиков видно, что они имеют форму парабол, максимум у которых при ε=0,5.

Опишем эти параболы математически. Для этого на одной из парабол возьмем три точки (две крайние и точку максимума Z) и запишем для них уравнения парабол, получив при этом систему этих уравнений. Решив ее относительно неизвестных коэффициентов, получим:

$$Z = -\left(\frac{Q_р}{Q_н}\right)^2 \frac{Q_н}{V_р} + \frac{Q_р}{Q_н}\frac{Q_н}{V_р} =$$

$$= \frac{Q_р Q_н - Q_р^2}{Q_н^2} \cdot \frac{Q_н}{V_р}. \quad (16)$$

Проанализировав выражение (16), можно заключить, что это преобразованное выражение (4), т.е

$$\frac{Q_р(Q_н - Q_р)}{V_р Q_н} = \frac{Q_р Q_н - Q_р^2}{Q_н^2} \cdot \frac{Q_н}{V_р}. \quad (17)$$

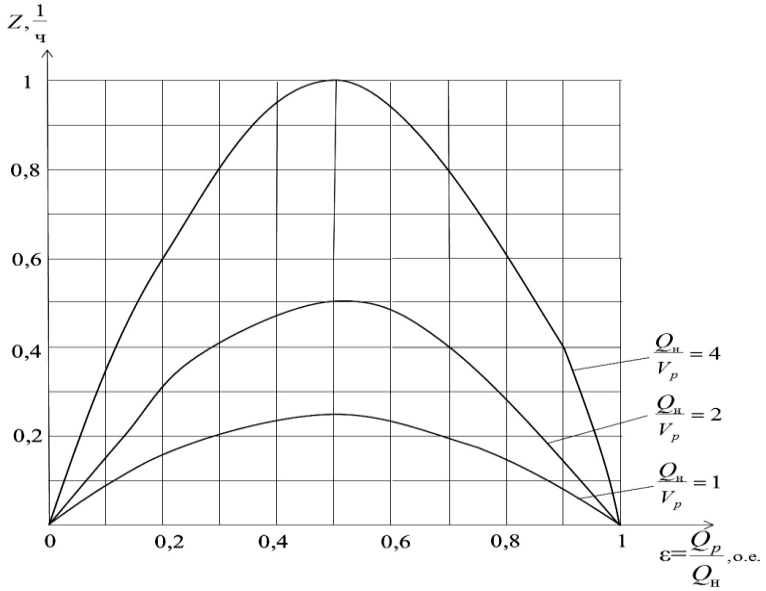


Рисунок 1. Графики зависимостей количества включений в единицу времени насосного агрегата при различной относительной продолжительности включений $\varepsilon = Q_p / Q_н$ и различных значениях соотношения $Q_н / V_р$

Выражение (16) можно представить в следующем виде:

$$Z = \frac{Q_р Q_н - Q_р^{\,2}}{Q_н^{\,2}} \cdot \frac{Q_н}{V_р} =$$

$$= (\varepsilon - \varepsilon^2)\frac{Q_н}{V_р} = \varepsilon(1-\varepsilon)\frac{Q_н}{V_р}. \qquad (18)$$

Анализ выражения (18) показывает, что первая составляющая этого выражения (ε-ε^2) при любых значениях $Q_р$ и $Q_н$, если $Q_р < Q_н$, будет иметь значение на отрезке от 0 до 0,25. Следовательно, основное влияние на количество включений будет оказывать соотношение $Q_н / V_р$, т.е. производительность насоса и рабочий объем бака. Чем больше будет это соотношение, тем больше частота включений Z насосного агрегата. Для нормальной работы электропривода насосного агрегата необходимо, чтобы частота включений агрегата не превышала допустимого значения. Уменьшение рабочего объема ведет к увеличению максимальной частоты включения. С целью увеличения срока службы электродвигателя насосного агрегата и снижения энергозатрат на подачу воды за счет уменьшения энергопотерь при пуске, необходимо уменьшать Z_{max} и увеличивать относительную продолжительность включения насосного агрегата ε.

При расходе воды, меньшем 0,5 $Q_н$, частота и продолжительность включений уменьшаются, режим работы двигателей, как правило, кратковременный *S*2, нагрев двигателя за цикл работы не достигает установившейся температуры. При расходе воды более 0,5 $Q_н$, частота включений уменьшается, а продолжительность включений увеличивается, т.е. $\varepsilon \to 1$. При расходе воды $Q_р = Q_н$ режим работы двигателя насосного агрегата становится продолжительным ($\varepsilon = 1$), а его нагрев наибольший, т.е. температура двигателя достигает установившейся температуры, не превышающей допустимую температуру изоляции двигателя. Поэтому двигатели насосных установок выбирают, как правило, для продолжительного режима работы *S*1.

Если расход воды в сети превышает подачу насоса, т.е. $Q_р > Q_н$, то время, за которое опустошится рабочий объем бака

$$t_{опуст.} = \frac{V_р}{Q_р - Q_н}. \qquad (19)$$

При остановке насоса $Q_н = 0$ время опустошения рабочего объема бака будет наименьшим и равным

$$t_{опуст.} = \frac{V_р}{Q_р}. \qquad (20)$$

При работе системы водоснабжения с воздушно-водяным гидроаккумулятором, например ВУ-5-30 (рис. 2), необходимо рабочий объем гидроаккумулятора выразить через давление в гидроаккумуляторе.

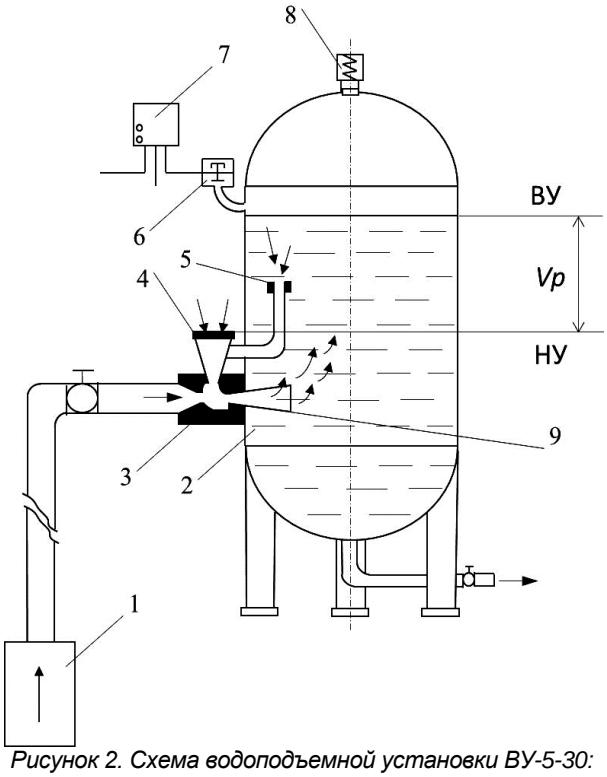


Рисунок 2. Схема водоподъемной установки ВУ-5-30: 1 – насосный агрегат; 2 – воздушно-водяной гидроаккумулятор; 3 – струйный насос; 4 – воздушный клапан; 5 – жиклер; 6 – реле давления; 7 – станция управления; 8 – предохранительный клапан; 9 – диффузор

Объем гидроаккумулятора определяют исходя из анализа процесса заполнения его водой:

1) в гидроаккумуляторе 2 (рис. 2) полным объемом V_0 действует начальное давление воздуха p_0, вода при этом отсутствует;

2) вода в гидроаккумуляторе находится на нижнем уровне (НУ), при котором происходит автоматическое включение электродвигателя насосного агрегата, в гидроаккумуляторе объем воздушной подушки равен V_1, давление, создаваемое воздухом p_1;

3) вода в котле находится на верхнем уровне (ВУ), при котором происходит автоматическое отключение электродвигателя насосного агрегата, объем воздушной подушки равен V_2, давление воздуха p_2.

Тогда регулируемый объем котла

$$V_{\text{р}} = V_1 - V_2. \qquad (21)$$

Считая, что исходное количество воздуха в гидроаккумуляторе и его температура в процессе работы остаются постоянными, т.е. процесс изотермический, то согласно закону Бойля-Мариотта, можно записать:

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 = p_2 V_2, \qquad (22)$$

тогда регулируемый объем гидроаккумулятора

$$V_{\text{р}} = \frac{p_0 V_0}{p_1} - \frac{p_0 V_0}{p_2} = p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) =$$

$$= \frac{p_0 V_0}{p_1} \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right), \qquad (23)$$

откуда полный объем

$$V_0 = V_{\text{р}} \frac{p_1}{p_0} \left(\frac{1}{1 - \frac{p_1}{p_2}} \right). \qquad (24)$$

Если в пустом гидроаккумуляторе давление воздуха равно атмосферному, т.е. p_0=1, то отношение p_1 / p_2 берется в пределах 0,65-0,85. Полный объем гидроаккумулятора можно уменьшить, если в нем создать предварительное давление воздуха. Давление p_1 выбирают таким, чтобы обеспечить подачу воды к самому удаленному потребителю, а давление p_2 определяют из соотношения p_1 / p_2 =0,65-0,85.

Максимальную частоту включений для насосных установок с гидроаккумулятором определяют исходя из формулы (8):

$$Z_{\max} = \frac{Q_{\text{н}} p_1}{4 V_0 p_0 \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right)}. \qquad (25)$$

Наличие воздушной подушки в гидроаккумуляторе смягчает гидравлические удары, возникающие при динамических режимах работы насосного агрегата. Однако воздушная подушка, соприкасаясь под давлением непосредственно с водой, растворяется в ней и уносится водой, тем самым уменьшая объем воздушной подушки и увеличивая частоту включений насосного агрегата. Для автоматического поддержания требуемого объема воздушной подушки в воздушно-водяных гидроаккумуляторах имеется струйный насос (регулятор) 3 (рис. 2). Подаваемая насосом вода проходит через сужающееся сопло струйного насоса 3, установленного в падающем водопроводе, увеличивая скорость струи воды, создающей разряжение после сопла, что обеспечивает подсос воздуха из окружающей среды через воздушный клапан 4, который смешивается с водой и поступает в гидроаккумулятор, и компенсирует растворенный воздух. Разряжение после сопла и открытие воздушного клапана 4 происходит тогда, когда жиклер 5 трубки струйного насоса находится в воде.

Частоту включений насосного агрегата в системе водоснабжения с воздушно-водяным гидроаккумулятором можно определить путем подстановки выражения (23) в выражение (4) с последующим преобразованием:

$$Z = \frac{Q_{\text{р}} \left(Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}} \right)}{V_{\text{р}} Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{р}} \left(Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}} \right)}{p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) Q_{\text{н}}} =$$

$$= \frac{Q_{\text{р}} Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}}^{\,2}}{Q_{\text{н}}^{\,2}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}}{p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right)} =$$

$$= \frac{Q_{\text{р}} Q_{\text{н}} - Q_{\text{р}}^{\,2}}{Q_{\text{н}}^{\,2}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}}{V_0}. \qquad (26)$$

В итоге получим выражение, аналогичное выражению (16), где рабочий объем гидроаккумулятора $V_{\text{р}}$ выражаем через полный объем и давления p_0, p_1 и p_2. Если провести анализ выражения (23)

$$V_{\text{р}} = p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) = p_0 V_0 \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1 p_2} \right) =$$

$$= p_0 V_0 \frac{\Delta p}{p_1 p_2}, \qquad (27)$$

где $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ – разность (дифференциал) давлений при выключении и включении насосного агрегата, то очевидно, что, чем выше дифференциал давления Δp, полный объем V_0 и начальное давление p_0 в гидроаккумуляторе, тем больше регулируемый объем гидроаккумулятора. При большем дифференциале давлений Δp произведение давлений p_1 p_2 будет наименьшим, что еще в большей степени увеличивает рабочий объем $V_{\text{р}}$.

Заключение

1. Для снижения энергозатрат на водоснабжение и повышение надежности системы водоснабжения, т.е. уменьшения количества отказов электродвигателя насосного агрегата, необходимо создать систему водоснабжения, обеспечивающую наименьшую частоту включений и наибольшую относительную продолжительность включений насосного агрегата.

2. Относительная продолжительность включений насосного агрегата определяется отношением расхода воды в сети к производительности насоса ($Q_р$ / $Q_н$), а частота его включений соотношением $Q_р$ / $Q_н$ и соотношением $Q_н$ / $V_р$, следовательно, контролируя расход воды в сети $Q_р$ и регулируя подачу (производительность) насоса $Q_н$, можно уменьшить соотношение $Q_р$ / $Q_н$, увеличивая производительность насоса $Q_н$, но при этом увеличивается соотношение $Q_н$ / $V_р$, т.е. возникает оптимизационная задача, определяющая, какой должен быть рабочий объем гидроаккумулятора и как (по какому закону) регулировать производительность насоса при изменении расхода воды в сети водоснабжения.

3. При постановке задачи оптимизации параметров насосной станции необходимо использовать упорядоченные годовые диаграммы, суточные графики водопотребления в различное время года для определения минимального, максимального и среднего водопотребления, а также максимального и минимального коэффициентов неравномерности водопотребления.

4. Система управления регулируемым электроприводом насосного агрегата должна обеспечивать плавный пуск электродвигателя и диапазон регулирования угловой скорости в пределах высоких значений коэффициентов полезного действия насосного агрегата, а также допустимые режимы работы насоса (отсутствие кавитации, помпажа), наличие достаточного потока воды для охлаждения электродвигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

2. Прищепов, М.А. Современный электропривод погружных водоснабжающих насосных установок / М.А. Прищепов, А.С. Козорез, Е.М. Прищепова, С.А. Лихтар // Агропанорама. – 2025. – № 3. – С. 26-33.

3. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и параметрическом регулировании скорости / М.А. Прищепов // Агропанорама. – 2022. – № 3. – С. 29-38.

4. 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. Зеленькевич // Агропанорама. – 2022. – № 4. – С. 19-23.

5. Козорез, А.С. Скважные 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.

6. Фоменков, А.П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий: учеб. пособие / А.П. Фоменков. – М.: Колос, 1973. – 311 с.: ил.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.06.2026

Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем

Предназначена для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.



Основные технические данные

Производительность	Не менее 24 л/мин
Давление на входе в блок центрифугирования	0,8 МПа
Давление на входе в блок фильтрования	0,2-0,3 МПа
Давление на выходе из блока фильтрования	0,15 МПа
Тонкость очистки	15-40 мкм

Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.

УДК 621.923
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-24-30

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ УГЛЕРОДНЫМИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

К.Л. Сергеев,
ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

М.М. Дечко,
инженер иностранного унитарного предприятия «САМСОЛЮШНС», канд. техн. наук, доцент

А.В. Гуд,
ст. преподаватель каф. моделирования и проектирования БГАТУ

Проведено экспериментальное исследование по модифицированию водомасляных эмульсионных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) высокодисперсными углеродными материалами и повышению дисперсности масляной фазы, обеспечивающим снижение износа лезвийных инструментов при обработке металлов резанием. Установлены оптимальные параметры, включающие размеры масляных капель, объемную концентрацию масляной фазы и концентрацию углеродных высокодисперсных материалов водомасляной эмульсионной СОЖ, обеспечивающие максимальную эффективность по снижению износа лезвийного инструмента.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, углеродные частицы, масляные капли, дисперсность, износ инструмента, лезвийная обработка металла.

