СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 2. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Карашаева А. С., Завалин А. А., Ивашенков Г.А., Старостина Е.Н. Влияние удобрений и средств химизации на плодородие почвы и питание растений ……4

Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д., Иванов Д.Ю. Теоретические предпосылки к определению глубины залегания и величины уплотнённого слоя почвы……..14

Безух Е.П., Зыков А.В. Обоснование рациональных доз внесения азотных удобрений и их влияние на урожайность и развитие яблони сорта Антоновка ……...32

Минин В.Б., Черникова М.В. Оценка эффективности органической технологии возделывания картофеля в условиях Ленинградской области …….....42

Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Моделирование работы мобильного робота для обоснования его функциональных параметров и алгоритма управления ……57

РАЗДЕЛ 3. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Анализ животноводческих объектов с использованием геоинформационных систем ……....…….....72

Трифанов А.В., Базыкин В.И., Плаксин И.Е. Определения выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней ……...…..84

Джабборов Н.И., Сошнев Д.А., Трифанов А.В. Результаты энергетического анализа технологии производства мяса птицы в технологических модулях ……..95

Базыкин В.И. Способы снижения выбросов климатически активных газов на свинофермах……113

Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Методика определения выбросов метана при производстве пищевых куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров……...130

Миронова Т.Ю., Миронов В.Н. Оценка факторов, влияющих на расход воды при уборке доильного зала……141

Маклахов А.В., Симонов Г.А., Приятелев В.В., Марценюк Е.А. Перспективы развития производства сельскохозяйственной продукции в АПК Вологодской области……151

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Научная статья
УДК:631.559:631.45:631.81 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-4-14

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ И СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ И ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ

Ареза Султанбековна Карашаева[1]✉, Алексей Анатольевич Завалин[2], Глеб Алексеевич Ивашенков[3], Елена Николаевна Старостина[4]

[1,2,3,4]Всероссийский НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

[1]k.areza@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-0737-7492
[2]zavalin.52@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-7717-877X
[3]givashenkov@bk.ru
[4] Starostinael@list.ru

Аннотация. В статье проанализированы результаты многолетнего полевого опыта на фоне двух систем удобрений с применением средств химизации на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центрального Нечерноземья. Средние за период исследования данные (1985-2012 гг.) показывают, что в посевах озимой пшеницы окупаемость 1 кг NPK составляла 1,5 и 1,3 кг зерна при применении органоминеральной и минеральной систем удобрения, а при комплексном применении той же системы удобрений с химическими средствами защиты растений окупаемость удобрений возрастала до 9,0 и 8,6 кг/кг урожая. Увеличение окупаемости удобрений урожаем наблюдалось и в 2019-2021 гг. При использовании микроэлементов и регуляторов роста она повышалась с 7,9 до 12,8 кг/кг зерна, а в вариантах при внесении только одних удобрений на каждый кг NPK приходилось 4,4 и 4,6 кг зерна.

Ключевые слова: плодородие почвы, севооборот, защита растений, эффективность удобрений

***Для цитирования*:** Карашаева А. С., Завалин А. А., Ивашенков Г.А., Старостина Е.Н. Влияние удобрений и средств химизации на плодородие почвы и питание растений // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 4-14 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-4-14

Research article
Universal Decimal Code 631.559:631.45:631.81

INFLUENCE OF FERTILIZERS AND CHEMICAL AGENTS ON SOIL FERTILITY AND PLANT NUTRITION

Areza S. Karashaeva[1]✉, Aleksey A. Zavalin[2], Gleb A. Ivashenkov[3], Elena N. Starostina[4]

[1,2,3,4] D. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry, Moscow, Russia

[1]k.areza@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-0737-7492
[2]zavalin.52@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-7717-877X
[3]givashenkov@bk.ru
[4] Starostinael@list.ru

Abstract. The article analyzes the results of the long-term field experiment on the background of two fertilizing systems with the use of chemical agents on sod-podzolic heavy loamy soil of the Central Non-Chernozem region. The average data for the research period of 1985-2012 showed that in winter wheat crops the payback of 1 kg of NPK was 1.5 and 1.3 kg of grain when using organic-and-mineral and mineral fertilizing systems. Under the integrated application of the same fertilizing system with chemical agents of plant protection, the payback of fertilizers increased to 9.0 and 8.6 kg/kg of yield. The increase in the fertilizer payback by yield was also observed in 2019-2021. When the microelements and growth regulators were used, it increased from 7.9 to 12.8 kg/kg of grain. In the variants with the application of fertilizers alone, it was 4.4 and 4.6 kg of grain per each kg of NPK.

***Key words*:** soil fertility, crop rotation, plant protection, fertilizer efficiency.

***For citation*:** Karashaeva A.S., Zavalin A.A., Ivashenkov G.A., Starostina E.N. Influence of fertilizers and chemical agents on soil fertility and // AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 4-14 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-4-14

Введение. Главной задачей агропромышленного комплекса нашей страны является удовлетворение потребности населения в продуктах питания хорошего качества и в необходимом ассортименте. Для получения запланированного урожая высокого качества очень важно поддерживать оптимальный биологический круговорот веществ в агроэкосистеме. В настоящее время проводится немало длительных стационарных опытов по изучению эффективности удобрений, но нет достаточной информации о последствиях многолетнего применения комплекса удобрений с химическими средствами защиты растений. Существенным фактором, ограничивающим рост урожайности культур и эффективность применения удобрений, является сильная засоренность посевов, пораженность растений вредителями и болезнями, полегание зерновых на высоком фоне питания. Известно также, что агроценозы засоряются определенными группами и видами сорных растений. Например, в посевах озимой пшеницы преобладают озимые и зимующие виды сорных растений, а в посевах яровых – ранние яровые, средние и позднеспелые виды однолетников. Снижение продуктивности растений связано в первую очередь с потреблением сорными растениями значительного количества питательных элементов из почвы, обострением конкурентных взаимоотношений за использование питательных элементов [1]. Поэтому необходимо резко повысить культуру земледелия, внедрив научно-обоснованные севообороты, новейшие технологические приемы обработки почвы и ухода за растениями, осуществить химическую мелиорацию почв, защитить

основные доминанты агроценозов от вредителей, болезней, сорняков, снижающих эффективность удобрений и продуктивный процесс у культурных растений.

Цель исследования. Оценить влияние комплексного применения удобрений с использованием средств химизации на продуктивность и устойчивость культурных растений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центрального Нечерноземья. Проанализировать разработку приемов по поддержанию и улучшению плодородия почвы в условиях длительного полевого опыта.

Материалы и методы. Исследования начали проводить в1959-1961гг. на Центральной опытной станции в Домодедовском городском округе Московской области. Опыт был заложен в трех полях в полевом севообороте с чередованием следующих культур: вика с овсом, озимая пшеница с подсевом клевера, клевер, озимая пшеница, картофель, ячмень с закладкой последовательно с интервалом в 1 год. Повторность на каждом поле 4-х кратная. Площадь делянки в 1-2-й ротациях – 174 м^2, начиная с третьей ротации – 90 м^2. Учетная площадь – 24 м^2.

Исходные агрохимические свойства почвы были следующими: pH – 4,3-4,5, Hг – 4,5 мг-экв/100 г, S – 8,3 мг-экв/100 г, V – 64,3%, содержание гумуса по Тюрину – 1,58%, P_2O_5 по Кирсанову – 21 мг/кг; K_2O по Масловой – 113 мг/кг почвы [2]. Следовательно, реакция почвы до закладки опыта была кислая, агроценозы были в неблагоприятном фитосанитарном состоянии, росли многочисленные сорные растения, урожайность зерна находилась на уровне 10 ц/га [1].

Результаты и обсуждение. В схеме длительного опыта СШ-2 на фоне общих агротехнических мероприятий изучались варианты с комплексным применением удобрений, гербицидов, ретардантов и фунгицидов по двум системам – органоминеральной (ОМС) и минеральной (МС), эквивалентным по содержанию NPK. При использовании гербицидов в посевах двух культур их вносили в посевах 1-й и 2-й озимой пшеницы, при четырехразовом вынесении ими обрабатывали еще посадки картофеля и посевы ячменя с подсевом клевера, при ежегодном внесении – все культуры севооборота [2].