An experimental study has been conducted to modify water-oil emulsion cutting fluids with highly dis-persed carbon materials and to increase the dispersion of the oil phase, which leads to reduced wear of cutting tools during metal cutting. Optimal parameters have been established, including the size of oil drops, the volumetric concentration of the oil phase, and the concentration of highly dispersed carbon materials in the water-oil emulsion cutting fluid which ensure maximum effectiveness in reducing the wear of cutting tools.

Keywords: cutting fluid, carbon particles, oil drops, dispersity, tool wear, metal cutting.

Введение

В процессах металлообработки практически на всех операциях применяют смазочно-охлаждающие жидкости [1]. Применение данных технологических сред при обработке металлов резанием существенно снижает интенсивность изнашивания режущего инструмента, одновременно повышая точность обработки и качество поверхностного слоя деталей [2]. Снижение износа режущего инструмента приобретает особую актуальность на ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса Республики Беларусь для повышения эффективности эксплуатации станочного парка. Анализ ассортимента СОЖ [3], применяемых в металлообрабатывающей отрасли страны, показал, что при обработке резанием используются преимущественно водомасляные эмульсии, получаемые разбавлением эмульсолов водой. Это обусловлено их низкой стоимостью, простотой приготовления и высокими охлаждающими свойствами.

В последние годы активно проводятся исследования по повышению эффективности процесса резания путем модифицирования СОЖ высокодисперсными углеродными материалами (модификаторами). Такие модифицированные СОЖ, представляющие собой смеси суспензий и эмульсий, называют суспоэмульсиями. Изучением введения углеродных модификаторов в СОЖ и их последующего влияния на процессы резания в разное время занимались ученые Chen H., Manikanta Ja.E., Фомин А.А., Мышкин В.А., Фесенко А.В., Белоус В.И., Никитин В.А., Сойту Н.Ю. и др. [4-10].

Несмотря на многочисленность исследований в смежных областях металлообработки, вопросы комплексной оптимизации параметров рабочей среды практически не рассматривались. В частности, существующие работы в основном ограничиваются общими аспектами обработки металлов резанием и не учитывают совместного влияния модификации водомасляных эмульсионных СОЖ углеродными высокодисперсными материалами и изменения дисперсности их масляной фазы.

Для решения указанной научно-технической задачи ранее было экспериментально показано [11], что

модифицирование водомасляной эмульсионной СОЖ углеродными высокодисперсными материалами, а также повышение дисперсности масляной фазы приводит к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности. При этом наблюдается выраженный синергетический эффект, обусловленный капиллярным механизмом проникновения суспоэмульсионной СОЖ в зону резания. Это предопределяет необходимость установления оптимальных параметров состава и структуры технологической среды для достижения максимальной эффективности процесса резания.

Целью данной работы является установление оптимальных значений размеров масляных капель, объемной концентрации масляной фазы и концентрации углеродных высокодисперсных материалов водомасляной эмульсионной СОЖ, а также исследование влияния указанных параметров на интенсивность износа режущего инструмента.

Основная часть

В экспериментах использовали СОЖ ТУ 100185315.001-2012, которая в исходном состоянии представляет собой 5 %-ю водную эмульсию, приготовленную на основе концентрата, содержащего отходы масложирового производства вместо обычно применяемых нефтяных масел [12]. Для измерения объемной концентрации СОЖ использовался рефрактометр «Мегеон 72024». В качестве модификаторов СОЖ использовали порошок углеродного наноматериала в виде конгломератов углеродных нанотрубок (УНТ) (синтезирован в НПП «Перспективные исследования и технологии», Республика Беларусь) и порошок технического графита (ТГ) марки ГК-2 ГОСТ 17022-81 [12].

Приготовление суспоэмульсии СОЖ выполняли в два этапа. На первом этапе на основе модификаторов формировали водные суспензии (рис. 1а), которые подвергали предварительному механическому перемешиванию с последующим ультразвуковым (УЗ) диспергированием. Второй этап заключался во введении в водную суспензию концентрата эмульсола с последующей УЗ-обработкой (рис. 1б). Для обеспечения чистоты эксперимента аналогичной УЗ-обработке подвергали базовую эмульсию СОЖ (рис. 1в), не содержащую модификаторов. Диспергирование проводили ультразвуковым диспергатором низкочастотным погружного типа по методике, аналогичной описанной ранее [12].

Размеры частиц модификаторов $d_ч$ и масляных капель $d_к$ определяли с помощью компьютерного микроскопа, который дает возможность различать структуры с расстоянием между элементами до 0,5 мкм и программного комплекса обработки и анализа изображений «AutoScanStudio» [13].

Для проведения экспериментов было приготовлено три пары образцов СОЖ, характеристика которых представлена в таблице 1.

Необходимо отметить, что фактический размер частиц модификатора в суспензии при приготовлении варьируется в диапазоне от 0,5 до 5,9 мкм.

С использованием приготовленных образцов СОЖ была выполнена серия экспериментов по точению на токарно-винторезном станке 16К20. В качестве режущего инструмента применяли проходные резцы сечением 25х16 (ГОСТ 18877-73) с пластинами, изготовленными из твердого сплава Т15К10. Обработке подвергали цилиндрические поверхности заготовок типа «вал» из стали 45 (ГОСТ 1050-2013, НВ = 170…210) диаметром d = = 40 мм и длиной l = 500 мм. Режимы обработки: глубина резания t = 1,0 мм; подача S = 0,2 мм/об; скорость резания V = 90-100 м/мин. Подача СОЖ в зону резания осуществлялась свободным поливом объемом Q = 0,1 л/мин.

Износ режущего инструмента после точения определяли по его задней поверхности. При проведении исследований через равные промежутки времени ($\Delta\tau$ = 120 с) фиксировали линейную величину фаски износа. Общая длительность лезвийной обработки составляла τ = 900 с.

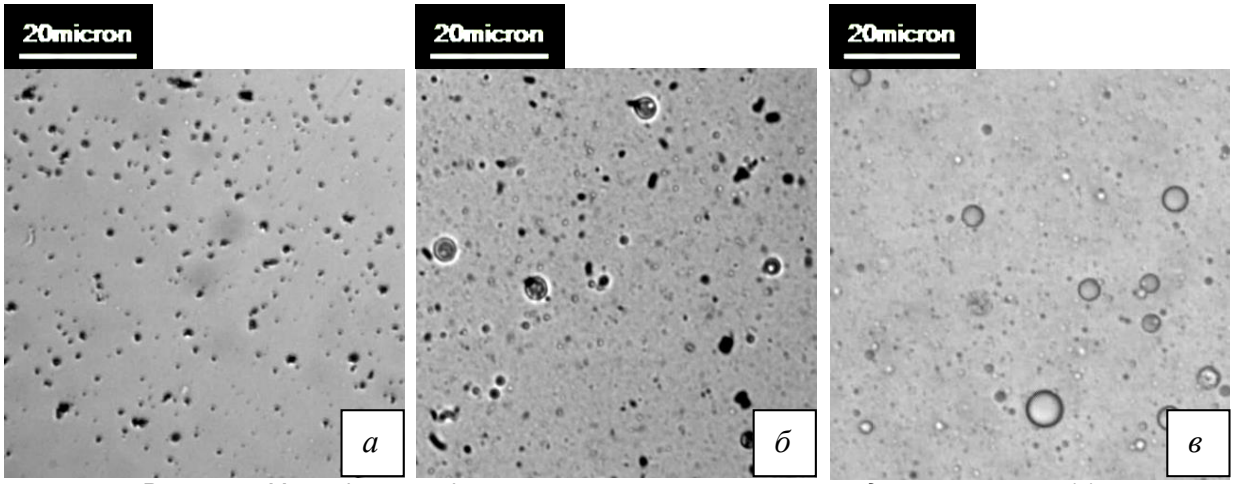


Рисунок 1. Микрофотографии суспензии после первого этапа диспергирования (а) суспоэмульсии СОЖ, полученной на втором этапе (б), и базовой эмульсии СОЖ (в), применяемых в экспериментальном исследовании

Таблица 1. Характеристика пар образцов СОЖ, применяемых в экспериментальном исследовании

№ пары	№ образца	Типы СОЖ	$d_к$, мкм	$d_ч$, мкм	$C_М$, масс, %
1	1	$СОЖ_0$	5	–	–
	2		1	–	–
2	3	$СОЖ_{УНТ}$	5	2	0,1
	4		1	2	0,1
3	5	$СОЖ_{ТГ}$	5	2	0,1
	6		1	2	0,1

Условные обозначения: $СОЖ_0$ – *эмульсия* СОЖ без добавления модификаторов (базовая); $СОЖ_{УНТ}$ – *суспоэмульсия* СОЖ с модификатором *УНТ;* $СОЖ_{ТГ}$ – *суспоэмульсия* СОЖ с модификатором *ТГ;* $d_к$ – *средний размер масляных капель дисперсной фазы в образцах* СОЖ, *мкм;* $d_ч$ – *средний размер частиц модификаторов в образцах* СОЖ, *мкм;* $C_М$ – *массовая концентрация модификаторов в образцах* СОЖ, *масс, %.*

Для каждого исследуемого образца СОЖ число повторов по обработке составило 3, а за итоговый результат принималось среднее арифметическое значение. Измерение износа по задней поверхности $h_з$ осуществляли с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 и контролировали цифровым USB-микроскопом DM9 с последующим программным анализом изображений фаски износа, обеспечивающим дискретность (цену деления) измерений 0,01 мм.

Степень влияния модифицирования СОЖ на износ режущего инструмента по задней поверхности оценивали следующим образом:

1) по отношению $h_{з0}/h_{зМ}$, показывающему, во сколько раз уменьшается износ за счет модифицирования СОЖ с использованием в качестве модификатора УНТ (отношение $h_{з0}/h_{зУНТ}$) или ТГ (отношение $h_{з0}/h_{зТГ}$) при заданной дисперсности масляной фазы СОЖ, т.е. при среднем диаметре масляных капель $d_к$, равном 5 мкм или 1 мкм;

2) по отношению $h_{з5}/h_{з1}$, показывающему, во сколько раз уменьшается износ после обработки модифицированной СОЖ за счет повышения дисперсности масляной фазы, т.е. при уменьшении среднего диаметра масляных капель от 5 мкм до 1 мкм.

Результаты исследования влияния модифицирования СОЖ на износ режущего инструмента при лезвийной обработке представлены в таблицах 2 и 3.

Анализ кинетики износа режущего инструмента (табл. 2) и степени влияния модифицирования СОЖ (табл. 3) показывает, что дисперсность масляной фазы оказывает определяющее влияние на стойкость резцов. Как видно из представленных данных, с уменьшением среднего размера масляных капель $d_к$ с 5 до 1 мкм величина износа по задней поверхности $h_з$ при длительности обработки τ = 900 с снижается в 1,21-1,45 раза. Данная закономерность прослеживается как для базовой эмульсии СОЖ ($СОЖ_0$), так и для суспоэмульсий, модифицированных УНТ ($СОЖ_{УНТ}$) и ТГ ($СОЖ_{ТГ}$). Вместе с тем введение высокодисперсных углеродных модификаторов обеспечивает дополнительное снижение износа резцов в 1,1-1,31 раза.

Логическим продолжением экспериментального исследования является выявление степени влияния модифицирования СОЖ углеродными высокодисперсными материалами на основании полученного уравнения регрессии. С этой целью осуществлен поиск экспериментальных зависимостей, описывающих взаимосвязи размеров масляных капель, объемной концентрации масляной фазы и концентрации углеродных высокодисперсных материалов.

Таблица 2. Полученные результаты износа по задней поверхности $h_з$ режущей пластины в зависимости от длительности обработки τ для различных образцов СОЖ

№ образца	Типы СОЖ	$d_к$, мкм	Износ по задней поверхности $h_з$, мм							
			Время обработки τ, с							
			60	180	300	420	540	660	780	900
1	$СОЖ_0$	5	0,03	0,06	0,11	0,15	0,21	0,26	0,35	0,46
2		1	0,03	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,31	0,38
3	$СОЖ_{УНТ}$	5	0,04	0,07	0,11	0,12	0,16	0,23	0,3	0,42
4		1	0,02	0,05	0,09	0,13	0,16	0,19	0,22	0,29
5	$СОЖ_{ТГ}$	5	0,04	0,06	0,1	0,13	0,16	0,21	0,28	0,39
6		1	0,03	0,05	0,08	0,12	0,14	0,17	0,22	0,31

Таблица 3. Степень влияния модифицирования СОЖ при лезвийной обработке (износ задней поверхности $h_з$ при длительности обработки τ = 900 с)

№ образца	Типы СОЖ	$d_к$, мкм	$h_з$, мм	$h_{з0}/h_{зМ}$	$h_{з5}/h_{з1}$
1	$СОЖ_0$	5	0,46	–	1,21
2		1	0,38	–	
3	$СОЖ_{УНТ}$	5	0,42	1,1	1,45
4		1	0,29	1,31	
5	$СОЖ_{ТГ}$	5	0,39	1,18	1,26
6		1	0,31	1,23	

Во-первых, это связано с объяснением известных предположений о механизмах влияния углеродных модификаторов на процессы обработки металлов резанием, рассмотренных в источниках [4-10], а также учета современных представлений о закономерностях износа режущего инструмента [11] и результатов, полученных на основе математической статистики [14, 15].

Во-вторых, проведение оптимизации продиктовано высокой стоимостью высокодисперсных углеродных материалов, что существенно снижает коммерческую привлекательность их промышленного применения. С целью уменьшения итоговой себестоимости приготовления суспоэмульсий СОЖ необходимо определить область оптимальных значений концентрации углеродных высокодисперсных материалов, вводимых в СОЖ.

Методика приготовления суспоэмульсии СОЖ и режимы резания оставались прежними, в то время как концентрация вводимого модификатора (на примере ТГ) варьировалась. Это позволило оценить комплексное влияние структурных свойств СОЖ на износ задней поверхности режущего инструмента.

Исследования совместного влияния размеров масляных капель, объемной концентрации масляной фазы и содержания углеродных высокодисперсных материалов на интенсивность износа режущего инструмента осуществлялись с использованием известных методик математического планирования эксперимента и статистической обработки данных на основе ортогонального центрального композиционного плана [14, 15].

В качестве управляющих факторов для определения оптимального сочетания структурных свойств СОЖ были взяты: X_1 – концентрация $C_М$ модификаторов в эмульсии СОЖ, масс. %; X_2 – средний размер $d_к$ масляных капель масляной фазы СОЖ, мкм; X_3 – объемная концентрация $C_{СОЖ}$ СОЖ, г/л. На основе априорных данных для проведения лезвийной обработки выбраны уровни и интервалы варьирования управляющих факторов (табл. 4).