На начальном этапе (в течение двух ротаций) севооборота выяснилось, что при внесении удобрений под покровом густого посева озимой пшеницы клевер сильно страдал и в засушливые годы практически погибал. Поэтому, начиная с третьей ротации, порядок чередования культур пришлось изменить. Он стал следующим: вика с овсом, озимая пшеница, картофель, ячмень с подсевом клевера, клевер, озимая пшеница. Исследования показали, что можно сократить количество химических обработок посевов гербицидами до 2–3-х (вместо 9-ти). Это уменьшало количество попадающих на почву и растение пестицидов, предотвращало загрязнение окружающей среды, что является немаловажным с экономической точки зрения. Например, средняя продуктивность севооборота в течение 2-х ротаций (1972–1985 гг.) без гербицидов составила 36,5 ц /га, при внесении гербицидов 2 раза за ротацию (в посевах первой и второй озимой пшеницы) – 43,0, при внесении 4 раза – 43,9 и при внесении 6 раз (100% посевов) – 43,3 ц/га [2]. Избыточную кислотность почвы устраняли путем известкования: в первой ротации внесено 6 т/га, во второй – 4 т/га известняковой муки. В среднем,

ежегодно, в первых 3-х ротациях севооборота было внесено около 9 т/га навоза и минеральные удобрения из расчета $N_{63}P_{41}K_{75}$, что в сумме составляет $N_{106}P_{71}K_{128}$. Такое же количество NPK внесено по минеральной системе удобрения [1, 2].

В опыте до 4-й ротации севооборота была применена навозно-минеральная система, удобрения по всему фону. Начиная с 4-й ротации, гербициды изучали на фоне 2-х систем удобрения: органоминеральной и минеральной. В качестве органических удобрений использовали навоз крупного рогатого скота из расчета 30 т/га за ротацию, а из минеральных удобрений использовали аммиачную селитру (N – 34%), суперфосфат (P_2O_5 – 52 %) и хлористый калий (K_2O – 60 %).

Освоение севооборота, внесение извести существенно повысили содержание важного показателя плодородия почвы – гумуса [3]. В программу исследований были включены ретарданты и фунгициды, так как было выяснено, что одни гербициды полностью не улучшают фитосанитарное состояние агроценозов и недостаточно повышают эффективность вносимых удобрений.

В 5-ой ротации (2001-2003 гг.) в среднем величины pH составили 5,4-5,9; Hг – 2,28-3,03; S – 11,2-12,2 мг-экв/100 г, V – 84,2 %, содержание гумуса – 1,9-2,1%; P_2O_5 – 187-194, K_2O – 211-299 мг/кг, $N_{общ}$ – 0,116 %, на фоне гербицидов $N_{общ}$ – 0,0099 %, на фоне без гербицидов $N_{общ}$ – 0,101-0,108 % [4]. Сильнокислая, бедная питательными веществами почва до закладки опыта (1960 г.) стала слабокислой, в ней существенно повысилось содержание гумуса и подвижных форм питательных элементов.

Если до закладки опыта продуктивность зерновых составляла 10 ц/га, то с 5-ой по 8-ю ротацию (1984-2008 гг.) она повысилась до 50,4 ц/га или в 4,7 раза. Наряду с применением удобрений и правильным чередованием культур в севообороте значительную роль в повышении урожайности сыграли и химические средства защиты растений (ХЗСР). Данные исследования показали, что на фоне применения ОМС и МС очищение посевов от сорняков обеспечило прибавку продуктивности зерна пшеницы с 6,9 до 8,0 ц/га [4]. Высокая эффективность комплексного применения средств химизации выявлена и в посевах ярового ячменя. В этом случае применяли гербициды и фунгициды в вариантах систем удобрения ОМС и МС. Ретарданты в посевах ячменя не применяли. Данные, полученные в 7-9-й ротациях, в пяти вариантах опыта, показали, что при внесении минеральных и органических удобрений прибавка урожайности зерна ячменя к контролю (без удобрений и химических средств защиты растений) составила 9,7 и 8,4 ц/га. Применение гербицидов и фунгицидов увеличило прибавки в 2 раза (19,0 и 18,6 ц/га), т. е. за счет совместного применения средств химизации дополнительно было получено зерна ячменя 9,3 и 10,2 ц/га, что привело к заметному повышению эффективности удобрений [3, 4].

Начиная с 7-й ротации, в целях создания еще более благоприятных условий для клевера, его стали подсевать под викоовсяную смесь, которая имеет более короткий вегетационный период. Кроме того, картофель заменили кукурузой, схема севооборота стала следующей: вика с овсом с подсевом клевера, клевер два года подряд, озимая пшеница, кукуруза, ячмень. Исследования показали, что последействие комплексного применения средств химизации не повлияло на рост и развитие

чувствительных к гербицидам культур вики и клевера, даже наоборот, способствовало их росту и развитию. Улучшение фитосанитарного состояния агроценозов привело к повышению урожайности сена викоовсяной смеси на 13,8 и 13,5 ц/га; клевера – на 9,3 и 14,7 ц/га по сравнению с вариантами без средств защиты растений [4].

В 2008 г. на первом поле опыта закончилась 8-я ротация севооборота: вика+овес, озимая пшеница, овес, ячмень. Баланс питательных элементов в конце 8-ой - начале 9-ой ротации (2009 г.) севооборота показал, что эффективность азотных удобрений не зависит от органоминеральной (ОМС) и минеральной (МС) систем удобрения, а количество выносимого азота превышает поступление в агроценоз, что очевидно определяется насыщенностью севооборота клевером в это время года. Среднее внесение за три года (2007-2009 гг.) составило по азоту около 80 кг/га, по фосфору и калию – 120 кг/га. На органоминеральной системе с навозом поступало в среднем за три года 35 кг/га кальция, 13 кг/га магния и около 20 кг/га серы. Коэффициент эффективности фосфорно-калийных удобрений во всех случаях превышал отношение внесенных питательных элементов к его выносу. Это свидетельствует о том, что почва агроценоза хорошо обеспечена этими питательными веществами [5, 6].

В 9-й ротации состав севооборота стал следующим: викоовсяная смесь + клевер-клевер 1- и 2-го года использования - озимая пшеница - овес - ячмень. При внесении одних и тех же доз удобрений ($N_{106}P_{71}K_{128}$) в разных системах применения средств защиты растений на 1 кг NPK было получено 1,5 и 1,3 кг зерна, а при комплексном применении средств химизации – 9,0 и 8,6 кг, или в 6 раз больше. Совместное применение удобрений и химических средств защиты растений увеличило долю участия удобрений в урожае с 15 и 13 до 51 %. Эти результаты показывают положительную роль комплексного применения средств химизации в фитосанитарном состоянии посевов, повышению эффективности удобрений и их окупаемости урожаем.

Урожайность озимой пшеницы и окупаемость удобрений [5]
Yielding capacity of winter wheat and payback of fertilizers [5]

Вариант опыта	Урожайность, т/га	Окупаемость 1 кг NPK зерном, кг	Доля влияния удобрений на урожайность, %
	5-я – 9-я ротации (1985-2012 г.г.)		
Контроль	2,40	-	-
фон 1 ОМС	3,40	1,5	15
Фон 1 ОМС + химические средства защиты растений	5,91	9	51
Фон 2 МС	3,34	1,3	13
Фон 2 МС + химические средства защиты растений	5,78	8,6	50

Примечание: фон 1 – органоминеральная система удобрения; фон 2 – минеральная система удобрения.

Изменение содержания гумуса за 9 ротаций полевого севооборота (исследования проводили в конце каждой ротации) показали, что содержание гумуса по сравнению с исходным (1960 г. – 1,58%) повысилось на контроле (без удобрений и химических средств защиты растений) до 1,66%, на фоне органоминеральной и минеральной систем с химическими средствами защиты растений – до 1,93% и 1,73%, соответственно. Причем химические средства защиты растений не снижали содержание этого показателя в почве, что имеет большое теоретическое и практическое значение [7].

Из результатов 9-й ротации четко видно, что совместное использование химических средств с системами удобрения радикально меняет баланс азота в полевом севообороте. Вынос азота культурными растениями на варианте без удобрения и ХСЗР был 406 кг/га, а на фоне органоминеральной и минеральной систем с ХСЗР был 723 и 752 кг/га соответственно. Вынос сорными компонентами ценоза, наоборот, значительно уменьшился на контроле – 83 кг/га, на фоне ОМС+ХСЗР – 53 кг/га, МС+ХСЗР – 58 кг/га. Интенсивность баланса на фоне ОМС и МС с 96 и 90% снижается при комплексном применении удобрения и средств химизации до 82 и 78%. Все это свидетельствует о преимуществе использования азота культурными растениями [8].

Закономерность состояния использования фосфора культурными растениями та же, но потребление фосфора культурными и сорными растениями значительно меньше и баланс фосфора в севообороте оказывается положительным. В вариантах с фосфорными удобрениями увеличился вынос элемента по сравнению с контролем (181 кг/га); при совместном применении удобрений и ХСЗР за счет культурных растений – 279 и 284 кг/га по системам удобрения. Интенсивность баланса при этом уменьшилась с 128 до 117% [7, 8].

Вынос калия в севообороте был значительно выше по сравнению с другими элементами питания. Несмотря на значительные запасы этого элемента в почве, растения нуждаются в его внесении в виде удобрения в большом количестве. Особенно много калия в составе сорных растений (4-7 % на сухое вещество), поэтому его вынос сорными компонентами в вариантах с одними удобрениями оказался значительным, что повлияло на общий вынос этого элемента в севообороте [8, 9]. В посевах озимой пшеницы культурные растения выносят в варианте с одними удобрениями 106 кг/га калия, а в вариантах с одновременным внесением удобрений и химических средств защиты растений – 136-146 кг/га, т.е. на 28-38 % больше, тогда как вынос этого элемента сорными растениями снизился в вариантах с комплексным применением средств химизации на 87-90 %.

Таким образом, из почвы сорные растения используют меньше азота, но больше фосфора и калия. Сравнительный анализ показывает, что вынос элементов питания сорными растениями возрастает на системах удобрения по азоту на 60-82 кг/га, фосфору – 16-21, калию – 109-129 кг/га, чем на контроле без удобрения. Однако, когда применены средства защиты растений на фоне удобрений, сорные растения выносят меньше питательных элементов. Из этого следует, что использование средств защиты растений вместе с удобрениями в 4 раза снижает вывод питательных элементов сорняками,

что в свою очередь приводит к увеличению урожайности культур севооборота. Следует отметить, что такой положительный эффект сохраняется на протяжении 40 лет.

Начиная с 10-й ротации (2013-2020 гг.) схема чередования культур в севообороте стала следующей: горох, озимая пшеница, ячмень, горох, озимая пшеница. В 10-й ротации севооборота химические средства защиты растений были применены по всему полю как фон. Изучали эффективность препаратов нового поколения, представленных комплексным микроудобрением Микроэл (0,2 л/га), магниевыми удобрениями (10 кг/га) и регуляторами роста Мивал-Агро (15 г/га) и Мелафеном (0,1 л/га)[1]. В целях замены органических удобрений был разработан прием сохранения плодородия почвы и ее гумусного состояния путем использования промежуточных сидератов соломы и фитомассы других источников. Первые результаты, полученные в 2019 г., обнадеживают. Урожайность зерна гороха в варианте $N_{30}P_{60}K_{120}$ + микроэлементы и стимуляторы роста повысилась с 51,1 до 69,8 ц/га. Урожайность зерна озимой пшеницы с начала 2015 г. была 63 ц/га, в варианте $N_{30}P_{60}K_{120}$+ХСЗР повысилась до 71,3-76,4 ц/га, при этом значительно возросла стекловидность зерна и содержание клейковины. Урожайность ячменя с 63,3 ц/га возросла до 75,7 ц/га [6, 9]. При использовании микроэлементов и регуляторов роста, окупаемость NPK прибавкой зерна в 2019 г. повышалась с 7,9 до 12,8 кг/кг, а в среднем за 3 года (2019-2021 гг.) – с 5,2 до 10,4 кг/кг зерна, в то время как на вариантах при внесении только одних удобрений она составляла 4,4 и 4,6 кг/кг [10, 11].

После уборки урожая озимой пшеницы, как индикатор на остатки пестицидов и источник органического вещества выращивалась горчица белая. Биомасса растений под влиянием удобрений существенно повысилась, а остатки протравителей семян из пестицидной группы, на нее практически не влияли. Следовательно, все пестициды, использованные для обеззараживания и защиты посева озимой пшеницы, полностью разлагались в почве.

На хорошо окультуренной почве в севообороте с клевером и бобово-злаковыми травами продуктивность севооборота даже на контроле (без удобрений и химических средств защиты растений) оказалось достаточно высокой (30,4 ц/га з.е.), что было в 2,6 раза больше продуктивности до закладки опыта [2]. Положительное влияние оказало применение микроэлементов: на фоне минеральной системы они увеличили урожайность на 18%, на фоне органоминеральной – на 20%. Существенного увеличения урожая зерна с применением магниевых удобрений не отмечено. А внесение карбамида, напротив, приводило к дальнейшему достоверному увеличению урожайности зерна. Совместное применение микроэлементов, магния и карбамида повысило урожайность зерна озимой пшеницы на фоне минеральной системы на 35 %, на фоне органоминеральной – на 37 % [10].

В настоящее время продолжается 11-я ротация полевого севооборота, в процессе которой продолжается изучение комплекса микроэлементов Аквамикс-СТ, магниевых удобрений и стимулятора роста Зеребро-агро на фоне 2-х систем удобрения, направленная на получение

[1]Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Информация приведена по состоянию на 03 июля 2023 г. М.: МСХ РФ. 2023. Часть I. Пестициды. С. 751, 758. Часть II. Агрохимикаты. С. 44

качественного урожая на хорошо обогащенной за все годы почве питательными элементами. Схема чередования культур 11-й ротации севооборота: горох, озимая пшеница, ячмень, горох, озимая пшеница.

Выводы. Перспективность комплексного применения средств химизации совместно с органическими и минеральными удобрениями – это успешное решение для современного сельского хозяйства. Необходимость перехода к сбалансированному использованию комплекса удобрений, микроэлементов и регуляторов роста вместе с химическими средствами для борьбы с вредителями и болезнями дает возможность производить хороший урожай высокого качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алиев А.М., Варламов В.А., Ваулина Г.И. и др. Комплексное применение агрохимических средств - основа высокой продуктивности и устойчивости земледелия // Плодородие. 2009. № 2(47) С. 5-8. URL: http://plodorodie-j.ru/journal/2009/nomer-2-2009/agrohimobsluzhivanie5/2009-2-5-8.html

2. Алиев А.М., Г.А. Кирсанов, Е.Н., Старостина Е.Н. Влияние длительного применения комплекса средств химизации на плодородие почвы и продуктивность культур полевого севооборота. В сб.: 75 лет Географической сети опытов с удобрениями (материалы совещания). М.: ВНИИА, 2016. С. 16-22.

3. Шафран С.А. Оценка окультуренности почв по комплексу агрохимических показателей // Агрохимия. 2022. № 4. С. 3-10. https://doi.org/10.31857/S0002188122040111

4. Алиев А.М., Самойлов Л.Н., Цимбалист Н.И. Эффективность комплексного применения средств химизации в Нечерноземной зоне (Итоги 55 лет исследований в длительном полевом опыте) // Агрохимия. 2016. № 2. С. 20-30. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26019034

5. Алиев А.М., Старостина Е.Н. Продуктивность культур и окупаемость удобрений при длительном применении комплекса средств химизации в полевом севообороте // Плодородие. 2017. № 6 (99). С. 8-10. URL: http://plodorodie-j.ru/journal/2017/6-2017/2017-6-8-10.html

6. Конова А.М., Гаврилова А.Ю. Баланс NPK и плодородие почвы при различном насыщении севооборота минеральными удобрениями // Плодородие. 2023. № 4 (133). С. 57-60. https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.133.14

7. Алиев А.М., Старостина Е.Н. Изменение плодородия почвы при длительном применении комплекса удобрений и химических средств защиты растений в полевом севообороте Центрального Нечерноземья. В сб.: Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013-2020 гг. Материалы Всероссийского координационного совещания научных учреждений участников Географической сети опытов с удобрениями. 2018. М.: ВНИИА. С.11-18.

8. Алиев А.М., Цимбалист Н.И., Старостина Е.Н., Ивашенков Г.А. Урожайность озимой пшеницы и окупаемость удобрений при длительном применении средств химизации в полевом севообороте // Плодородие. 2019. № 1 (106). 17-19. https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.106.05

9. Шафран С.А. Окупаемость затрат на применение азотных удобрений в подкормку озимой пшеницы // Агрохимия. 2020. № 2. С. 20-27. https://doi.org/10.31857/S0002188120020143
10. Алиев А.М., Старостина Е.Н., Ивашенков Г.А. Влияние комплексного применения средств химизации на баланс питательных элементов в условиях Центрального Нечерноземья // Плодородие. 2022. № 6(129). С. 52-54. https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.129.14
11. Можарова И.П., Шаповал О.А. Урожайность и качество зерна озимой пшеницы в зависимости от применения удобрений на основе комплекса микроэлементов с аминокислотами // Плодородие. 2021. №5(122). С. 49-52. https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.12