Результаты опытов, выполненных по ортогональному центральному композиционному плану при 4-кратном дублировании, и их статистический анализ (табл. 5) позволяют утверждать, что зависимость износа от исследуемых управляющих факторов процесса лезвийной обработки адекватно описывается уравнением регрессии вида:

$$h_з = 0,348 + 0,016X_1 + 0,038X_2 - 0,047X_3 +$$

$$+ 0,018X_1X_2 + 0,032X_2X_3 + 0,036X_1^2 + 0,028X_2^2. \quad (1)$$

Для определения оптимальных значений управляющих факторов для достижения минимального износа режущего инструмента решена оптимизационная задача:

$$h_з\left(X_1, X_2, X_3\right) \to \min;$$

$$-1,215 \le X_1, X_2, X_3 \le 1,215. \quad (2)$$

Решение получено с помощью процедуры «Поиск решения» в программе MS Excel методом обобщенного понижающего градиента [16]. В результате найден локальный минимум $h_з$ = 0,24 мм, координаты которого приведены в таблице 6.

Для наглядной иллюстрации зависимости параметра оптимизации (износ режущего инструмента) от структурных свойств СОЖ в диапазоне варьирования управляющих факторов на рисунке 2 представлены поверхности отклика для параметра оптимизации.

Определение оптимальных диапазонов управляющих факторов для снижения износа режущего инструмента осуществлялось графическим методом путем наложения линий равного уровня параметра оптимизации. Оптимальные параметры на основании графического метода, обеспечивающие максимальное снижение износа в рамках выбранных диапазонов варьируемых факторов, представлены в таблице 7.

Особое внимание при проведении исследований представляет вопрос об увеличении концентрации модификатора в суспоэмульсии СОЖ. В таблице 8 представлены результаты подстановки кодированного фактора X_1 (концентрация модификатора $C_М$, % масс.) в полученное уравнение регрессии для определения степени влияния модификатора (на примере $СОЖ_{ТГ}$) при фиксированных значениях среднего размера масляных капель СОЖ $d_к$ = 1 мкм и концентрации масляной фазы СОЖ $C_{СОЖ}$ = 50 г/л. Выбранные значения для вышеуказанных факторов были приняты на основании ранее проведенных экспериментов первого этапа исследований, исходя из которых можно судить о максимальном снижении износа режущего инструмента.

Таблица 4. Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни варьирования факторов	Управляющие факторы		
	Концентрация модификаторов, $C_М$, % масс.	Средний размер масляных капель СОЖ $d_к$, мкм	Объемная концентрация СОЖ $C_{СОЖ}$, г/л
Кодовое обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Основные уровни (X_i = 0)	0,55	3	30
Интервалы варьирования	0,45	2	20
Нижние уровни (X_i = –1)	0,1	1	10
Верхние уровни (X_i = +1)	1,0	5	50
Звездные точки (X_i = –1,215)	0,03	0,6	5,7
Звездные точки (X_i = +1,215)	1,1	5,4	54

Таблица 5. План эксперимента, результаты и статистический анализ зависимости износа $h_з$, мм от структурных свойств СОЖ

№	Нормированные значения факторов			Экспериментальные и расчетные значения параметра износа $h_з$, мм и их дисперсии					
	X_1	X_2	X_3	$h_{з_1}$	$h_{з_2}$	$h_{з_3}$	$h_{з_4}$	$h_{з_{ср}}$	S^2
1	-1	-1	-1	0,47	0,44	0,47	0,56	0,49	0,0027
2	1	-1	-1	0,38	0,43	0,47	0,50	0,45	0,0027
3	-1	1	-1	0,39	0,44	0,45	0,46	0,44	0,0010
4	1	1	-1	0,43	0,49	0,45	0,51	0,47	0,0013
5	-1	-1	1	0,35	0,31	0,29	0,27	0,31	0,0012
6	1	-1	1	0,27	0,33	0,34	0,24	0,30	0,0023
7	-1	1	1	0,44	0,38	0,45	0,28	0,39	0,0061
8	1	1	1	0,51	0,41	0,52	0,34	0,45	0,0074
9	0	0	0	0,33	0,29	0,41	0,34	0,34	0,0025
10	-1,215	0	0	0,35	0,29	0,39	0,39	0,36	0,0022
11	1,215	0	0	0,42	0,46	0,47	0,52	0,47	0,0017
12	0	-1,215	0	0,34	0,31	0,27	0,33	0,31	0,0010
13	0	1,215	0	0,43	0,48	0,52	0,51	0,49	0,0016
14	0	0	-1,215	0,40	0,41	0,36	0,40	0,39	0,0005
15	0	0	1,215	0,32	0,35	0,24	0,29	0,30	0,0022

Критерий Кохрена						
	экспериментальный				0,203	
	критический				0,276	

Статистически значимые коэффициенты регрессии					Критерий Фишера	
	b_0	b_1	b_2	b_3	экспериментальный	расчетный
	0,348	0,016	0,038	-0,047		
	b_{12}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	2,168	2,221
	0,018	0,032	0,036	0,028		

Условные обозначения: $h_{з_1}$, $h_{з_2}$, $h_{з_3}$, $h_{з_4}$ – полученные экспериментальные значения параметра износа режущего инструмента для каждого опыта; $h_{з_{ср}}$ – выборочное среднее значение параметра износа режущего инструмента для каждого опыта; S^2 – выборочная дисперсия для каждого опыта.

Таблица 6. Координаты точки локального минимума зависимости износа $h_з$, мм от структурных свойств СОЖ

Фактор	Нормированные координаты	Натуральные координаты
Концентрация модификаторов, $C_М$	X_1 = 0,073	$C_М$ = 0,58 масс. %
Средний размер масляных капель СОЖ, $d_к$	X_2 = – 1,215	$d_к$ = 0,6 мкм
Объемная концентрация СОЖ, $C_{СОЖ}$	X_3 = 1,215	$C_{СОЖ}$ = 54 г/л

Как видно из таблицы 8, с увеличением концентрации модификатора с 0,03 до 0,55 масс. % износ режущего инструмента уменьшается приблизительно в 1,2 раза. Однако дальнейшее повышение концентрации модификатора с 0,55 до 1,1 масс. % приводит к снижению эффективности модифицирования СОЖ. Полученные результаты объясняются тем, что рост концентрации модификатора способствует увеличению численного количества частиц, образующих ЧЧ-кластеры (однофазные агрегаты, представляющие собой скопления соприкасающихся частиц) и КЧ-кластеры (двухфазные агрегаты, образованные совместно каплями и частицами), которые разделяются на несколько типов:

1) одна капля + одна частица;
2) несколько капель + одна частица;
3) несколько частиц + одна капля;
4) несколько капель + несколько частиц;
5) одна частица внутри капли;
6) несколько частиц внутри капли [11].

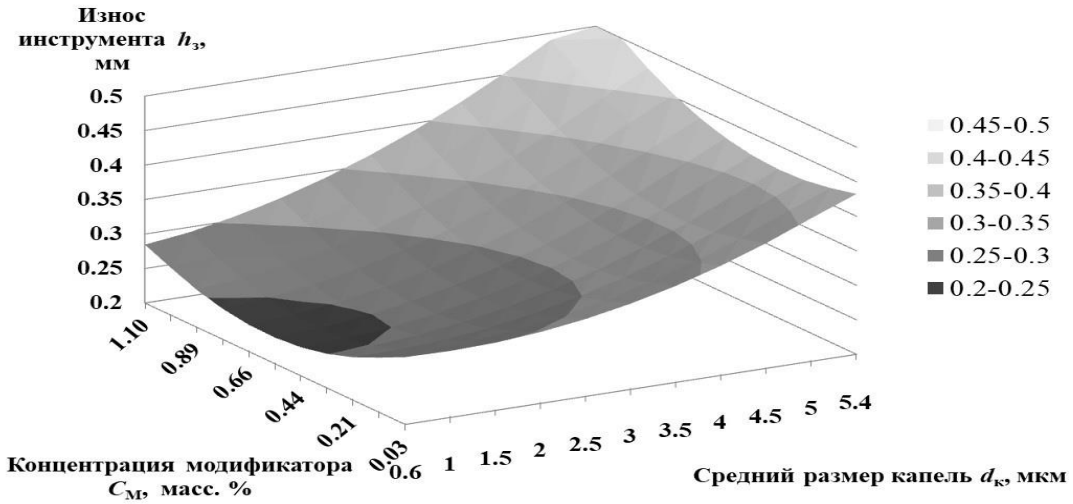
Результаты микроскопического анализа различных образцов СОЖ ($d_к$ = 1 мкм; $C_{сож}$ = 50 г/л; $C_м$ = 0,03-1,1 масс. %) позволяют сделать вывод о

Таблица 7. Оптимальные диапазоны управляющих факторов

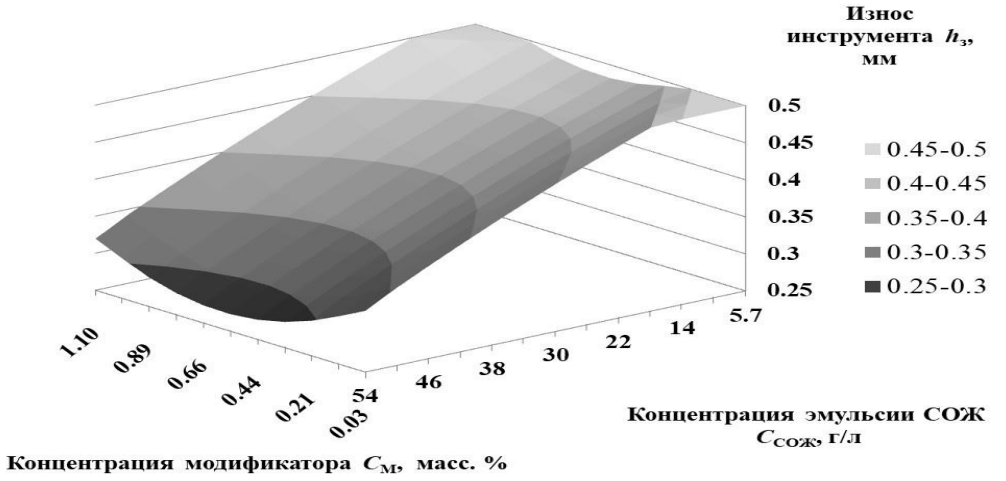
Концентрация модификатора СОЖ, масс. %	Средний размер масляных капель СОЖ, мкм	Объемная концентрация масляной фазы СОЖ, г/л
0,33-0,66	0,6-1,5	45-54

Таблица 8. Степень влияния модифицирования СОЖ при лезвийной обработке (износ задней поверхности $h_з$)

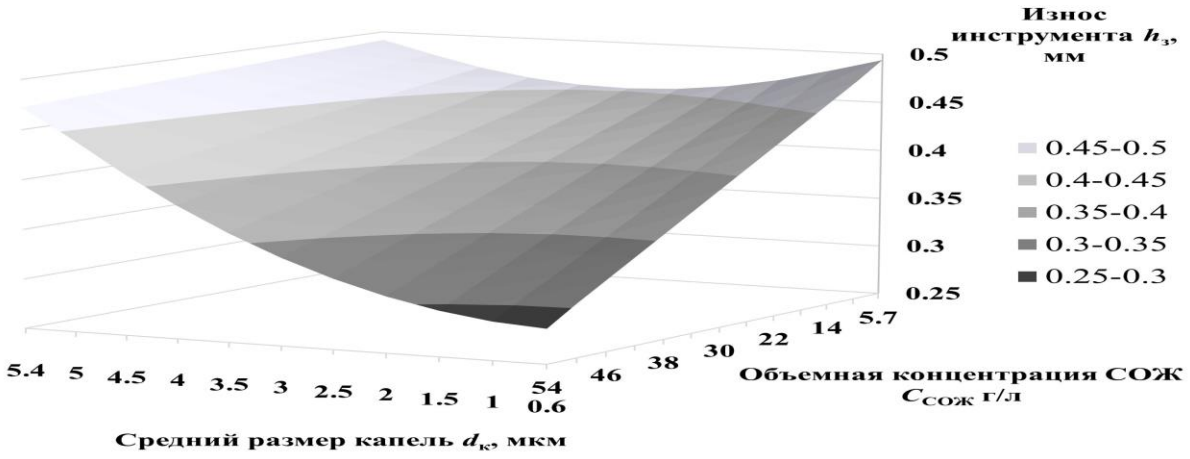
$C_м$, масс. %	$h_з$, мм	$h_{з0}/h_{зМ}$
0,03	0,360	–
0,1	0,343	1,05
0,325	0,315	1,14
0,55	0,305	1,18
0,775	0,313	1,15
1	0,340	1,06
1,1	0,357	1,01



а



б



в

Рисунок 2. Поверхности отклика для параметра оптимизации «износ режущего инструмента»: а – зависимость износа от концентрации модификатора СОЖ и среднего размера капель масла СОЖ; б – зависимость износа от концентрации модификатора СОЖ и объемной концентрации масляной фазы СОЖ; в – зависимость износа от среднего размера масляных капель СОЖ и объемной концентрации масляной фазы СОЖ

том, что с увеличением концентрации модификатора в структуре КЧ-кластеров начинают преобладать типы 3, 4 и 6, а количество ЧЧ-кластеров возрастает в несколько десятков раз. Данные изменения существенно затрудняют прохождение данных структурных формирований через сеть капилляров (микроканалов) в процессе металлообработки, а именно: затрудняют их прохождения внутрь капилляров (осуществляется блокировка канала) [11].

При анализе полученного уравнения регрессии особый интерес представляет эффект парного взаимодействия модификатора СОЖ и размера капель масла суспоэмульсии СОЖ, которое указывает на существование оптимального сочетания факторов СОЖ (X_1X_2). Это объясняется синергетическим эффектом, т.е. совместным влиянием управляющих факторов, которое в дальнейшем скажется на итоговом значении параметра износа режущего инструмента. Подстановка значений факторов в полученное уравнение позволила выявить положительный эффект при одновременном увеличении концентрации модификаторов и уменьшении размеров масляных капель СОЖ (рис. 2а).

Заключение

На основании выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Введение углеродных модификаторов и повышение дисперсности масляной фазы СОЖ снижает износ режущего инструмента в 1,1-1,45 раз;

2. Рекомендованы оптимальные параметры модифицированной водомасляной эмульсионной СОЖ: размер масляных капель составляет 0,6 мкм, объемная концентрация масляной фазы – 54 г/л, а концентрация углеродных высокодисперсных материалов – 0,58 % масс. Наблюдаемое снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента обусловлено синергетическим эффектом. Повышение дисперсности масляной фазы способствует более активному проникновению капель масла в зону резания через сеть тонких микрокапилляров, где совместно с модификаторами формируется устойчивый защитный смазочный слой, улучшающий триботехнические характеристики всей технологической системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Худобин, Л.В. Технологии и техника применения смазочно-охлаждающих жидкостей при механической обработке: учебное пособие / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2013. – 232 с.

2. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с.

3. Смазочно-охлаждающие жидкости на водной основе / А.Ю. Клюев [и др.] // Химия и технология новых веществ и материалов: сборник научных трудов. – Минск: Белорусская наука, 2009. – Вып. 3. – С. 275-321.

4. Патент RU 2417253, МПК C10M 173/02. Синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость с углеродными нанотрубками: № 2009138618/04: заявлено 19.10.2009: опубл. 27.04.2011 / заявители: Фомин А.А., Мышкин В.А.

5. Evaluation of new nano-cutting fluids for the processing of carbon fiber-reinforced composite materials / H. Chen [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 437. – P. 140771.