REFERENCES

1. Aliev A.M., Varlamov V.A., Vaulina G.A. et al. Complex application of chemicals is the baseline for high productivity and sustainable agriculture. Plodorodie = Plodorodie (Fertility). 2009; 2(47): 5-8. (In Russ.) URL: http://plodorodie-j.ru/journal/2009/nomer-2-2009/agrohimobsluzhivanie5/2009-2-5-8.html
2. Aliev A.M., G.A. Kirsanov, E.N., Starostina E.N. Influence of long-term application of a complex of chemicalization means on soil fertility and productivity of crops of field crop rotation. In: 75 Years of the Geographical Network of Experiments with Fertilizers (Meeting Proceedings). Moscow: VNIIA, 2016; 16-22. (In Russ.)
3. Shafran S. A. Assessment of soil fertility by the complex of agrochemical indicators. Agrokhimiya = Agrohimia (Agricultural Chemistry). 2022; 4: 3-10 (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0002188122040111
4. Aliev A.M., Samoilov L.N., Tzimbalist N.I. The efficiency of complex application of chemicals in the Non-Chernozem Zone (the results of 55 years of research in long-term field experiment). Agrokhimiya = Agrohimia (Agricultural Chemistry). 2016; 2: 20-30 (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26019034
5. Aliev A.M, Starostina E.N. Crop yield and fertilizer recoupment at the long-term application of chemicals in a field crop rotation. Plodorodie = Plodorodie (Fertility). 2017; 6 (99): 8-10 (In Russ.) URL: http://plodorodie-j.ru/journal/2017/6-2017/2017-6-8-10.html
6. Konova A.M., Gavrilova A.Yu. Balance and fertility of sod-podzolic soil under conditions of different saturation of crop rotation with mineral fertilizers. Plodorodie = Plodorodie (Fertility). 2023; 4 (133): 57-60 (In Russ.) https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.133.14
7. Aliev A.M., Starostina E.N. Changes in soil fertility under long-term application of fertilizer complex and plant protection chemicals in the field crop rotation in the Central Non-Chernozem Region. In: Implementation results of the Program of fundamental research of state academies for 2013-2020. Proceedings of the All-Russian coordination meeting of scientific institutions - participants of the Geographical Network of experiments with fertilizers. Moscow: VNIIA. 2018:11-18 (In Russ.)
8. Aliev A.M., Tsimbalist N.I., Starostina E.N., Ivashenkov G.A. Winter wheat yield and fertilizer payback during long-term application of chemicalization agents in field crop rotation. Plodorodie = Plodorodie (Fertility). 2019; 1(106): 17-19. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.106.05

9. Shafran S.A. Recoupment of expenses on application of nitrogen fertilizers in winter wheat top dressing. Agrokhimiya = Agrohimia (Agricultural Chemistry). 2020;2: 20-27. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0002188120020143
10. Aliev A.M., Starostina E.N., Ivashenkov G.A. Influence of integrated application of chemicals on the balance of nutrients under conditions of the Central Non-Chernozem Region. Plodorodie = Plodorodie (Fertility). 2022; 6(129): 52-54 (In Russ.) https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.129.14
11. Mozharova I.P., Shapoval O.A. Yield and quality of winter wheat grain depending on the application of fertilizers based on a complex of trace elements with amino acids. Plodorodie = Plodorodie (Fertility). 2021;5(122):49-52 (In Russ.) https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.12

Об авторах	About the authors
Карашаева Ареза Султанбековна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории минерального и биологического азота и оценки эффективности применения удобрений, ФГБНУ «Всероссийский НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31А k.areza@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-0737-7492	**Karashaeva Areza Sultanbekovna,** Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Mineral and Biological Nitrogen and Evaluation of Effectiveness of Fertilizers, D. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry, 127434, Russia, Moscow, Pryanishnikova Str., 31A k.areza@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-0737-7492
Завалин Алексей Анатольевич, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, профессор, заведующий лабораторией минерального и биологического азота и оценки эффективности применения удобрений, ФГБНУ «Всероссийский НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31А zavalin.52@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-7717-877X	**Zavalin Aleksey Anatolievich**, Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Mineral and Biological Nitrogen and Evaluation of Effectiveness of Fertilizers, D. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry, 127434, Russia, Moscow, Pryanishnikova Str., 31A zavalin.52@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-7717-877X
Ивашенков Глеб Алексеевич, ведущий специалист отдела агротехнологий, ФГБНУ «Всероссийский НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31А givashenkov@bk.ru	**Ivashenkov Gleb Alekseevich,** leading specialist of the Department of Agrotechnologies, D. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry, 127434, Russia, Moscow, Pryanishnikova Str., 31A givashenkov@bk.ru
Старостина Елена Николаевна, старший научный сотрудник отдела	**Starostina Elena Nikolaevna,** Senior Researcher of the Department of

агротехнологий, ФГБНУ «Всероссийский НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, Россия, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31А Starostinael@list.ru	Agrotechnologies, D. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry, 127434, Russia, Moscow, Pryanishnikova Str., 31A Starostinael@list.ru
Заявленный вклад авторов Все авторы статьи принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и поиске литературы.	**Authors'contribution** All authors of this paper have directly participated in the study planning and execution, and literature survey.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interests
Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант	All authors have read and approved the final version of the paper submitted
Статья поступила в редакцию: 15.11.2023	**Received:** 15.11.2023
Одобрена после рецензирования: 04.12.2023	**Approved after reviewing:** 04.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Обзорная статья
УДК 631/635 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-14-32

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ И ВЕЛИЧИНЫ УПЛОТНЁННОГО СЛОЯ ПОЧВЫ

Антон Михайлович Захаров[1], Евгений Александрович Мурзаев[2]✉, Алексей Дмитриевич Комоедов[3], Даниил Юрьевич Иванов[4]

[1,2,3,4]Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

[1] zamsznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3501-0543
[2]murzaev.e.a@mail.ru ORCID: 0000-0001-5143-7665
[3]komoedov.alexej@yandex.ru ORCID: 0009-0008-7718-6436
[4]daniil.id29@yandex.ru ORCID: 0000-0003-1231-1220

Аннотация. Одной из глобальных экологических проблем является внутрипочвенное переуплотнение, образуемое вследствие возделывания сельскохозяйственных культур. Оно непосредственно влияет на физико-химические и физико-механические свойства почвы, что приводит к замедлению роста и развития растений, снижению впитывающей способности почвы,повышению рисков развития эрозионных процессов, а также к снижению внутрипочвенных реакций перехода питательных веществ в доступные для растений формы. Причины образования уплотненного слоя делятся на естественные, вызванные природными факторами, и на антропогенные, образуемые человеческой деятельностью при культивировании растений. Целью исследований был анализ определения теоретической глубины залегания и величины уплотнённого слоя почвы при производстве продукции растениеводства. Авторами выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников для выбора основных методов определения и прогнозирования почвенного уплотнения, на основании которого был проведен теоретический системный и функционально-структурный анализ. На основе результатов анализа была составлена схема формирования почвенного уплотнения и порядок расчёта определения глубины залегания и величины уплотненного слоя почвы при производстве продукции растениеводства. Разработанный порядок расчёта позволяет теоретически рассчитать глубину залегания и величину почвенного уплотнения в зависимости от применяемых технологий и технических средств, а также оценить воздействие движителей на почву через максимальное нормальное давление, возникающее под воздействием колес энергетических средств и сельскохозяйственных машин. Прогнозирование представленных факторов позволяет уточнить методику выбора технологий и технических средств при возделывании сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: производство сельскохозяйственной продукции, антропогенное воздействие, уплотнение почвы, порядок расчёта.

Для цитирования: Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д., Иванов Д.Ю. Теоретические предпосылки к определению глубины залегания и величины уплотнённого слоя почвы // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 14-32 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-14-32

Review article
Universal Decimal Code 631/635

THEORETICAL BACKGROUND FOR DETERMINING THE OCCURRENCE DEPTH AND SIZE OF COMPACTED SOIL LAYER

Anton M. Zakharov[1], Evgeniy A. Murzaev [2]✉, Alexey D. Komoedov[3], Daniil Yu. Ivanov[4]

[1,2,3,4]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

[1] zamsznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3501-0543
[2]murzaev.e.a@mail.ru ORCID: 0000-0001-5143-7665
[3]komoedov.alexej@yandex.ru ORCID: 0009-0008-7718-6436
[4]daniil.id29@yandex.ru ORCID: 0000-0003-1231-1220

Abstract. Soil compaction of is one of the global environmental problems. It generates during the crop cultivation and has a direct effect on physicochemical and physical-mechanical soil properties. This leads to slower growth and development of plants, reduced absorption capacity of soil, higher risks of erosion processes, as well as a decline in the internal soil reactions of nutrients conversion into forms available for plants. The compacted layer may form under both natural factors and anthropogenic factors generated from farming activities. The study purpose was to analyze the available methods for determining the theoretical occurrence depth and size of a compacted soil layer in crop production. The national and foreign literature sources were reviewed to choose the main methods for detecting and forecasting the soil compaction. The review formed a basis for a theoretical system and functional-structural analysis resulting in creation the pattern of soil compaction formation and calculation procedure for determining the occurrence depth and size of a compacted soil layer in crop production. The developed procedure may be used in theoretical calculation of the depth and size of soil compaction for different technologies and machines employed. It also allows estimating the impact of propulsion systems on soil through the maximum normal pressure that generates by the wheels of energy vehicles and agricultural machines. Forecasting the above factors is a tool for refining the methods for choosing suitable technologies, machines and equipment for crops cultivation.