6. Маниканта, Д.Э. Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке / Д.Э. Маниканта, Н. Амбхор, Г.Р. Теллапутта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 20-33.

7. Фесенко, А.В. Повышение эффективности шлифования за счет использования новых технологий приготовления смазочно-охлаждающих жидкостей / А.В. Фесенко, М.С. Степанов, Ю.Н. Любимый // Вестник СумГУ. Сер. «Техн. науки». – 2012. – № 2. – С. 123-127.

8. Белоус, В.И. Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании труднообрабатываемых материалов / В.И. Белоус // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7. – С. 66-70.

9. Повышение износостойкости триботехнических узлов технологической системы при использовании наноструктурированных СОТС / В.А. Никитин [и др.] // Инструмент и технологии. – 2008. – № 25. – С. 146-150.

10. Сойту, Н.Ю. Повышение эффективности процессов сверления конструкционных материалов за счет наноструктурированных фуллеренсодержащих смазочно-охлаждающих технологических сред: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Наталья Юрьевна Сойту; Саратовский гос. технический ун-т. – Саратов, 2010. – 231 с.

11. Толочко, Н.К. Капиллярный механизм проникновения суспоэмульсионной СОЖ в зону резания / Н.К. Толочко, К.Л. Сергеев // Технология машиностроения. – 2023. – № 5. – С. 16-22.

12. 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.

13. AutoScan: программный комплекс обработки и анализа изображений. – ЗАО «Спектроскопические системы», 2009. – PDF-документ (7,45 МБ).

14. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учеб. пособие / Н.А. Спирин [и др.]; под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.

15. 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.

16. Любимцев, О.В. Практикум по дисциплине «Экономико-математические модели и методы»: учеб.-метод. пособие / О.В. Любимцев; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2016. – 52 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.07.2026

УДК 65.011.56
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-31-35

ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ АГРАРНОГО БИЗНЕСА

Н.В. Киреенко,
зав. каф. экономической теории и права БГАТУ, докт. экон. наук, профессор

Е.А. Спиридонова,
студент III курса факультета предпринимательства и управления БГАТУ

В статье обоснованы эволюционные этапы становления аграрного бизнеса в контексте расширения концепций инновационного развития (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0). Определена сущность, задачи и методы оценки уровня цифровой зрелости аграрных организаций с целью улучшения бизнес-процессов и принятия экономически обоснованных управленческих решений. Обоснованы направления повышения уровня цифровой зрелости субъектов хозяйствования с учетом их производственно-экономического и сбытового потенциала.

Ключевые слова: цифровая зрелость, инновационное развитие, аграрный бизнес, конкурентоспособность, цифровая трансформация, эффективность.

This article substantiates the evolutionary stages of agricultural business development in the context of expanding innovative development concepts (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0). It defines the nature, objectives, and methods for assessing the level of digital maturity of agricultural organizations in order to improve business processes and make economically sound management decisions. The directions for increasing the level of digital maturity of business entities are substantiated, taking into account their production, economic and sales potential.

Keywords: digital maturity, innovative development, agricultural business, competitiveness, digital transformation, efficiency.

Введение

Современное развитие мировой и национальной экономики базируется на инновационной основе и определяется уровнем цифровой зрелости стран, регионов, видов экономической деятельности, субъектов хозяйствования, который отражает их способность использовать цифровые технологии для создания ценности, улучшения бизнес-процессов и принятия экономически обоснованных управленческих решений. Республика Беларусь в 2025 году заняла 85-е место в Глобальном индексе инноваций (Global Innovation Index, GII) среди 139 стран и территорий мира, в котором наиболее сильными сторонами страны отмечены развитый человеческий капитал и система образования, характеризующаяся сохранением высокого уровня зачислений в учреждения высшего образования и выпуска кадров технических специальностей [1]. При этом в Глобальном индексе развития информационно-коммуникационных технологий (ICT Development Index, IDI) Беларусь набрала 92 балла из 100 против 90,7 балла в 2024 г. Сильными позициями страны стали стоимость корзины фиксированного широкополосного доступа в Интернет (0,6 % от валового национального дохода на душу населения) и доля населения, владеющего мобильным телефоном [2].

Для национального аграрного бизнеса исследуемое направление является стратегически важным, что обусловлено комплексом выполняемых социально-значимых функций для общества: обеспечение продовольственной безопасности; укрепление производственно-технологической базы; развитие сельских территорий как производственной площадки, так и места проживания и отдыха; поддержание экологического баланса окружающей среды, др. Повышение уровня цифровой зрелости организаций АПК выступает средне- и долгосрочным приоритетом, предусмотренным в государственных программах социально-экономического развития, «АПК будущего» на 2026-2030 годы, «Цифровая Беларусь» на 2026-2030 годы, инновационного развития на 2026-2030 годы, Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года [3-7]. Все это в совокупности направлено на формирование отечественной экосистемы цифровых решений для населения, бизнеса и государства, основанных на современной системе и инфраструктуре управления данными.

Определяя значимость цифровой зрелости как фактора обеспечения инновационного развития организаций АПК, следует отметить, что в научных и бизнес-исследованиях данная категория рассматривается отечественными и зарубежными учеными как:

1) ядро операционной и стратегической деятельности субъекта (К.А. Аленина, А.В. Курицына, И.Ю. Мерзлов) [8, 9];

2) показатель, отражающий степень интеграции информационных технологий во все бизнес-процессы компании для повышения эффективности, снижения издержек и успешной конкуренции на рынке (А.С. Вересович, Г. Д. Паксютов) [10, 11];

3) уровень интеграции технологий с экологической и управленческой устойчивостью, позволяющий трансформировать бизнес-модели (Л.И. Архипова, Н.А. Логачева, Л.Ф. Медведева) [12, 13];

4) способность организации гибко реагировать на технологические вызовы рынка (К.А. Хугаева, В.Э. Комов) [14].

Разделяя представленные результаты и учитывая тот факт, что в условиях инновационного развития необходимо укрепление конкурентного преимущества АПК Республики Беларусь, то целью данной статьи является научное обоснование теоретико-методических аспектов и разработка направлений повышения уровня цифровой зрелости организаций с учетом их производственно-экономического и сбытового потенциала.

Материалы и методы

Научное исследование базировалось на изучении, систематизации и обобщении трудов отечественных и зарубежных авторов по вопросам повышения цифровой зрелости в контексте инновационного развития АПК, а также национальной нормативной и правовой базы. Использованы методы системного и сравнительного анализа.

Основная часть

Применение цифровых технологий способствует инновационному развитию страны, региона, организаций и формированию их конкурентоспособности. В связи с этим появляется необходимость во внедрении проектов, обеспечивающих продвижение цифровизации в различных видах экономической деятельности. Исходя из этого, в таблице 1 обоснованы эволюционные этапы становления аграрного бизнеса.

Установлено, что за последние 100 лет внесены существенные изменения в развитие аграрного бизнеса, что отразилось в смене технологий, появлении новых сортов сельскохозяйственных культур и пород животных, новых профессий, форм ведения хозяйственной деятельности и т. д. Это способствовало расширению методов и инструментов интенсификации производства, а также к переходу на ресурсосберегающие, зеленые и цифровые технологии. По аналогии с развитием концепций промышленности (3.0, 4.0, 5.0) в аграрном бизнесе намечаются те же перспективы, но более медленно и со своими особенностями.

Новый вектор инновационного развития организаций АПК Республики Беларусь обуславливает планирование и организацию проведения оценки уровня цифровой зрелости. Последняя показывает, насколько глубоко цифровые технологии интегрированы в работу субъекта хозяйствования.

Первые методы оценки цифровой зрелости появились в начале 2010-х гг. На этом этапе их разработчиками являлись консалтинговые компании, однако подавляющее большинство таких методов не имели теоретического обоснования, а строились на большой статистической базе.

К настоящему времени выделяется ряд научно-методических подходов к оценке цифровой зрелости организаций, которая проводится двумя способами: готовыми методиками или собственными аудитами (рис. 1).

Так, Организация экономического сотрудничества и развития применяет алгоритм на основе трех параметров:

1) возможности информационно-коммуникационных технологий (ИКТ): обучение цифровым навыкам сотрудников, наличие специалистов по ИКТ, внедрение цифровых технологий;

2) расширенные функции ИКТ (информационная безопасность, адаптация программного обеспечения для управления бизнесом, собственные разработки);

3) веб-зрелость (наличие веб-сайта с возможностями проведения электронной торговли, размещения онлайн-рекламы).

Компания Deloitte испоьзует модель цифровой зрелости (Digital Maturity Model), позволяющую оценить цифровые возможности по ключевым измерениям: по-

Таблица 1. Описание эволюционных этапов аграрного бизнеса

Концепции	Характеристики
1.0	От собирательства к сельскому хозяйству; одомашнивание животных, использование деревянных инструментов
2.0	Замена деревянных инструментов и оборудования на металлическое
3.0	Внедрение сельскохозяйственной техники и оборудования, их массовое производство; интенсификация производства и переработки
4.0	Зеленая и цифровая революции; автоматизация части производственно-сбытовых процессов; внедрение телекоммуникационных систем для контроля ресурсов и процесса работы, робототехники, рациональное применение удобрений и пестицидов, выведение новых сортов сельскохозяйственных культур, пород сельскохозяйственных животных
5.0	Цифровая революция; внедрение искусственного интеллекта, наноэлектроники и облачных вычислений, применяемых для дистанционного зондирования; ресурсосберегающие технологии в производстве, переработке, хранении, складировании и сбыте продукции; электронные инструменты в системе продвижения продукции на рынок (электронные торговые площадки, электронная биржевая логистика, др.)



Рисунок 1. Наиболее распространенные подходы к оценке цифровой зрелости организаций

требители; стратегия; технологии; операции, в том числе производство; структура и культура организации. Основной акцент в методике сделан на выбор бизнес-стратегии, бизнес-модели и операционной модели, на основании которых определяется требуемый уровень цифровой зрелости по выделенным измерениям.

В индексе цифровой трансформации (Digital Transformation Index), разработанном аналитическим агентством Arthur D. Little, оцениваются: стратегия и уровень руководства; продукты и сервисы; управление клиентами; операции и цепочки поставок; корпоративные сервисы и контроль; информационные технологии; рабочее место и культура. Для каждой компании полученные результаты представляются в виде радара, позволяющего учитывать отраслевую специфику производства и среднеотраслевой уровень цифрового развития.

Компания KPMG разработала модель оценки цифровых способностей (Digital Business Aptitude – DBA), которая основывается на следующих областях измерения: стратегия, встроенная в цифровую систему; ключевые цифровые процессы; гибкие источники и технологии и др. Интересен методический подход, включенный в модель цифровой зрелости Форестера 4.0, в рамках которого оценивается корпоративная культура (отношение организации к цифровым инновациям и качество взаимодействия сотрудников с ИКТ, применяемых в работе), технологии (использование организацией ИКТ), организация цифрового развития (формулировка, реализация стратегии и тактики в части цифровой трансформации), инсайты (применение организацией данных о пользовательском опыте и внутренних бизнес-процессах при принятии управленческих решений). В рамках каждого параметра проводится интервьюирование, что позволяет (в зависимости от количества набранных баллов) отнести организацию к одной из четырех групп:

1) скептики (Skeptics) – организации, имеющие минимальный уровень цифровизации и начинающие цифровую трансформацию;

2) последователи (Adopter) – организации, которые активно инвестируют в развитие ИКТ и повышение квалификации специалистов;

3) коллаборатоы (Collaborator) – организации, которые активно используют цифровые решения в целях создания конкурентных преимуществ;

4) дифференциаторы (Differentiator) – организации, использующие цифровые данные для построения эффективных каналов взаимодействия с покупателями.

Таким образом, все рассмотренные подходы оценки уровня цифровой зрелости позволяют определить, какие бизнес-процессы и модели организации нуждаются в трансформации, на каком этапе инновационного развития находится субъект хозяйствования в настоящее время. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности организации АПК авторами обоснованы направления повышения ее уровня цифровой зрелости с учетом их производственно-экономического и сбытового потенциала.

Во-первых, цифровая зрелость означает адаптацию организации к эффективной конкуренции в цифровой среде, мероприятия по развитию которой определены в подпрограмме 9 «Цифровизация АПК, в том числе точное земледелие» государственной программы «АПК будущего» на 2026–2030 годы. Так, в сфере информатизации Министерством сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь разработаны и внедрены [4]:

– автоматизированная информационная система «Гостехнадзор», которая обеспечивает государственную регистрацию тракторов, самоходных машин и выданных удостоверений тракториста-машиниста;

– автоматизированная информационная система «Мониторинг проведения технического обслуживания доильных залов на молочно-товарных комплексах», которая позволяет контролировать своевременность и качество технического обслуживания;

– база данных и информационно-поисковая система наличия машинно-тракторного парка с использованием справочных кодов сельскохозяйственной техники по годам выпуска на базе информационно-поисковой системы «Машснаб». Система позволит

вести оперативный учет сельскохозяйственной техники и ее состояния;

– информационно-поисковые системы «Техсервис» и «Ветснаб», которые помогают производителям сельскохозяйственной продукции оперативно находить необходимые запасные части к сельскохозяйственной технике и ветеринарные препараты;

– национальная автоматизированная информационная система в рамках формирования, ведения и использования единого реестра сортов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию на территориях государств – членов Евразийского экономического союза;

– государственная информационная система идентификации, регистрации, прослеживаемости сельскохозяйственных животных (стад), идентификации и прослеживаемости продуктов животного происхождения ГИС «AITS» и государственная информационная система в области ветеринарии.

Во-вторых, в условиях информатизации аграрный бизнес должен стать высокотехнологичным видом экономической деятельности, в которой ключевое значение придается внедрению новых технологий путем согласования стратегии развития и организационной структуры, наличия компетентных трудовых ресурсов и соответствующих технологических процессов (рис. 2).

В-третьих, цифровую зрелость можно считать непрерывным процессом адаптации организации АПК к изменяющемуся цифровому ландшафту. Поэтому при определении ее уровня необходимо учитывать производственно-экономический и сбытовой потенциал, включая:

– бизнес-деятельность / функции организаций: маркетинг, администрирование, обслуживание потребителей и т. д.;

– бизнес-процессы: одна или несколько связанных операций и последовательность действий для достижения конкретной бизнес-цели, при которой управление, оптимизация и автоматизация бизнес-процессов объединяются в одно целое с новыми технологиями, такими как роботизация бизнес-процессов;

– бизнес-модели: как функционируют организации от подхода к выходу на рынок и ценностного предложения до способов производства;

– бизнес-экосистемы: сети партнеров и заинтересованных сторон, а также внешние факторы, влияющие на деятельность организации;

– управление бизнес-активами: как потребители, так и информация должны рассматриваться в качестве реальных активов во всех аспектах;

– организационную культуру, при которой должна быть четкая, ориентированная на потребителя, гибкая и адаптивная цель, которая достигается путем приобретения основных компетенций в области цифровой зрелости, лидерства, интеллектуальной работы и т. д.;

– модели экосистем и партнерских отношений, в том числе появление новых бизнес-моделей и источников доходов;

– потребителей, работников и партнерские подходы.

Заключение

Таким образом, цифровая зрелость как фактор обеспечения инновационного развития организаций



Рисунок 2. Внедрение цифровых технологий в организациях аграрного бизнеса

аграрного бизнеса представляет собой эффективный непрерывный цикл улучшений, который помогает субъектам действовать быстрее, точнее и объективнее. Для успешного внедрения цифровых решений необходимо описывать основные, вспомогательные, обеспечивающие, сопутствующие бизнес-процессы, а также бизнес-процессы управления и развития организации с целью выявления проблем и направлений цифровизации для их решения.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Global Innovation Index 2025 // Wipo. – URL https://www.wipo.int/en/web/global-innovation-index/w/news/2026/save-the-date-gii-2026 (date of access: 06.07.2026).

2. ICT Development Index. – URL https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/idi2026/ (date of access: 06.07.2026).

3. Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026-2030 годы: Решение Всебелорусского народного собрания от 19 декабря 2025 г. № 1 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P925v0001 (дата обращения: 06.07.2026).

4. О Государственной программе «АПК будущего» на 2026-2030 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 31 декабря 2025 г. № 814 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500814 (дата обращения: 07.07.2026).

5. О Государственной программе «Цифровая Беларусь» на 2026-2030 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 30 декабря 2025 г. № 793 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500793 (дата обращения: 06.07.2026).

6. О Государственной программе инновационного развития на 2026-2030 годы: Указ Президента Респ. Беларусь от 21 декабря 2025 г. № 448 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32500448 (дата обращения: 06.07.2026).

7. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года . – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitija-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf (дата обращения: 07.07.2026).

8. Аленина, К.А. Разработка алгоритма оценки уровня цифровой зрелости компании / К.А. Аленина, А.В. Курицына // Экономика, предпринимательство и право. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 1057-1078.

9. Мерзлов, И.Ю. Методы оценки цифровой зрелости: обзор международной практики / И.Ю. Мерзлов // Креативная экономика. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 503-520.

10. Вересович, А.С. Анализ цифровой зрелости и разработка улучшенного методического инструментария для оценки процессов трансформации / А.С. Вересович – URL: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/318782/1/243-247.pdf (дата обращения: 07.07.2026).

11. Паксютов, Г.Д. Бизнес-модель компании Netflix: экономическое и социокультурное значение / Г.Д. Паксютов // Вестник Российского экон. ун-та им. Г.В. Плеханова. – 2020. – № 3. С. 145-156.

12. Медведева, Л.Ф. Цифровая зрелость как фактор конкурентного преимущества в бизнесе / Л.Ф. Медведева, Л.И. Архипова // Седьмая Междунар. науч.-практ. конференция «BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня», Минск, 19-20 мая 2021 г. – URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/43830/1/Medvedeva_Tsifrovaya.pdf (дата обращения: 07.07.2026).

13. Логачева, Н.А. Оценка уровня цифровой зрелости региона в контексте стратегического развития / Н.А. Логачева // Известия Санкт-Петербургского Государственного экономического университета. – 2021. – № 2. – С. 147-152.

14. Хугаева, К.А. Цифровая трансформация региона / К.А. Хугаева, В.Э. Комов // Вестник Тульского филиала Финуниверситета. – 2019. – № 1-1. – С. 295-296.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.07. 2026

УДК 339.5
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-36-43

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО РЫНКА МЯСА И МЯСНОЙ ПРОДУКЦИИ

А.В. Королев,
зав. каф. экономики АПК и природопользования БГЭУ, канд. экон. наук, доцент

К.Н. Соболь,
доцент каф. экономики АПК и природопользования БГЭУ, канд. экон. наук

Ж.К. Тарасевич,
ст. преподаватель каф. экономики АПК и природопользования БГЭУ

В статье проведен анализ развития мирового рынка мяса и мясной продукции, его ключевых региональных игроков. Рассмотрены конъюнктурные факторы и особенности инновационного развития на данном рынке, оказывающие влияние на перспективы присутствия белорусской мясной продукции на зарубежных рынках. Сформированы выводы и предложения по развитию экспортного потенциала белорусской мясной продукции.

Ключевые слова: внешняя торговля, инновационное развитие, конъюнктура, мировой рынок, мясо и мясная продукция, экспортный потенциал.

This article analyzes the development of the global meat and meat product market and its key regional players. It examines market conditions and innovative development trends in this market, which influence the prospects for Belarusian meat products in foreign markets. Conclusions and proposals for developing the export potential of Belarusian meat products are presented.

Keywords: foreign trade, innovative development, market conditions, global market, meat and meat products, export potential.

Введение

Мясной сектор является одним из ключевых в мировом агробизнесе, обеспечивая население незаменимым животным белком. Мясо и мясопродукты являются важнейшими продуктами питания в большинстве стран мира, которым отведено значительное место в обеспечении глобальной, региональной и национальной продовольственной безопасности. Тенденции на мировом рынке мяса определяют его крупнейшие производители и экспортеры, среди которых и развитые, и развивающиеся страны (Бразилия, Китай, Австралия и Океания, США, ЕС, ЕАЭС). Данный рынок сегментирован по видам мяса, при этом каждый сегмент характеризуется определенными особенностями, исследование которых позволяет прогнозировать направления развития рынка, формирование новых ниш. Полученные результаты могут служить базой для разработки предложений по совершенствованию структуры производства в Беларуси, а также определения экспортного потенциала и выявления конкурентных преимуществ Беларуси во взаимной торговле со странами-лидерами рассматриваемого рынка.

Цель данной работы – сформировать предложения по развитию экспортного потенциала белорусской мясной продукции на мировом и региональном рынках ее потребления с учетом конъюнктурных и инновационных факторов.

Основная часть

В 2025 г. мировое производство мяса составило 387,3 млн т (в убойном весе), что на 2,5 % больше, чем в 2024 г. В Азии сконцентрировано 44,4 % данного производства, в Европе – 17 %, в Северной Америке – 14, 0%, в Южной Америке – 13,3 %. В структуре глобального производства основных видов мяса наибольший объем приходится на мясо птицы, доля которого в 2025 г. оценивалась на уровне 40,3 % (156 млн т). Существенную часть выпуска также составляет свинина (33,3 %, или 129 млн т) и говядина (20,0 %, или 77,7 млн т). В наименьших объемах среди основных видов мяса производится баранины (4,9 %, или 19 млн т). За 2024-2025 гг. производство мяса птицы увеличилось (3,7 % к уровню 2024 г.) во всех основных странах-производителях. Мировое производство свинины увеличилось на 2,7 % в 2025 г. в основном за счет увеличения объемов убоя КРС в ключевых странах-производителях, особенно в Китае, а производство говядины выросло лишь на 0,7 %. При этом производство баранины в этом же году снизилось на 0,8 % [1, 2].

Крупнейшими странами-производителями говядины по данным 2025 г. являются: США (15,2 % от мирового производства), Бразилия (14,2 %), Китай (10,3 %), ЕС (8,2 %). Наибольшие объемы производства свинины сконцентрированы в Китае – 60,2 млн т, или 46,8 % мирового производства, ЕС – 22,0 млн т,

или 17,1 %, США – 12,5 млн т, или 9,7 %, Бразилии – 5,6 млн т, или 4,3 % и России – 4,9 млн т, или 3,8 %. Лидерами по производству баранины являются: Китай (26,3 %), Индия (15,1 %), Австралия (4,9 %), Пакистан (4,3 %) и Турция (3,3 %). Крупнейшими странами-производителями мяса птицы являются: Китай (29,2 млн т), США (24,4 млн т), Бразилия (15,6 млн т), ЕС (14,5 млн т), на долю которых в совокупности приходится около 54 % мирового производства. Согласно прогнозам ФАО, к 2035 г. мировое производство мяса увеличится в среднем на 11-12 % (43 млн т). Более половины прогнозируемого увеличения ожидается в Азии, где рост населения, увеличение доходов и продолжающаяся урбанизация стимулируют и поддерживают инвестиции в расширение и интенсификацию сектора.

Потребление мяса в 2023-2025 гг. имеет значительные региональные различия. Так, для стран с низким уровнем дохода оно составляет 6,9 кг rwe (rwe – эквивалент розничного веса), для стран с доходом ниже среднего – 9,7 кг rwe, для стран с доходом выше среднего – 40,4 кг rwe, для стран с высоким уровнем дохода – 58,4 кг rwe [1]. Страны с высоким уровнем дохода демонстрируют снижение потребления на душу населения красного мяса, увеличивая потребление мяса птицы. К 2035 г. мировое потребление мяса достигнет примерно 412 млн т, что на 12 % больше уровня 2025 г. Более высокое потребление мяса ожидается в странах со средним уровнем дохода (в основном Азия и Латинская Америка), в то время как в странах с высоким уровнем дохода ожидается его замедление. Наибольший абсолютный прирост потребления, по прогнозам, будет приходиться на мясо птицы – 29 млн т (+20 %), баранину – 3 млн т (+20%), говядину – 6 млн т (+8 %), свинину – 6 млн т (+4 %). Среднедушевое мировое потребление мяса увеличится примерно на 0,7 кг rwe, достигнув к 2035 г. около 30 кг [1].

Мировая торговля мясом выросла на 3,4 % в 2025 г., достигнув 43,4 млн т, чему способствовал устойчивый глобальный спрос на импорт. Расширение торговли произошло несмотря на ограниченные экспортные запасы в ряде ключевых стран-экспортеров, ограничения на импорт/экспорт, связанные с болезнями животных, меняющуюся торговую политику, меры и геополитическую напряженность, влияющие на источники поставок. На долю говядины пришлась наибольшая доля роста мировой торговли мясом, которая увеличилась примерно на 7 % до 13,9 млн т, что было обусловлено, в частности, высоким спросом на импорт со стороны США. Торговля мясом птицы выросла на 2,0 % в 2025 г., достигнув 16,7 млн т, чему способствовал высокий потребительский спрос, отражающий его относительную доступность по сравнению с другими видами мяса. Торговля свининой выросла на 2,3 % до 10,0 млн т в 2025 г., что отражает высокий спрос на импорт со стороны Мексики, которая стала ведущим мировым импортером, чему способствовал рост потребления и замещение говядины свининой. Напротив, торговля бараниной сократилась на 0,8 % до 1,3 млн т в 2025 г., что отражает сокращение экспортных возможностей из Океании.

В таблице 1 представлены топ-5 экспортеров мясной продукции. Данные демонстрируют концентрацию мирового экспорта мяса в руках ограниченного числа стран. Так, Бразилия, Австралия, ЕС и США формируют ядро предложения по трем основным категориям: говядина, мясо птицы и свинина. На две страны – Австралию и Новую Зеландию приходится 79 % мирового экспорта баранины.

В таблице 2 представлены топ-5 импортеров мясной продукции.

Ключевыми импортерами говядины и баранины являются Китай и США. Япония выступает одним из крупнейших импортеров мяса птицы (8,8 % объема мирового импорта), говядины (5,0 %), свинины (14,1 %). Мексика является лидером по импорту свинины (16,7 %, или 1,68 млн т).

На мировом рынке мяса наблюдается волатильность цен, при этом имеют место существенные региональные различия в ценах на различные виды мяса (табл. 3).

На рисунке 1 представлены индексы мировых цен на различные виды мяса.

Ключевые изменения на рынке связаны с состоянием ключевых зарубежных рынков мяса и мясной продукции. В таблице 4 представлены параметры рынка мяса Бразилии – одного из ключевых производителей и экспортеров мяса и мясной продукции.

Наиболее значимым сегментом на мясном рынке Бразилии остается мясо птицы. В 2025 г. его внутренняя емкость достигла 11,1 млн т, показав рост в 8,3 % к уровню 2023 г. Говядина, исторически являющаяся ключевым продуктом бразильского экспорта, в 2025 г. показывает резкое сокращение внутренней емкости

Таблица 1. Топ-5 экспортеров мясной продукции в 2025 г.

Рейтинг	Говядина		Свинина		Мясо птицы		Баранина	
	Регион (страна)	Доля в мировом экспорте, %	Регион (страна)	Доля в мировом экспорте, %	Регион (страна)	Доля в мировом экспорте, %	Регион (страна)	Доля в мировом экспорте, %
1	Бразилия	29,8	ЕС	30,1	Бразилия	30,8	Австралия	49,7
2	Австралия	15,2	США	28,4	США	20,2	Новая Зеландия	29,3
3	Индия	11,6	Бразилия	17,0	ЕС	12,3	Великобритания	6,6
4	США	7,8	Канада	13,2	Таиланд	9,3	ЕС	2,5
5	Аргентина	6,5	Чили	2,4	Китай	8,9	Индия	1,0

Примечание. Составлена по [2].

Таблица 2. Топ-5 импортеров мясной продукции в 2025 г

Рейтинг	Говядина		Свинина		Мясо птицы		Баранина	
	Регион (страна)	Доля в мировом импорте, %	Регион (страна)	Доля в мировом импорте, %	Регион (страна)	Доля в мировом импорте, %	Регион (страна)	Доля в мировом импорте, %
1	Китай	29,1	Мексика	16,7	Япония	8,8	Китай	28,4
2	США	17,8	Китай	15,8	Великобритания	8,2	США	13,5
3	Япония	5,0	Япония	14,1	Мексика	7,6	ЕС	12,3
4	Республика Корея	4,3	Республика Корея	7,2	Китай	6,8	Великобритания	5,6
5	ЕС	3,3	Великобритания	7,1	ЕС	4,7	Саудовская Аравия	4,1

Примечание. Составлена по [2]

Таблица 3. Динамика цен на основные виды мяса (долл. США за т)

Период	Мясо птицы		Свинина			Говядина			Баранина
	США	Бразилия	США	Бразилия	ЕС (Германия)	Австралия	США	Бразилия	Новая Зеландия
2020 г.	962	1411	2569	2370	1834	5023	6900	4336	6724
2021 г.	1189	1632	2754	2432	1655	5925	8310	5032	7993
2022 г.	1338	2001	2853	2363	1979	6114	8854	5905	8066
2023 г.	1251	1869	2828	2419	2553	5533	8750	4748	6530
2024 г.	1373	1834	2919	2387	2359	6291	9370	4577	6566
2025 г.	1401	1780	2912	2547	2191	7770	9543	5330	8233
Июнь 2026 г.	1396	2015	2910	2514	1889	8271	10312	6526	9464

Примечание. Составлена по [3]

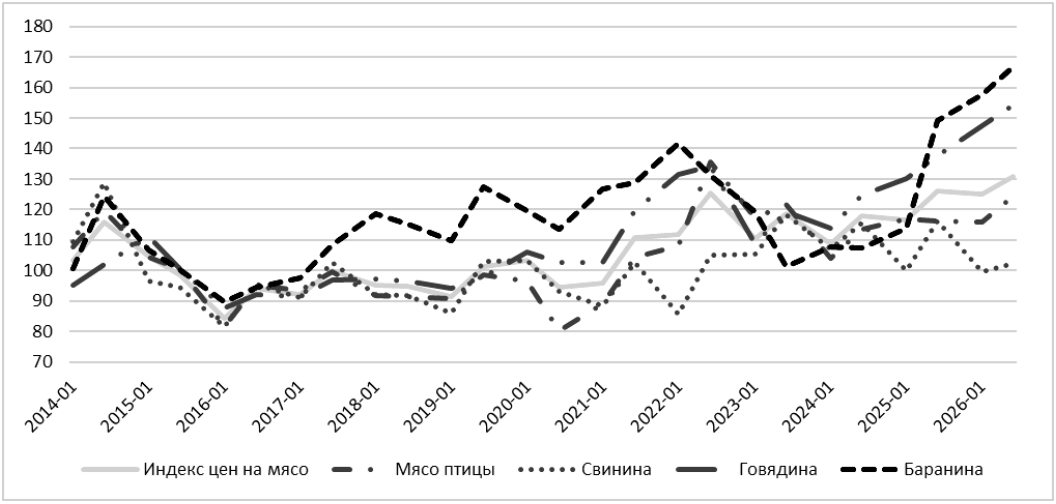


Рисунок 1. Динамика индексов мировых цен на различные виды мяса (выполнен по [3]).