Key word: agricultural production, anthropogenic impact, soil compaction, calculation procedure.

For citation: Zakharov A.M., Murzaev E.A., Komoedov A.D., Ivanov D.Y. Theoretical background for determining the occurrence depth and size of compacted soil layer. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 14-32 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-14-32

Введение. В настоящее время почвенное уплотнение является одной из глобальных экологических проблем во всём мире [1]. При возделывании продукции растениеводства, интенсификация уплотнения почвы происходит за счёт применения все более энергонасыщенной тяжелой техники, пренебрежения проведением различных мелиоративных работ, неправильного применения почвообрабатывающих машин и т.д.

В связи с тем, что в Российской Федерации в настоящее время преобладает экстенсивный способ увеличения производства продукции растениеводства, увеличиваются площади переуплотнённых почв.

Уплотнение почвы – это физическая форма деградации почвы, которая изменяет её структуру и влияет на её продуктивность. Термин «уплотнение почвы» отсутствует в отечественном стандарте ГОСТ №27593-88[2]. Однако определение понятия уплотнения почвы, как технологической операции описано в ГОСТ № 16265-89 «Земледелие. Термины и определения»[3] – это технологическая операция, обеспечивающая изменение взаимного расположения почвенных отдельностей с целью создания более однородного обрабатываемого слоя почвы.

Согласно документу «Glossary of Soil Terms»[4], разработанному Европейским центром почвенных данных (ECDAC) и утверждённому Европейской комиссией, термин «уплотнение почвы» характеризуется как процесс изменения характера почвы таким образом, что

[2]ГОСТ №27593-88 «Почвы. Термины и определения». М.: Стандартинформ, 2006. 11 с.

[3]ГОСТ № 16265-89 «Земледелие. Термины и определения». М.Госстандарт СССР, 1989. 23 с.

[4]Glossary

происходит уменьшение объёма пустот между частицами почвы или заполнителями. Это проявляется в увеличении насыпной плотности, и сильно уплотнённый грунт может стать эффективно непроницаемым.

Авторами источника [2] описаны основные последствия уплотнения почвы:

– при воздействии энергетических средств и сельскохозяйственных машин, содержание влаги в почве, текстура и структура почвы, а также органическое вещество почвы являются тремя основными факторами, которые определяют степень уплотнения конкретной почвы;

– почвенное уплотнение напрямую влияет на физические свойства почвы, такие как объёмная плотность, прочность и пористость (эти параметры используются для количественной оценки плотности почвы);

– изменение физических свойств почвы из-за её уплотнения может изменить подвижность элементов и циклы азота и углерода в пользу увеличения выбросов парниковых газов во влажных условиях;

– переуплотнение почвы вызывает деформацию корней, замедление роста и развития растений, позднее прорастание, низкую скорость прорастания и высокую степень деградации культурных растений;

– почвенное уплотнение снижает биоразнообразие почвы за счёт уменьшения микробной биомассы, ферментативной активности, почвенной фауны и наземной флоры;

Некоторые почвы уплотнены естественным образом, например, почвы с очень тяжёлой текстурой (мелкозернистые). В свою очередь искусственное (или антропогенное) уплотнение вызвано проездом тяжёлой техники и интенсивной эксплуатацией почвы [3].

В связи с вышесказанным в мировой практике причины уплотнения почвы подразделяют на два основных класса: это уплотнение почвы под естественными (природными факторами), то есть не контролируемыми человеком, и антропогенными факторами, напрямую связанными с хозяйственной деятельностью человека. Для снижения влияния антропогенных факторов на формирование почвенного уплотнения необходимо разработать алгоритм расчёта, который позволит теоретически предположить глубину залегания и величину формируемого внутрипочвенного уплотнения в зависимости от применяемых технологий и технических средств при производстве продукции растениеводства.

Целью представленных исследований является анализ определения теоретической глубины залегания и величины уплотнённого слоя почвы при производстве продукции растениеводства.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовался метод теоретического системного и функционально-структурного анализа.

Как было сказано ранее, некоторые почвы уплотнены естественным образом. На естественное уплотнение почвы в первую очередь влияет её влажность.

Согласно зарубежным источникам [4-6] количество влаги на уплотнение почвы влияет следующим образом:

– увеличение количества влаги способствует уменьшению суммарной силы притяжения между частицами, влага замещает воздух в пустом поровом пространстве;

– илистые частицы почвы легко скользят друг по другу, так как влага повышает смазывающие способности,

способствуя уплотнению почвенных частиц.

Плотность, до которой почва способна уплотняться под влиянием климатических условий и собственной силы тяжести, называется равновесной. Её значения колеблются в пределах 1,25-1,45 г/см^3.

Благоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов и роста растений обеспечивает оптимальная плотность почвы 1,0-1,25 г/см^3 [7].

При возделывании сельскохозяйственных культур применяются различные технологические приёмы, направленные на создание оптимальных параметров почвенного состояния для получения высокой урожайности растений с заданными параметрами качества. Применяемые технологии включают технологические операции, выполнение которых требует большого числа проходов энергонасыщенной техники по поверхности поля. Движители МТА, и в некоторых случаях рабочие органы сельскохозяйственных машин, воздействуя на почву, подвергают её уплотнению.

За последние десятилетия средний вес машин увеличился, что привело к повышению нагрузки на ось и колеса (рис. 1). Для противодействия негативному воздействию на структуру почвы были разработаны широкие шины, обеспечивающие низкое давление накачки [8]

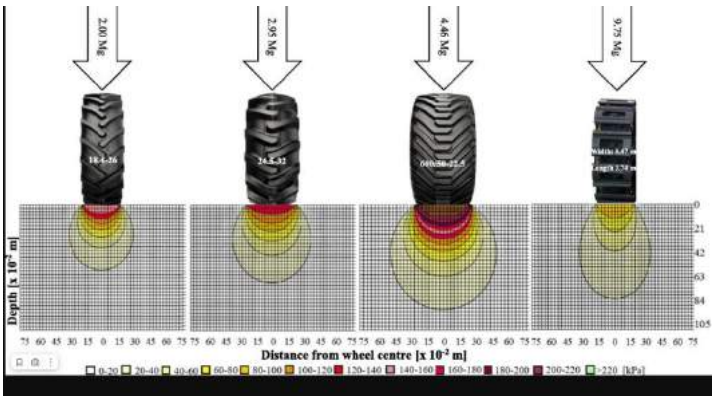
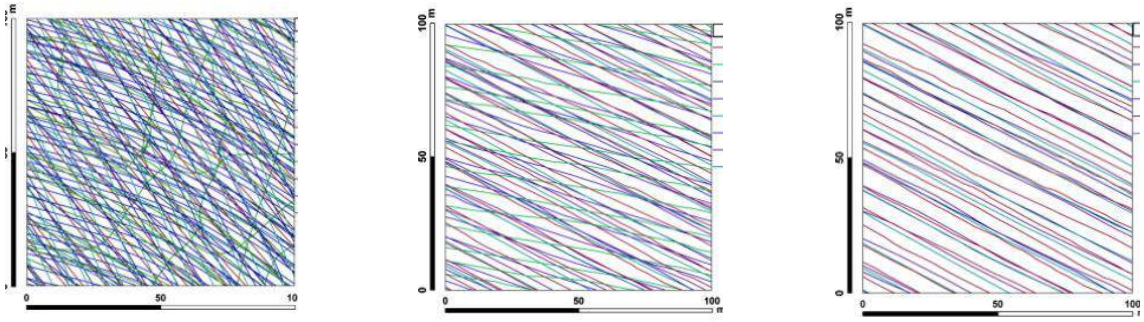


Рис. 1. Распространение зоны уплотнения от ходовой системы энергетического средства
Fig. 1. Expansion of the compaction zone generated by the running system of the power source

Внедрение новых технологий производства сельскохозяйственных шин позволило среднему давлению контакта с землёй оставаться примерно постоянным при увеличении массы техники и уменьшило нагрузку на верхний слой почвы. Однако анализ зарубежных литературных источников показал, что подпочвенное напряжение больше зависит от нагрузки на ось, чем от контактного давления. Это доказано в исследованиях [9] и измерениях [10]. Несколько исследований подтвердили, что тяжёлая техника может привести к уплотнению почвы на глубину не менее 50 см [11, 12]. Негативное воздействие колёс с высокой нагрузкой на ось может длиться годами [13]. Однако во многих исследованиях условия движения колёс отличались от фактического движения по полю в нескольких отношениях. Тип машины, шины, количество и скорость проходов не соответствовали характеристикам обычных полевых работ.