— до 5,8 млн т, что является самым низким показателем за рассматриваемый период. Это снижение происходит на фоне падения производства (до 9,2 млн т) и одновременного роста экспортных поставок (до 3,4 млн т), которые в 2025 г. принесли 18 млрд долларов США дохода, что на 40 % больше по сравнению с 2024 г. Этот спрос в значительной степени обусловлен Китаем, который импортировал 47 % бразильской говядины. В 2025 г. емкость рынка свинины восстановилась до 4145,04 тыс. т после небольшого спада в 2024 г. В целом, структура рынка Бразилии свидетельствует о ее статусе чистого экспортера мяса.

Мясной сектор ЕС сочетает значительный внутренний спрос с активным участием в международной торговле (табл. 5). Наиболее значительный вклад в общий объем рынка вносят свинина (емкость в 2025 г. – 19,0 млн т) и мясо птицы (12,6 млн т). Свиноводство в регионе активно развивается: производство за 2023-2025 гг. увеличилось на 1121 тыс. т, или 5,4 %, выступая ключевым экспортным направлением.

В ЕС наблюдается увеличение объемов производства мяса птицы на 2,6 % и объемов экспорта на 5,6 % за анализируемый период.

Таблица 4. Параметры рынка мясной продукции Бразилии за 2023-2025 гг., тыс. т

Год	Производство	Импорт	Экспорт	Емкость
Говядина				
2023	9516,7	61,52	3029,81	6548,41
2024	9820,9	62,46	3271,5	6641,85
2025	9199,1	62,13	3447	5814,23
Свинина				
2023	5298,6	17,15	1211,7	4105,05
2024	5364,3	19,55	1407,35	3976,5
2025	5282,83	20,1	1157,89	4145,04
Мясо птицы				
2023	14935	2,1	4709,31	10227,79
2024	15189	4,55	4723,68	10469,87
2025	15590,74	4,55	4519,53	11075,76

Примечание. Составлена по [1, 2].

Таблица 5. Параметры рынка мясной продукции ЕС за 2023–2025 гг., тыс. т

Год	Производство	Импорт	Экспорт	Емкость
Говядина				
2023	6461	364	624	6201
2024	6661	391	671	6381
2025	6410	463	595	6278
Свинина				
2023	20829	109	3131	17807
2024	21278	99	3009	18368
2025	21950	97	3030	19017
Мясо птицы				
2023	13393	838	1828	12403
2024	13925	834	1883	12876
2025	13737	842	1930	12649

Примечание. Составлена по [1, 2; 4].

В 2023-2025 гг. емкость рынка мяса США демонстрирует разнонаправленную динамику (табл. 6). Так, емкость рынка говядины снизилась на 4,0 % до 11,5 млн т из-за сокращения объемов производства.

Емкость рынка свинины увеличилась на 3,6 % до 12,6 млн т благодаря увеличению производства. Емкость рынка мяса птицы устойчиво увеличивается (на 1,9 % за 2023-2025 гг.) вслед за ростом производства (на 2,0 %) и внутреннего спроса при минимальном импорте. Ключевыми импортерами мяса в США в 2025 г. являлись США, Канада, Мексика, Австралия и Новая Зеландия, на которые приходилось около 85 % объема импортных поставок.

Таблица 6. Параметры рынка мясной продукции США за 2023-2025 гг., тыс. т

Год	Производство	Импорт	Экспорт	Емкость
Говядина				
2023	11936,77	2106,33	1432,26	11975,32
2024	11943,20	2506,10	1405,74	11951,37
2025	11477,69	2565,98	1216,23	11494,77
Свинина				
2023	12158,51	754,33	3098,91	12173,35
2024	12372,24	762,86	3227,73	12384,18
2025	12607,92	750,29	3324,06	12607,69
Мясо птицы				
2023	23290,64	75,30	3515,35	23294,72
2024	23405,85	83,46	3276,76	23443,50
2025	23745,97	83,46	3243,91	23740,92

Примечание. Составлена по [1, 2].

Австралия и Океания формируют крупный региональный кластер мясного производства и торговли, где внешнеторговая ориентация сочетается с высокой степенью переработки и диверсификацией товарных потоков (табл. 7). Производство говядины за рассматриваемый период выросло на 27,5 % и составило почти 2,9 млн т, при этом 53,9 % ее производства экспортируется. Производство мяса птицы также увеличивается (6,2 % за 2023-2025 гг.) и ориентировано в первую очередь на удовлетворение внутреннего спроса. Ключевой позицией импорта среди рассмотренных товарных групп является свинина, которую в регион поставляют Сингапур, Филиппины, Малайзия и Китай. Данные страны формируют около 75 % объема импортных потоков.

В 2023-2025 гг. импортная политика Китая в мясной сфере характеризуется импортозамещением по свинине (импорт сократился на 3,7 %) и мясу птицы (импорт сократился на 27,1 %) за счет роста внутреннего производства, а также реализации протекционистских мер (например, антидемпинговые пошлины на свинину) (табл. 8).

ЕАЭС формирует крупный интегрированный кластер производства и торговли мясной продукцией, где высокая степень самообеспеченности сочетается с развитой переработкой, диверсификацией товарных потоков и растущей ролью внешних рынков. За последние годы ключевыми тенденциями на рынке мяса России стали расширение экспорта мяса птицы и свинины, увеличение поставок субпродуктов на азиатские рынки, а также укрепление кооперации внутри союза, что обеспечивает перерабатывающим предприятиям устойчивую сырьевую базу (табл. 9).

В рамках ЕАЭС активным игроком на рынке мяса и мясной продукции является Беларусь. На 1 января 2026 г. в хозяйствах всех категорий насчитывалось 4 млн голов КРС, 2,2 млн голов свиней, 54,5 млн голов птицы. За 2025 год произведено скота и птицы (в живом весе) 1823,9 тыс. т (99,9 % к уровню 2024 г.). Реализовано скота и птицы на убой (в живом весе) 1797,6 тыс. т (100,2 % к уровню 2024 г.). Основной удельный вес в объеме реализации приходился на птицу (41,6 %, в 2024 г. – 40,5 %) [5].

Таблица 7. Параметры рынка мясной продукции Австралии и Океании за 2023-2025 гг., тыс. т

Год	Производство	Импорт	Экспорт	Емкость
Говядина				
2023	2250	20	1200	1070
2024	2570	25	1343	1252
2025	2870	30	1546	1354
Свинина				
2023	480	50	60	470
2024	490	55	65	480
2025	495	60	70	485
Мясо птицы				
2023	1300	10	40	1270
2024	1350	12	42	1320
2025	1380	12	45	1347
Примечание. Составлена по [1; 2].				

Таблица 8. Параметры рынка мясной продукции Китая за 2023-2025 гг., тыс. т

Год	Производство	Импорт	Экспорт	Емкость
Говядина				
2023	7527,00	3577,42	16,85	11087,57
2024	7790,00	3905,23	16,63	11678,60
2025	7880,68	3897,07	16,64	11760,43
Свинина				
2023	57943,00	2110,48	265,81	59787,67
2024	57060,00	1980,50	273,93	58766,57
2025	57067,59	2032,31	272,99	58826,91
Мясо птицы				
2023	25630	1313,36	823,97	26119,39
2024	26600	1000	980	26620
2025	26854,18	957,68	512,71	27299,15
Примечание. Составлена по [1, 2].				

Таблица 9. Параметры рынка мясной продукции России за 2023-2025 гг., тыс. т

Год	Производство	Импорт	Экспорт	Ёмкость
Говядина				
2023	1 670	310	45	1 935
2024	1 690	320	50	1 960
2025	1 720	330	55	1 995
Свинина				
2023	4720	25	210	4535
2024	4900	30	230	4700
2025	5050	35	250	4835
Мясо птицы				
2023	5340	210	320	5230
2024	5420	230	350	5300
2025	5500	240	360	5380
Примечание. Составлена по [1; 2].				

В Беларуси в структуре производства пищевой продукции производство мяса и мясопродуктов составляет 24,8 %. В стране потребляется в среднем 103 кг мяса и мясных продуктов на душу населения при рекомендуемых Министерством здравоохранения рациональных нормах потребления в 76 кг. Производство мяса на душу населения превышает потребление на 43 %, а уровень самообеспеченности мясом и мясными продуктами в Беларуси составляет 140,2 %. Благодаря этому поддерживается оптимальный уровень продовольственной безопасности страны и созданы условия для наращивания экспортного потенциала отрасли.

Объемы производства мяса (в убойном весе) в 2025 г. составили 1337 тыс. т, что выше уровня 2024 г. на 10 тыс. т, или 0,8 %. Государственной программой «АПК будущего» на 2026-2030 годы предусмотрено обеспечить рост производства мяса и мясопродуктов в пересчете на мясо на 5,6 % (1419 тыс. т), колбасных изделий и готовых или консервированных изделий из мяса – на 7 % (796 тыс. т) [6]. Объем экспорта мяса в 2025 г. составил 350 тыс. т (369 тыс. т в 2024 г.), импорта – 89 тыс. т (95 тыс. т в 2024 г.). Беларусь сохраняет статус чистого импортера свинины (56 тыс. т), а ключевые экспортные товарные позиции для страны – говядина и мясо птицы.

Для эффективной внешнеэкономической стратегии Беларуси важно учитывать основные направления инновационного развития на рынке мясной продукции ключевых зарубежных игроков (табл. 10). Глобальный рынок мяса переживает сдвиг в сторону растительных альтернатив и устойчивых методов производства. Так, объем мирового рынка заменителей мяса в 2025 г. оценивался в 7,87 млрд долл. США. Ожидается, что к 2034 г. рынок вырастет до 20,7 млрд долл. США, демонстрируя среднегодовой темп роста в 11,55 % в прогнозируемый период. Европа доминировала на рынке заменителей мяса с долей 42,1 % в 2025 г., чему способствовал рост вегетарианских и флекситарианских диет, высокий спрос на устойчивые продукты и снижение потребления мяса в ключевых странах, прежде всего в ЕС [7]. Повышение осведомленности о вопросах здоровья, этичного производства и устойчивого потребления стимулирует спрос на органическое мясо и мясопродукты, а также альтернативные белковые продукты. Применение инновационных методов производства, включая внедрение цифровых и зеленых агротехнологий, направлено на снижение экологической нагрузки, удовлетворение потребностей растущего населения в мясной продукции, повышение ее конкурентоспособности на внутреннем и внешних рынках.

Таблица 10. Ключевые направления инновационного развития на рынке мясной продукции в региональном разрезе

Инновации	США	Китай	Бразилия	Россия и другие страны ЕАЭС	ЕС	Австралия и Океания
Технологические	Автоматизация кормления мясного стада, переработки мясного сырья; производство мезобиливердина из микроводорослей; антимикробная защита для мясных продуктов INNEO	Интеллектуальная низкоуглеродная система «Единое здоровье»; внедрение цифровых агротехнологий; модернизация перерабатывающих мощностей, HPP-обработка мясных продуктов	Внедрение биотехнологий, генетического улучшения поголовья и экологически чистых методов производства, технология радиочастотной дефростации мяса	Автоматизация перерабатывающих заводов; флуоресцентные индикаторы свежести для мяса; инновации в генетике и кормопроизводстве, антимикробные покрытия для мяса; технологии глубокой и безотходной переработки сырья	Регенеративное мясное животноводство; роботизированная обработка мяса с машинным зрением; автоматизированные линии переработки; системы определения качества на базе ИИ в реальном времени; технология радиочастотной дефростации мяса	Кормовая добавка FutureFeed на основе красной водоросли Asparagopsis с бромоформом; пероральные, подкожные и носимые датчики для мониторинга физиологии животных
Маркетинговые	Устойчивая упаковка	Позиционирование альтернативных белков и культивируемого мяса	Устойчивые и экологичные упаковочные материалы	Экологичная и смарт-упаковка	Биоразлагаемая антимикробная упаковка для мяса (проект ATE4MEAT), вакуум-скин упаковка	Позиционирование продуктов с низким углеродным следом; устойчивая упаковка
Продуктовые	Производство альтернативного мяса	CRISPR-модифицированное мясо	Расширение производства растительных мясных альтернатив; разработка премиальных продуктов	Разработка органических мясных продуктов, сертифицированной продукции (Халяль)	Разработка органических и функциональных мясных продуктов, расширение производства растительных альтернатив мясной продукции; ферментированные жиры для альтернативного мяса	Продукция в вакуумной упаковке с продлённым сроком хранения
Организационные	Сетевые бизнес-инкубаторы для фудтех-стартапов; вертикальная интеграция ритейлеров; развитие электронной коммерции мясной продукции	Глобальные вертикальные структуры для обеспечения сырьем; сквозная прослеживаемость мясной продукции на базе QR-кодов и блокчейна	Система отслеживания продукции на основе блокчейна и стандарта GS1 Digital Link с QR-кодом; развитие электронной коммерции мясной продукции; цифровая платформа AGROMET	Единая система цифровой прослеживаемости в рамках ЕАЭС; вертикальные агрохолдинги; развитие электронной коммерции мясной продукции	Прямое сотрудничество с местными фермерами; цифровые QR-коды, NFC-метки и блокчейн-инструменты прослеживаемости; цифровая платформа для управления экологическим и микробиологическим мониторингом ENVIROMAP	Проект «Cropping Enabled Cattle» в Западной Австралии для создания замкнутой циркулярной экономики

Примечание. Составлена по [8]

По результатам проведенного исследования можно обозначить перспективы присутствия мясной продукции Беларуси на рассматриваемых рынках. Рынок Китая обладает значительным экспортным потенциалом для Беларуси, однако он ограничен всего несколькими товарными позициями. Китай обладает большим емким рынком говядины (импорт вырос почти на 9 %, а емкость превышает 11,7 млн т).

Беларусь сохраняет ценовое преимущество только по говядине (5,87 против 6,90 USD/кг в Китае с учетом логистики и пошлин), свинине и индейке. При этом Беларусь имеет важное преимущество в виде

188 аккредитованных предприятий в системе CIFER, однако экспорт наиболее целесообразен по трем позициям: говядине, свинине и индейке, с учетом поставок в рамках тарифных квот, введенных Китаем, и использования железнодорожных перевозок (например, через сервис «Агроэкспресс»). Экспорт белорусского мяса птицы и большинство мясных субпродуктов неконкурентоспособны по ценовому фактору. Австралия – крайне сложный для Беларуси экспортный рынок. Из-за высокой экспортной ориентации региона, рекордного собственного производства говядины (2,87 млн т) и высоких логистических затрат (1,85 USD/кг для полного контейнера) белорусская говядина с учетом пошлин и транспортно-логистических затрат становится дороже местной (7,91 против 6,20 USD/кг), свинина – дороже в 2,4 раза. Поэтому экономически оправданным является только экспорт нишевой высокомаржинальной продукции (термически обработанных продуктов, промышленных ингредиентов и специализированных субпродуктов) при регулярных поставках полными контейнерами и обязательной сертификации и соответствия требованиям Австралии к импорту по биобезопасности BICON.

США – еще более защищенный и конкурентный рынок. После учета логистических затрат (0,525 USD/кг) и пошлины (10 %) ценовое преимущество Беларуси сохраняется лишь по трем нишевым позициям – говядине (6,08 против 6,71 USD/кг), мясу утки (6,13 против 7,27–9,40 USD/кг) и говяжьему сердцу (2,67 против 2,75 USD/кг). При этом по всем остальным видам мяса и субпродуктов продукция США значительно дешевле, ключевые сертифицированные белорусские предприятия-экспортеры отсутствуют, а на страны-экспортеры (Канада, Мексика, Австралия и Новая Зеландия) приходится до 80 % импорта более конкурентоспособного по цене мяса в регион, поэтому коммерчески целесообразного экспорта в ближайшей перспективе не ожидается.

Бразилия – самый неблагоприятный для экспорта белорусской мясной продукции рынок. Так, Бразилия является крупнейшим в мире нетто-экспортером говядины и птицы, импорт мяса составляет менее 0,5 % от производства. Несмотря на то, что белорусская мясная продукция дешевле по большинству позиций (говядина – 6,22 против 9,20 USD/кг, свинина – 3,21 против 5,80) с учетом затрат на логистику (0,55 USD/кг), таможенных пошлин (9-10,8 %) и налогов (до 30 %) вход на рынок становится экономически нецелесообразным. Ключевыми барьерами являются предварительная лицензия MAPA/ANVISA, строгие ветеринарные требования (статус по ящуру), высокие налоги. В этих условиях экспорт возможен только для узких нишевых продуктовых сегментов при работе с крупными бразильскими трейдерами по долгосрочным контрактам.

Наиболее реалистичное направление присутствия белорусской мясной продукции на рынке ЕС – мясо птицы (спрос растет, а потребление говядины и свинины снижается). Ценовое преимущество сохраняется даже с учетом логистики и пошлин, однако требуется соответствие регламентам ЕС, аудит ветслужбы и включение предприятий в список одобренных поставщиков. Кроме того, ЕС становится все более зависимым от импорта из-за экологических норм, роста затрат и сокращения поголовья животных. Однако начиная с 2022-2023 гг. доступ белорусской мясной продукции на рынок ЕС существенно ограничен секторальными и индивидуальными санкциями ЕС в отношении Республики Беларусь. Таким образом, экономическая целесообразность входа на рынок ЕС в текущих условиях крайне ограничена, либо требует точечных согласований через третьи страны.

Заключение

Оценка конъюнктуры мирового рынка мяса и мясной продукции позволяет сделать вывод о значительных перспективах его дальнейшего развития, как в части производства, потребления, так и мировой торговли, что обуславливает важное положение данного рынка в глобальной агропродовольственной системе. Решение экологических проблем, внедрение инновационных технологий и адаптация к изменяющимся условиям рынка, эндемические условия и изменения в потребительских предпочтениях являются ключевыми факторами развития рынка.

В настоящее время наиболее стабильным и перспективным рынком для ввоза белорусской животноводческой продукции во всех категориях (говядина, свинина, мясо птицы) выступают страны ЕАЭС, в том числе Россия. Рынок Китая наиболее привлекателен для белорусской говядины, Австралия привлекательна для поставок мяса птицы и субпродуктов. ЕС может рассматриваться только для мяса птицы и субпродуктов, тогда как рынки США и Бразилии по большинству категорий либо неперспективны из-за падения в этих странах потребления, снижения импорта или реализации стратегии экспортной экспансии, либо требуют точечного нишевого подхода.

В этих условиях для реализации экспортного потенциала национальной мясной отрасли необходимо:

– стимулирование инновационного развития крупных производителей (включая освоение выпуска функциональных мясных продуктов);

– повышение доли экспорта продукции с высокой добавленной стоимостью, соответствующей требованиям рынков и запросам потребителей;

– поддержка выхода на новые зарубежные рынки за счет развития биржевой торговли и снижения логистических барьеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. OECD/FAO (2026), OECD-FAO Agricultural Outlook 2026-2035, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, https://doi.org/10.1787/47874669-en.

2. FAO. 2026. Meat Market Review: Overview of global market developments in 2025. Rome.

3. FAO Meat Price Index / FAO. – 2026. – URL: https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities-overview/basic-foods/fao-meat-price-index/en (date of access: 01.07.2026).

4. AVEC Annual Report 2025 // Association of Poultry Processors and Poultry Trade in the EU countries. – 2026. – URL: https://avec-poultry.eu/wp-content/uploads/2025/08/07394-AVEC-annual-report-2025.pdf (date of access: 01.07.2026).

5. Пресс-релиз «О численности скота и птицы, производстве продукции животноводства в хозяйствах всех категорий за 2025 год» // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaistvo/selskoe-khozyaystvo/godovye-dannye/o-chislennosti-skota-i-ptitsy-proizvodstve-produktsii-zhivotnovodstva-v-khozyaystvakh-vsekh-kategori/ (дата обращения: 01.07.2026)

6. О Государственной программе «АПК будущего» на 2026-2030 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 31 декабря 2025 г., № 814 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500814 (дата обращения: 25.06.2026).

7. Meat Substitutes Market // Fortune Business Insights. – 2026. – URL: https://www.fortunebusinesinsights. com/industry-reports/meat-substitutes-market-100239 (date of access: 04.07.2026).

8. Технологии [сайт] // Навигатор мясной промышленности. – 2026. – URL: https://meatindustry.pro/category/tehnologii/page/11/ (дата обращения: 01.07.2026).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.07.2026

УДК 338.43:001.895
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-43-48

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ АПК

Т.В. Гусарова,
ст. преподаватель каф. бухгалтерского учета БГСХА, магистр экон. наук

В статье исследована сущность категорий «инновации» и «инновационное развитие», систематизированы теоретические подходы к их определению с учетом отраслевых особенностей агропромышленного производства. Установлена многовариантность определений инновационного развития в зависимости от уровня анализа (регион, организация, отрасль) и предметной области исследователей. На основе данных Глобального инновационного индекса и национальной системы статистических индикаторов определены позитивные сдвиги и системные ограничения инновационного развития организаций АПК Республики Беларусь.

Ключевые слова: инновации, инновационное развитие, индикаторы, инновационная деятельность, агропромышленный комплекс, эффективность.

This article explores the essence of the categories «innovation» and «innovative development» and systematizes theoretical approaches to their definition, taking into account the sectoral characteristics of agro-industrial production. A multivariate definition of innovative development has been established depending on the level of analysis (region, organization, industry) and the subject area of the researchers. Based on the data of the Global Innovation Index and the national system of statistical indicators, positive shifts and systemic constraints in the innovative development of agricultural organizations in the Republic of Belarus are identified.

Keywords: innovations, innovative development, indicators, innovative activities, aagribusiness, efficiency..

Введение

Современный этап социально-экономического развития Республики Беларусь характеризуется высокой интенсивностью распространения и внедрения инноваций [1, 2]. В условиях трансформации международных экономических отношений и глобальной конкуренции инновационный процесс выступает базовым условием обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития экономики организаций АПК. В теории и практике исследуемое направление широко представлено в научных трудах Ф. Кенэ, А. Смит, J.B. Say, Д. Рикардо, К. Маркса, К. Менгер, Н.Д. Кондратьева, Й.А. Шумпетера, Д. Шадиева [3-11].

Инновационное развитие АПК Республики Беларусь является одним из определяющих приоритетов в стране и основывается на основных направлениях государственной политики. Последняя ориентирована на создание эффективной национальной инновационной системы, однако уровень инновационной активности и страновые позиции в глобальных рейтингах указывают на наличие нерешенных проблем, требующих научного осмысления.

Целью исследования является теоретическое обоснование научных основ инновационного развития организаций АПК Республики Беларусь в контексте современных экономических тенденций.

Материалы и методы

Теоретические и методические аспекты исследования сформированы на основе обобщения и систематизации научных трудов отечественных и зарубежных авторов, основных положениях принятых нормативно-правовых и программных документов Республики Беларусь. В исследовании применен комплекс общенаучных методов (теоретико-методологический анализ и синтез, системный и сравнительный анализ, историко-экономический подход, абстрактно-логический метод), а также приемы группировки и классификации данных.

Основная часть

Современное социально-экономическое развитие Республики Беларусь неразрывно связано с инновационным. В соответствии с Государственной программой инновационного развития Республики Беларусь на 2026-2030 годы в стране взят вектор на «устойчивое развитие национальной инновационной системы, направленное на обеспечение научно-технологической безопасности посредством внедрения инноваций и передовых технологий в реальный сектор экономики и другие сферы» [1].

Изучение термина «инновационное развитие» основывается на определении сущности понятия «инновация». В соответствии с Законом Республики Беларусь от 10 июля 2012 г. № 425-З «О государственной инновационной политике и инновационной деятельности» инновация представляет собой введенные в гражданский оборот или используемые для собственных нужд новая или усовершенствованная продукция, новая или усовершенствованная технология, новая услуга, новое организационно-техническое решение производственного, административного, коммерческого или иного характера [2]. Другими словами, инновация – это не просто идея или разработка, а их реальное внедрение, которое дает измеримый экономический или общественно значимый результат.

Изучение и обобщение трудов отечественных и зарубежных авторов позволило установить, что первой попыткой теоретического осмысления инноваций (от лат. innovatio – введение чего-либо нового) явилась доктрина меркантилизма. Ее представители (А. Серра, И. Посошков и др.) поощряли изобретательность при развитии ремесленного производства. Ф. Кэне впервые выделил представителей инновационного процесса (индустрии, торговли и либеральных профессий) в «бесплодный класс» [3, с. 160]. А. Смит подчеркивал, что инновации – это результат разделения труда: изобретения и усовершенствования, которые вносит в производство рабочий, поглощенный одной какой-нибудь операцией и ежедневно выполняющий ее [4]. Согласно воззрениям Ж. Б. Сея, ключевую роль в экономическом прогрессе играет предприниматель, к числу которых ученый относил промышленников, изобретателей и земледельцев [5]. Д. Рикардо определил, что меновая стоимость зависит не только от количества и качества труда, но и от редкости товара [6, с. 96].

Идеи представителей утопического социализма (XVI–XVIII вв.) заложили предпосылки для современной теории кризисов и инноваций: К. Маркс и Ф. Энгельс выделили капиталосберегающие и трудосберегающие инновации [7, с. 116]; К. Менгер в рамках теории экономического анализа сосредоточился на соотношении между человеческими потребностями и способностями товаров удовлетворять их, а также рассмотрел инновации как экономическое благо, ценное для общества [8, с. 49-50].

Н.Д. Кондратьев в 1920-х годах обосновал роль технических нововведений в формировании циклических колебаний макроэкономических показателей предпринимательской деятельности и сформулировал первую концепцию долговременных колебаний в экономике – так называемых длинных волн Кондратьева [9]. Последователем Н.Д. Кондратьева был Й.А. Шумпетер, трактовавший инновации как любое возможное изменение, происходящее вследствие коммерческого использования новых или усовершенствования существующих решений технического, технологического, организационного характера в процессах производства, снабжения, сбыта продукции [10].

В современной научной литературе выделяют три научно-методических подхода к раскрытию сущности категории «инновации». Во-первых, это результат использования научно-технических достижений – конечный продукт или объект, воплощающий новые решения [11-13]. Во-вторых, инновация – это процесс преобразований: от зарождения идеи до ее реализации, влекущий переход системы в новое состояние [14-15]. В-третьих, инновация рассматривается как управленческий инструмент, обеспечивающий результативность и конкурентоспособность субъекта хозяйствования [16-18].

Усиление влияния инноваций в социально-экономическом развитии (на мировом и национальном уровнях) привело к становлению категории «инновационное развитие».

Инновационное развитие представляет собой системный процесс, базирующийся на внедрении инноваций и предполагающий их целенаправленное использование для повышения эффективности хозяйственной деятельности субъектов. Ключевым направлением такого развития выступает совершенствование производственно-экономической деятельности, обеспечивающее достижение финансовой устойчивости организаций как необходимого условия их долгосрочного функционирования.

На основе сделанных выводов и с целью раскрытия сущности инновационного развития проведен сравнительный анализ авторских подходов к определению данной категории (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ авторских подходов к определению инновационного развития

Автор, источник	Сущность	Ключевой акцент
Н.А. Багдасарян [19, с. 93]	Инновационное развитие – системное, стратегическое развитие экономики на основе доминирования закона кооперации с использованием качественного человека, качественного общественного интеллекта с приоритетом гуманизации и экологизации его деятельности	Человеческий капитал, общественный интеллект, кооперация
Г.А. Иовлев, И.И. Голдина [20, с. 133]	Инновационное развитие – совместное и взаимосвязанное преобразование экономики на основе научно-технического прогресса (НТП), творческого потенциала, направленное на формирование более высокого качества жизни и развитие социальных систем	НТП и творческий потенциал
Т.Г. Логутова, К.Э. Борблик [21, с. 52]	Инновационное развитие – тип развития экономики, для которого характерно перманентное технологическое совершенствование деятельности субъектов хозяйствования, создание и использование новых знаний и инноваций, которые принимают разнообразные формы (товары, услуги, управленческие решения и др.).	Новые знания и их материализация (товары, услуги, управленческие решения)
Н.В. Колосова [22, с. 7]	Инновационное развитие – совершенствование системы общественного воспроизводства на основе внедрения технологических, институциональных и социальных инноваций	Технологические, институциональные и социальные инновации
Г.С. Мерзликина [23, с. 8]	Инновационное развитие региона (на основе эссенциального подхода) – радикальное обновление внутренней среды региона, в том числе за счет сокращения или ликвидации результатов достигнутого.	Созидательное разрушение, обновление внутренней среды
Н.Ш. Орлова, Г.И. Юрковская [24]	Инновационное развитие организации – непрерывный процесс поиска, разработки и внедрения новых методов, способов, процессов и других нововведений, направленный на повышение уровня качества продуктов и услуг для достижения максимальной удовлетворенности клиентов, обеспечение эффективности функционирования и конкурентоспособности организации в долгосрочной перспективе	Управленческие и процессные инновации, клиентоориентированность
С.М. Балькин [25, с. 27]	Инновационное развитие в промышленности – это динамический процесс, характеризующийся интеграцией новых технологий, методов и организационных подходов, направленный на оптимизацию производственных процессов, увеличение конкурентоспособности продукции и устойчивое развитие отрасли, учитывающее экологические и социальные факторы	Интеграция новых технологий, организационных подходов, устойчивость
Ю. Рыбалко [26, с. 37]	Инновационное развитие АПК – эволюция аграрной экономики, предполагающая использование новейших подходов от исходной идеи до реализации результативной коммерческой деятельности (в том числе через маркетинговую составляющую) субъектов хозяйствования путем интеграционного взаимодействия научных институтов, организаций, отраслей АПК	Интеграция науки, бизнеса, маркетинга

Примечание. Собственная разработка на основе [19-26].