Авторами [14] проведены исследования влияния выбора технологии обработки почвы на количество проходов почвообрабатывающей техники по

возделываемым землям. Для мониторинга интенсивности движения при различных технологиях обработки почвы каждая машина была оснащена приёмником сигнала DGPS перед въездом на поле при обычной, минимальной и нулевой технологии обработки. Данные о местоположении автоматически регистрировались каждые 2 с, а размеры шин (в основном ширина) и расстояние между колёсами были отмечены для каждой машины. На рисунке 2 показаны траектории движения сельскохозяйственной техники и следы колёс на площади 1 га для различных технологий, оцениваемых в течение одного вегетационного периода



А) Обычная технология обработки почвы
A) Ordinary tillage

Б) Минимальная обработка почвы
B) Minimal tillage

В) Технология нулевой обработки почвы
C) Zero tillage

Рис. 2. Графическое представление проходов техники на 1 га при различных технологиях обработки почвы

Fig. 2. Graphical representation of machinery passes per one hectare under various tillage technologies

Результаты показывают, что до 95,3% общей площади поля было обработано машиной, по крайней мере, один раз в год при использовании обычной обработки почвы. При использовании минимальной обработки почвы и прямого посева было обработано до 72,8% или 55,7% от общей площади поля, соответственно. Было подсчитано, что 145,6% покрытой площади может быть повторно обработано при обычной обработке почвы, 44,8% – при минимальной обработке и 18,4% – только при прямом посеве.

В исследованиях [15] на всех участках ежегодно выполнялась традиционная вспашка на 20-30 см кроме одного участка, участка А (сплошная черная линия), на котором было проведено глубокое рыхление на 40 см. На рисунке 3 представлены значения твёрдости почвы по глубине (цифровые значения по изменению в различных слоях присутствуют в источнике).

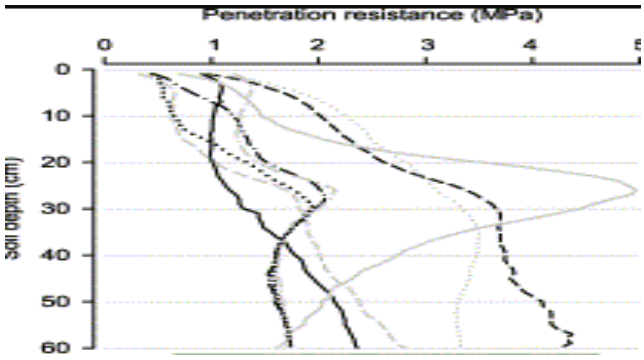


Рис. 3. Значения твёрдости почвы по глубине

Fig. 3. Soil hardness by depth

Данный график характеризует образование уплотнения в слоях почвы ниже 20 см в зависимости от способа основной обработки почвы.

В исследованиях [16] установлено, что добавление навоза в почву значительно уменьшило насыпную плотность почвы. Самая высокая норма внесения навоза привела к значительному снижению насыпной плотности почвы по сравнению с контролем. Изменения насыпной плотности из-за уплотнения уменьшались по мере увеличения количества навоза, добавляемого в почву. Аналогичные результаты были получены другими исследователями [17]. Добавление навоза в почву также полезно для всходов семян, поскольку оно снижает сопротивление поверхности почвы появлению всходов. Авторы [17] в своих исследованиях отмечали более высокую эластичность и разбавляющий эффект навоза в качестве причины снижения уплотнения почвы. Эластичность навоза предотвращает передачу напряжений в подпочву на более низких глубинах [16].

Стратегии и рекомендации по предотвращению уплотнения почвы часто основаны на имитационных моделях (моделях уплотнения почвы). Такие модели способны рассчитать распространение напряжений и разрушение почвы в профиле почвы при определённых механических нагрузках (сельскохозяйственная техника) и условиях состояния почвы (например, влажность почвы) и могут помочь фермерам и консультантам в планировании и принятии решений о конкретных ситуациях на местах.

В основном разработка модели уплотнения включает в себя два этапа:

– моделирование распространения сил нагрузки в почве, возникающих в результате усилий, прикладываемых к поверхности почвы сельскохозяйственными транспортными средствами;

– моделирование напряжённо-деформированного состояния почвы.

Авторы [18] разделили модели уплотнения почвы на две категории:

– аналитические модели;

– модели, основанные на методе конечных элементов (МКЭ).

Они же предложили разделить структуру моделей уплотнения на две части. Первая часть определяет распространение нагрузки через почву, возникающей в результате усилий, оказываемых МТА, в зоне контакта колеса с почвой (подмодель распространения). Напряжения на границе раздела колесо-грунт описываются площадью контакта и напряжениями над ней (подмодель приложенной к поверхности силы). Вторая часть определяет поведение напряжённо-деформированного состояния, то есть взаимосвязи между изменениями объёма грунта и приложенными напряжениями (подмодель поведения напряжённо-деформированного состояния). Основное различие между существующими моделями заключается в процедуре, используемой для расчёта распространения напряжений нагрузки через грунт (табл. 1): псевдоаналитическая процедура или численное исчисление, основанное на методе конечных элементов (МКЭ)

Таблица 1. Классификация моделей механического уплотнения
Table 1. Classification of mechanical compaction models

Модель	Псевдоаналитический метод	Метод конечных элементов
Подмодель распространения	Псевдоаналитическое исчисление распределения напряжений	Численное исчисление распределения смещений
Подмодель приложенной к поверхности силы	Неоднородное распределение напряжений по эллиптической площади контакта	Равномерное распределение напряжений по площади контакта
Модель поведения при напряжении и деформации	Эмпирические модели	Псевдоупругие модели (модели типа CamClay, связанные модели)

Например, авторами [19, 20] представлены исследования о влиянии давления в шинах движителя на распределение напряжений вблизи границ раздела грунт-шина и сравнении полученных полевых результатов с прогнозом, построенным в модели FRIDA. Исследователи утверждают, что распределение вертикальных напряжений в почве непосредственно под нагруженной шиной неравномерно. Распределение напряжений, а также размер и форма границы раздела шина-почва имеет решающее значение для распространения напряжений в профиле почвы. В результатах исследований представлены несколько поверхностей отклика, характеризующих распределение напряжений от движителей по данным, полученным в ходе экспериментальных исследований, а также при помощи предложенной модели FRIDA (рис.4).

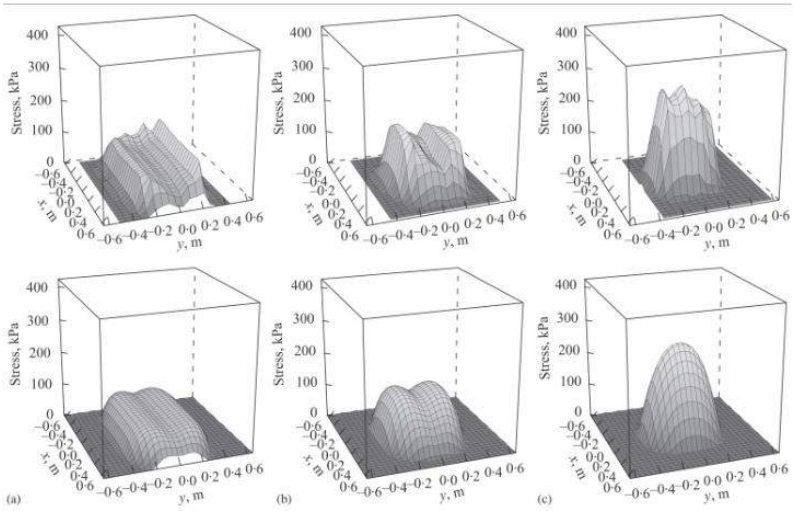


Рис. 4. Примеры измеренного (вверху) и подобранного по модели (внизу) распределения напряжений по площади контакта при трех давлениях накачки (a: 50 кПа; b: 100 кПа; c: 240 кПа) для шины 650/65R30.5

Fig. 4. Examples of measured (top) and model-fitted (bottom) stress distributions over the contact area at three inflation pressures (a: 50 kPa; b: 100 kPa; c: 240 kPa) for a 650/65R30.5 tire

Предложенная модель FRIDA дала хорошее описание измеренных данных: следы шин были хорошо описаны суперэллипсом, а распределение вертикального напряжения – комбинированной экспоненциальной (перпендикулярно направлению движения) и степенной (вдоль направления движения) функцией. Площадь контакта удвоилась при снижении давления накачки с 240 до 50 кПа, в то время как рекомендуемое давление накачки в 100 кПа показало промежуточное значение. Измеренное пиковое напряжение и установленное моделью максимальное напряжение значительно увеличивались с увеличением давления в шинах и, как правило, были примерно на 90 и 50 кПа выше, чем давление в шинах, соответственно.

В настоящее время, формируются электронные инструменты определения величины уплотнения почвы в зависимости от применяемых технических средств и технологических приёмов. Примером такой платформы является онлайн сервис Terranimo, направленный на анализ воздействий от технических средств на почвенное уплотнение на землях Швейцарии и Швеции [21]. Интерфейс платформы представлен на рисунке 5.

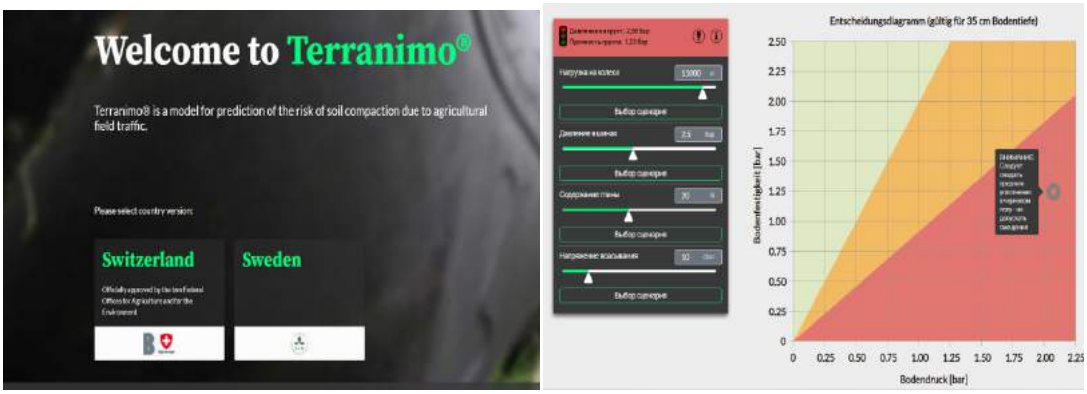


Рис. 5. Интерфейс программы Terranimo
Fig. 5. Terranimo program interface

Terranimo – это веб-инструмент для моделирования дорожного движения на сельскохозяйственных полях, расчёта распространения напряжений под каждым колесом техники и оценки риска уплотнения почвы из-за движения. Контактные напряжения рассчитываются с учётом конструкции оборудования, характеристик шин и состояния верхнего слоя почвы. Распространение напряжений в почве рассчитывается аналитически в зависимости от характеристик почвы и с использованием контактных напряжений в качестве верхнего граничного условия. Риски уплотнения почвы оцениваются путём сравнения нагрузки на почву и прочности почвы, оценённых по консервативным параметрам почвы и потенциалу почвенной влаги [22].

Результаты и обсуждение. По результатам анализа представленных материалов разработана схема формирования почвенного уплотнения, показанная на рисунке 6.

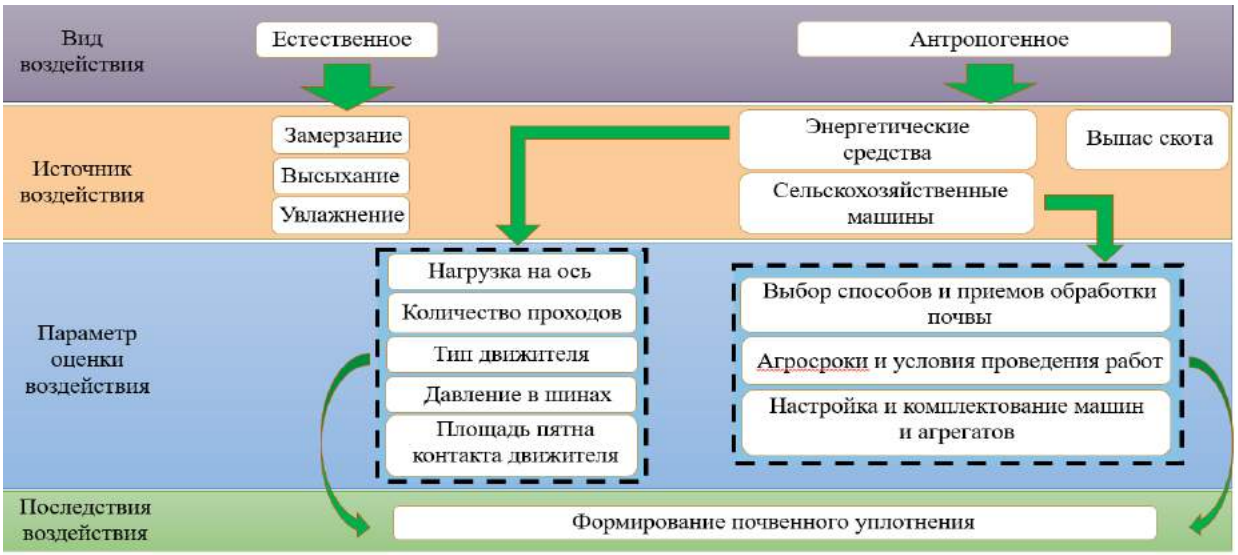


Рис. 6. Схема формирования почвенного уплотнения
Fig. 6. Scheme of soil compaction formation

В Российской Федерации определение воздействия движителей на почву нормируется тремя государственными стандартами: ГОСТ 26954-2019[5]; ГОСТ Р 58655-2019[6]; ГОСТ Р 58656-2019[7].

Ключевым показателем метода определения воздействия движителей на почву является максимальное нормальное давление, которое определяется по формуле:

$$q_{max}^{k} = \frac{K_2 G_k}{K_1 F_k}, \qquad (1)$$

где: K_2 – коэффициент продольной неравномерности распределения давления (K_2=1,5);

G_k – статическая вертикальная нагрузка на опорное основание от единичного колёсного движителя, кН;

K_1 – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса;

F_k – контурная площадь пятна контакта протектора шины, м^2.

Вышеперечисленные аргументы формулы определяются согласно ГОСТ Р 58656-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву».

Другим показателем при оценке воздействия движителей на почву является максимальное нормальное напряжение, возникающее в почве, определяемое по ГОСТ 26954-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве» и имеющее вид:

[5]ГОСТ 26954-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Метод определения максимального нормального напряжения в почве». М.: Стандартинформ. 2019. 8 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293726/4293726306.pdf

[6]ГОСТ Р 58655-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву». М.: Стандартинформ. 2019. 8 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data/722/72298.pdf

[7]ГОСТ Р 58656-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву». М.: Стандартинформ. 2019. 24 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725776.pdf

$$\sigma_h = 0{,}637\bar{q}(arctg\frac{ab}{h\sqrt{a^2+b^2+h^2}} + \frac{hab(a^2+b^2+2h^2)}{(a^2+h^2)(b^2+h^2)\sqrt{a^2+b^2+h^2}}), \qquad (2)$$

где: $\bar{q}$ – среднее нормальное давление колесного движителя на почву, кПа (определяется согласно ГОСТ Р 58656-2019[6]).

a – ½ длины площади контакта движителя, м;

b – ½ ширины площади контакта движителя, м;

h – глубина опорного основания, по которому перемещается движитель, м.

Все вышеперечисленные аргументы формулы определяются согласно ГОСТ 26954-2019[4].

Авторы [23, 24] провели обширные теоретические и экспериментальные исследования и установили, что плотность почвы можно определить по уравнению:

$$\rho = \rho_n(1 + k_{пред} - \frac{k_B\beta}{k} ln\frac{p_0}{\sigma+\sigma_0}), \qquad (3)$$

где: $\rho_п$ – первоначальная плотность почвы, Па (табличное значение по Качинскому Н.А. [25]);

k_B – коэффициент взаимосвязи параметров уплотнения, Н/м^2 (k_B=100 [26]);

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

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

$k_{пред}$ – коэффициент предельного увеличения плотности ($k_{пред}$ = 0,4 [27]);

σ_0 – структурная плотность почвы, Па;

ρ_0 – предел несущей способности почвы, Па.

Коэффициент распределения напряжений определяется по формуле:

$$\beta = \frac{2}{\pi}(arctg\frac{ab}{h\sqrt{a^2+b^2+h^2}} + \frac{hab(a^2+b^2+2h^2)}{(a^2+h^2)(b^2+h^2)\sqrt{a^2+b^2+h^2}}) \qquad (4)$$

Коэффициент объёмного смятия почвы определяется по формуле [28]:

$$k = \frac{F}{Sh_p}, \qquad (5)$$

где: F – сопротивление вдавливанию штампа на глубину h_p, Н (представленный показатель необходимо определять при помощи современных цифровых средств измерений [29]);

S – площадь штампа, м^2;

h_p – глубина вдавливания, м.

Определив численные аргументы представленных выше формул, можно теоретически предположить значения плотности почвы в зависимости от используемых энергетических средств.

При производстве продукции растениеводства порядок расчета плотности почвы справедлив только при условии движения по полю МТА без почвообрабатывающих рабочих органов, например: транспортные работы, уборочные работы, опрыскивание и т.п.