Анализ авторских трактовок категории «инновационное развитие» показал, что не существует единого определения, так как каждый исследователь учитывает специфику своей предметной области. Так, Н.А. Багдасарян отождествляет исследуемое понятие с кооперацией и человеческим капиталом, делая акцент на гуманизацию и экологизацию [19]. Г.А. Иовлев и И.И. Голдина смещают фокус на НТП и творческий потенциал, рассматривая их как главный двигатель преобразований [20]. Т.Г. Логутова, К.Э. Борблик [21] и Н.В. Колосова в своих подходах подчеркивают комплексный характер инновационного развития: наряду с технологическими сдвигами значимую роль играют институциональные и социальные трансформации, при этом принципиальное значение имеет практическая реализуемость новых

знаний – их воплощение в товарах, услугах и управленческих решениях [22].

На уровне региона подход приобретает иной характер. Так, Г.С. Мерзликина выделяет ключевым элементом «созидательное разрушение» [23]. По мнению автора, инновационное развитие – это радикальное обновление внутренней среды региона, в том числе через сокращение или ликвидацию результатов достигнутого. На уровне организации приоритеты другие. Н.Ш. Орлова и Г.И. Юрковская делают ставку на непрерывный поиск и внедрение нового ради качества и удовлетворенности с целью формирования долгосрочной конкурентоспособности [24]. Применительно к промышленности С.М. Балькин рассматривает исследуемую категорию как процесс интеграции новых технологий, организационных подходов и устойчивости, нацеленный на оптимизацию производства, рост конкурентоспособности продукции и устойчивое развитие отрасли с учетом экологических и социальных факторов [25]. В трактовке Ю. Рыбалко инновационное развитие АПК выступает как эволюция аграрной экономики, где результативность обеспечивается сквозным внедрением идей (от разработки до коммерциализации) на базе интеграции науки, бизнеса и маркетинга [26].

Таким образом, разнородность определений позволяет выбирать смысловые акценты под конкретную задачу. Для региона важны радикальные перемены и обновление среды, для отрасли – слаженная работа науки, производства и рынка с учетом устойчивости, для организации – клиент и постоянные улучшения. Именно данная многомерность понятия помогает выстраивать стратегии инновационного развития, опираясь на драйверы, подтвердившие свою эффективность в заданных экономических и институциональных условиях.

Операционализация понятия «инновационное развитие» базируется на системе измеримых показателей. В международной практике для оценки инновационного потенциала и результатов применяются индикаторы Глобального инновационного индекса (Global Innovation Index, ГИИ), а также национальные системы мониторинга.

ГИИ рассчитывается на основе 81 индикатора, объединенных в 7 блоков. Итоговый индекс представляет собой среднее двух субиндексов – ресурсов на развитие инноваций и эффекта от внедрения инноваций, что позволяет объективно оценить эффективность усилий по развитию инновационной сферы в той или иной стране. В 2025 г. Республика Беларусь в ГИИ заняла 85-е место среди 139 стран и территорий мира. Результат составил 25,1 баллов (из 100 максимально возможных), что на 0,9 балла больше, чем в 2024 г. В соответствии с рейтингом максимальный уровень развития инноваций в стране был достигнут в 2015 г. со значением 38,2 балла, самое низкое значение в 2024 г. [27].

В соответствии с ГИИ наиболее сильными сторонами сферы инноваций в стране являются развитый человеческий капитал и эффективность системы образования. Однако согласно рейтингу, Республика Беларусь традиционно занимает низкие позиции по институциональным индикаторам ГИИ, что обусловлено ограниченным развитием бизнес-среды, а также недостаточной эффективностью инновационной инфраструктуры.

Для количественной оценки масштабов и результатов инноваций в Республике Беларусь используется система статистических индикаторов, характеризующих инновационную деятельность (табл. 2). За 2020-2024 гг. в промышленности Республики Беларусь, в том числе и пищевой, число организаций, осуществлявших затраты на инновации, увеличилось на 11,9 %, а их удельный вес достиг 30,1 %. Объем отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) вырос в 2,18 раза, ее удельный вес в общем объеме отгруженной продукции (работ, услуг) увеличился на 4,4 п.п. и составил 22,3 %. Удельный вес отгруженной инновационной продукции (работ, услуг), новой для внутреннего рынка увеличился на 16,0 п.п. (до 64,2 %), новой для мирового рынка – на 3,4 п.п. (до 3,9 %).

Таким образом, проведенное исследование свидетельствует о последовательном расширении инновационной деятельности и повышении результативности инноваций, в том числе в АПК Республики Беларусь. Применение указанных индикаторов дает возможность не только наблюдать за динамикой инновационного развития экономики организаций, но и сопоставлять результаты на межстрановом уровне, диагностировать проблемные зоны и своевременно корректировать государственную политику в сфере науки, технологий и инноваций.

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие научные результаты:

1. Систематизированы теоретические подходы к определениям категорий «инновации» и «инновационное развитие», что позволило выделить ключевые научные области в зависимости от предметной области и уровня анализа:

– для региона – созидательное разрушение и обновление среды;

– для отрасли – интеграция науки, производства и рынка с учетом устойчивости;

– для организации – непрерывные улучшения и клиентоориентированность.

Данная систематизация создает основу для выбора приоритетных направлений инновационного развития в конкретных экономических и институциональных условиях.

2. На основе анализа статистических индикаторов и позиции Республики Беларусь в ГИИ выявлены положительные тенденции (рост числа организаций, осуществлявших затраты на инновации, увеличение объема и удельного веса отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) в промышленности, в том числе и новой для внутреннего рынка) при сохраняющихся системных проблемах: незначительном удельном весе отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) для мирового рынка (3,9%), низкой позиции по институциональным индикаторам ГИИ.

Таблица 2. Индикаторы, характеризующие инновационную деятельность в Республике Беларусь, 2020-2024 гг.

Показатель	Год					2024 г. в % к 2020 г.
	2020	2021	2022	2023	2024	
1	2	3	4	5	6	7
Число организаций, осуществлявших затраты на инновации, единиц	528	521	521	525	565	107,0
в том числе: организаций промышленности	447	448	449	457	500	111,9
Удельный вес организаций, осуществлявших затраты на инновации, в общем числе обследованных организаций, %	20,6	19,7	20,0	20,4	21,5	0,9 п.п.
в том числе: в общем числе обследованных организаций промышленности	27,1	27,5	27,8	28,3	30,1	3,0 п. п.
Объем отгруженной продукции (работ, услуг) собственного производства организаций промышленности в фактических отпускных ценах за вычетом налогов и сборов, исчисляемых из выручки, млн руб.	93184,8	123874,8	134354,1	149126,8	163651,6	175,6
из него объем отгруженной инновационной продукции (работ, услуг)	16696,3	24532,1	23779,0	33093,1	36512,3	218,7
Удельный вес отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) в общем объеме отгруженной продукции (работ, услуг) организаций промышленности, %	17,9	19,8	17,7	22,2	22,3	4,4 п. п.
Удельный вес отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) новой для внутреннего рынка в общем объеме отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) организаций промышленности, %	48,2	52,8	49,0	55,8	64,2	16,0 п. п.
Удельный вес отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) новой для мирового рынка в общем объеме отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) организаций промышленности, %	0,5	0,6	0,6	0,8	3,9	3,4 п. п.
Удельный вес организаций, осуществлявших затраты на инновации и (или) отгружавших инновационную продукцию (работы, услуги), в общем числе обследованных организаций промышленности, %	34,2	35,0	35,1	34,8	36,0	1,8 п. п.
Примечание. Составлена по данным [28].						

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2026-2030 годы: Указ Президента Респ. Беларусь от 21 декабря 2025 г. № 448. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0= P32500448 (дата обращения: 29.07.2026).

2. О государственной инновационной политике и инновационной деятельности: Закон Респ. Беларусь от 10 июля 2012 г. № 425-З: с изм. и доп. от 6 января 2022 г. № 152-З. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0= H11200425 (дата обращения : 29.07.2026).

3. Кенэ, Ф. Избранные экономические произведения / Ф. Кенэ. – М.: Соцэкгиз, 1960. – 572 с.

4. Смит, А. Исследование о природе и причинах богатства народов / А. Смит; пер. с анг. П. Клюкина. – М.: Эксмо, 2022. – 1056 с.

5. Say, J.B. A Treatise on Political Economy, or the Production, Distribution, and Consumption of Wealth [Electronic resource] / by Jean-Baptiste Say; transl. from the 4th ed. of the French by C.R. Prinsep. – London: Longman, Hurst, Rees, Orme, and Brown, 1821. – 2 vol. // Econlib. – URL: https://www.econlib.org/library/Say/say T.html (date of access: 29.07.2026).

6. Рикардо, Д. Начала политической экономии и налогового обложения (Prin-ciples of political economy and taxation: избранное) / Д. Рикардо; пер. с англ.; пред. П.Н. Клюкина. – М.: Эксмо, 2007. – 953 с.

7. Маркс, К. «Капитал» Карла Маркса / Все 4-е тома в изложении Г. Девиля, К. Каутского, В. Гиршфельда и [и др.] Со вступ. очерками Ленина и К. Каутского и прил. статьи Р. Гильфердинга. Сост. Г. Литвин-Молотов. – Ростов-на-Дону; Краснодар: Буревестник, 1924. – XXIV, 373 с.

8. Менгер, К. Основания политической экономии / К. Менгер // Австрийская школа в политической экономии: сб.; пер. с нем. В. Г. Сорокина; под общ. ред. А.В. Куряева. – М.: Экономика, 1992. – С. 49-55.

9. Кондратьев, Н.Д. Основные проблемы экономической статики и динамики: предварительный эскиз / Н.Д. Кондратьев; под. ред. В.В Иванова, М.С. Ковалевой. – М.: Наука, 1991. – 569 с.

10. Шумпетер, Й.А. Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия / Й.А. Шумпетер; [предисл. В.С. Автомонова]; пер. с нем. В.С. Автономова, М.С. Любского, А.Ю. Чепуренко; пер. с англ. В.С. Автономов [и др.]. – М.: Эксмо, 2007. – 864 с.

11. Шадиева, Д. Анализ мировых тенденций финансирования инновационной деятельности / Д. Шадиева // Мировое и национальное хозяйство. – 2016. – № 2 (37). – С. 120-127.

12. Byrski, B. Procesy innowacyjne w przemysle / B. Byrski. – Krakow: Akademia Ekonomiczna w Krakowie, 1986. – 55 p.

13. Poznanski, K. Innowacje w gospodarce kapitalistycznej / K. Poznanski. – Warszawa: Państwowe Wydawn, Naukowe, 1979. – 32 p.

14. Королева, И.В. К вопросу об инновационной составляющей национальной модели развития российской экономики / И.В. Королева // Национальная модель развития экономики России: материалы VI–II Чаяновских чтений; под ред. Н.И. Архиповой. – М.: РГГУ, 2008. – С. 133-134.

15. Менгер, К. Основания политической экономии / К. Менгер // Австрийская школа в политической экономии: сб.; пер. с нем. В.Г. Сорокина; под общ. ред. А.В. Куряева. – М.: Экономика, 1992. – С. 49-55.

16. Батрутдинов, А.С. Методологические проблемы стратегического управления воспроизводством основных фондов крупного промышленного предприятия на инновационной основе: автореф. дис. ... д-ра. экон. наук: 08.00.05 / Батрутдинов Асхат Салихович; Санкт-Петербургский гос. инженерно-экономический ун-т. – СПб., 2009. – 37 с.

17. Санто, Б. Инновация как средство экономического развития / Б. Санто; пер. с венг. – М.: Прогресс, 1990. – 296 с.

18. Твисс, Б. Управление научно-техническими нововведениями / Б. Твисс; пер. с англ. – М.: Экономика, 1989. – 271 с.

19. Багдасарян, Н.А. «Инновационное развитие»: анализ понятия и уточнение определения / Н.А. Багдасарян // Бюллетень науки и практики: электрон. журнал. – 2017. – № 7 (20). – С. 93-100.

20. Иовлев, Г.А. Инновационное развитие экономики России как одно из направлений развития экономической науки / Г.А. Иовлев, И.И. Голдина // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2021. – № 3 (101). – С. 112-125.

21. Логутова, Т.Г. К вопросу о подходах к определению понятия инновационного развития / Т.Г. Логутова, К.Э. Борблик // Вестник Сургутского гос. ун-та. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 47-55.

22. Колосова, Н.В. Управление инновационным развитием экономических систем. Оценка и прогнозирование: автореф. дис. ... канд-та экон. наук: 08.00.05 / Колосова Нелля Викторовна; Воронежский гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2020. – 20 с.

23. Мерзликина, Г.С. Инновационное развитие региона: новые критерии – показатели оценки / Г.С. Мерзликина // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Экономика. – 2020. – № 3. – С. 7-18.

24. Орлова, Н.Ш. Анализ подходов к определению понятия «инновационное развитие / Н.Ш. Орлова, Г.И. Юрковская // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-podhodov-k-opredeleniyu-ponyatiya-innovatsionnoe-razvitie/viewer (дата обращения: 29.07.2026).

25. Балькин, С.М. Индустрия 5.0 и инновационное развитие промышленности / С.М. Балькин // Развитие инструментария аналитики инновационных процессов в системах разного уровня: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., г. Самара, 24 октября 2025 г. / Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева; под. общ. ред. Н. М. Тюкавкина. – Самара. – С. 21-28.

26. Рыбалко, Ю. Инновационное развитие агропромышленного комплекса на основе кластерного подхода / Ю. Рыбалко // Аграрная экономика. – 2023. – № 6. – С. 32-40.

27. Global Innovation Index 2025 // Wipo. – URL: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2025/en/index.html (date of access: 29.07.2026).

28. Официальный сайт Национального статистического комитета Республики Беларусь. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/nauka-i-innovatsii/innovatsii/ (дата обращения: 29.07.2026).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 30.07.2026

Правила для авторов

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

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

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

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

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

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

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

4) при наборе формул необходимо следовать общепринятым правилам:

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

Научно-исследовательская аналитическая лаборатория научного отдела БГАТУ



Сотрудниками научно-исследовательской аналитической лаборатории (НИАЛ) разработана оригинальная методика определения содержания в кормах структурных углеводов: нейтрально-детергентной и кислотно-детергентной клетчатки.

НИАЛ проводит испытания кормов для сельскохозяйственных животных в хозяйствах Минской области.

Также проводятся физико-химические исследования в различных отраслях сельского хозяйства:

- *В животноводстве:*

- определение содержания питательных веществ в кормах;

- определение содержания в кормах структурных углеводов (НДК и КДК).

- *В тепличном овощеводстве и растениеводстве:*

- физико-химическое исследование почв (весь спектр анализов, кроме анализов на присутствие радионуклидов);

- анализ химического состава сельхозпродукции (растений и плодов);

- определение физико-химического состава удобрений и средств защиты растений.

- *Анализ сточных вод:*

- животноводческих комплексов и ферм;

- перерабатывающих предприятий;

- в системах мойки сельскохозяйственной техники и оборудования в ремонтном производстве.