При условии обработки почвы необходимо учитывать, что на настроечной глубине работы почвообрабатывающего агрегата

формируется иное почвенное состояние, плотность которого будет определяться исходя из способа обработки почвы и применения различных рабочих органов (рис. 7 и рис. 8).

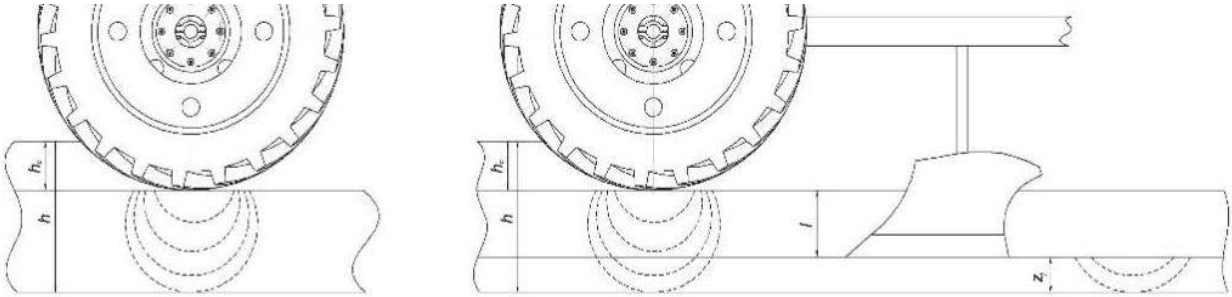


Рис. 7. Схема формирования почвенного уплотнения (вид сбоку)
Fig. 7. Diagram of soil compaction formation (side view)

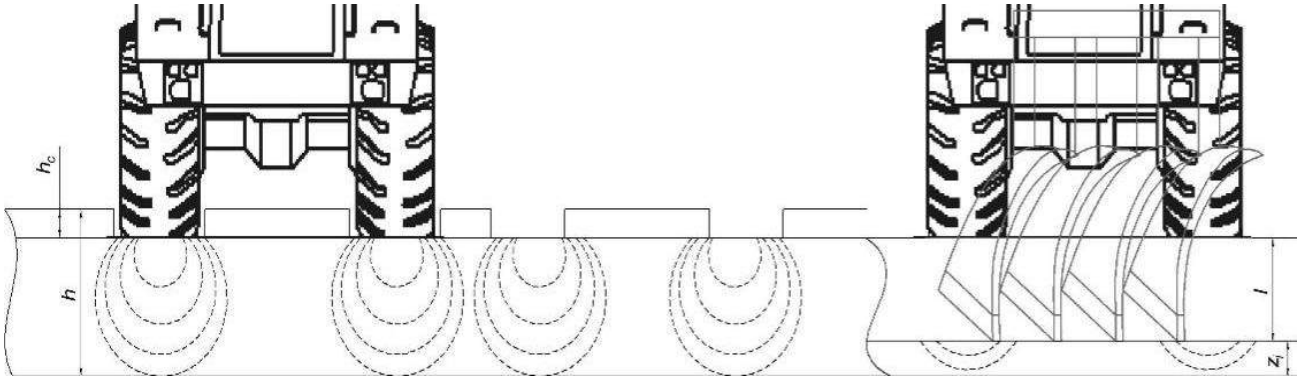


Рис. 8. Схема формирования почвенного уплотнения (вид сзади)
Fig. 8. Diagram of soil compaction formation (back view)

В процессе обработки почвы почвообрабатывающие органы сельскохозяйственных машин ликвидируют почвенное уплотнение, созданное движителями энергетических средств на глубину равную настроечному значению глубины обработки l. Чаще всего l составляет при основной обработке почвы 25-27 см; при предпосевной обработке 5-15 см. Однако исключением является использование культиваторов-глубокорыхлителей для сплошной обработки почвы, глубина обработки которых может составлять до 60 см.

Таким образом, в почвенных горизонтах ниже значений настроечной глубины обработки возникает слой почвенного уплотнения, толщина которого определяется как $z_i = h - l$.

Согласно вышесказанному, при расчёте уравнений (2) и (4) глубину опорного основания, по которому перемещается движитель, необходимо определять исходя из применяемых технологий обработки почвы и их настроечных значений глубины обработки.

Выводы. В ходе анализа условий возникновения уплотнения почвы при производстве продукции растениеводства установлено, что на формирование почвенного уплотнения влияют два больших блока воздействий на почву: естественное (природное) и антропогенное, возникающее в результате хозяйственной деятельности человека.

Анализ многочисленных научных исследований по оценке влияния на антропогенное почвенное уплотнение работ на полях энергетических средств и сельскохозяйственных машин, позволил разработать схему формирования почвенного уплотнения. Также установлено, что за рубежом существует ряд математических моделей и программных платформ для расчета и моделирования процесса уплотнения почвы энергетическими средствами в зависимости от различных условий проведения сельскохозяйственных работ.

В России имеется ряд нормативных документов, регламентирующих порядок расчета максимального нормального напряжения от воздействия движителей энергетических средств на почву, которое является составляющим аргументом уравнения для определения плотности почвы по Орда А.Н. Однако, при условии обработки почвы необходимо учитывать, что на настроечной глубине работы почвообрабатывающего агрегата, формируется иное почвенное состояние, плотность которого будет определяться исходя из способа обработки почвы и применения различных рабочих органов. Таким образом, в почвенных горизонтах ниже значений настроечной глубины обработки возникает почвенное уплотнение, теоретические значения которого можно рассчитать по представленному порядку расчета.

В результате проведения поисковых исследований разработан порядок расчёта, включающий в себя ряд математических выражений, позволяющих теоретически рассчитать глубину залегания и величину уплотненного слоя почвы при производстве сельскохозяйственной продукции. Проведенный имитационный расчёт показал, что при работе в полевых условиях МТА, включающего в себя трактор МТЗ 82.1 + плуг ПЛН-3-35 с настроечной глубиной вспашки 0,25 м создается среднее нормальное давление колесного движителя на почву 134 кПа. При этом плотность почвы, создаваемая на глубине 25 см, будет составлять порядка 1,3 г/см^3. Следует отметить, что при расчете не учитывалось формирование плужной подошвы, поскольку такие данные можно получить только экспериментальным путем.

Прогнозирование представленных факторов позволит уточнить методику выбора технологий и технических средств при возделывании сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Beylich A., Oberholzer H.R., Schrader S., Höper H., Wilke B.M. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils // Soil and Tillage Research. 2010. Vol. 109. P. 133-143 https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010

2. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review // Agronomy for Sustainable Development. 2013. Dev. 33. P. 291-309. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8.

3. Естественное уплотнение почвы [Электронный ресурс]. URL: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/Glossary/Glossary.pdf (дата обращения 02.12.2023).

4. Venkatramaiah C. Geotechnical Engineering. 3rd revised edition. New Delhi: NewAge International (P) Ltd Publishers. 2006. 947 p. https://books.google.ru/books?id=HkN_iRyHRiEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

5. Ramamurthy T.N., Sitharam T.G., Chand S. Geotechnical Engineering (Soil Mechanics). 3rd revised edition. New Delhi: S. Chand&Company. 2010. 290 p. URL: https://books.google.ru/books?id=PezuwUn_tKoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

6. Lambe T.W., Whitman R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1991. 576 p. URL: https://books.google.ru/books/about/Soil_Mechanics.html?id=d-FzXyGhwcEC&redir_esc=y

7. Чигарев Ю.В., Синкевич П.Н. Математические основы механики почв: учеб. пособие. Мн.: УП "Технопринт", 2004. 164 с. URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/14978/1/matematicheskie-osnovy-mekhaniki-pochv.pdf

8. Guimarães Júnnyor W.D.S., Diserens E., De Maria I.C., Araujo-Junior C.F., Farhate C.V.V., de Souza Z.M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation // The Science of the Total Environment. 2019. Vol.681. P. 424-434. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.009.

9. Söhne W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen // Grundlagen der Landtechnik. 1953. Vol. 5. P. 49-63.

10. Birger D. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles // Soil and Tillage Research. 1994. Vol. 29. P. 135-144.

11. Etana A., Håkansson I. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load // Soil and Tillage Research. 1994. Vol. 29. P.167-172. https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90053-1

12. Arvidsson J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments // Soil and Tillage Research. 1998. Vol. 49. P.159-170. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00164-0

13. Alakukku L., Elonen P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops // Soil and Tillage Research. 1995. Vol. 36 (3-4). P. 141-152. https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00503-X

14. Kroulík M., Kumhála F., Hůla J., Honzík I. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies // Soil and Tillage Research 2009. Vol 105. P. 171-175. https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.004

15. Schäfer-Landefeld L., Brandhuber R., Fenner S., Koch H.-J, Stockfisch N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields // Soil and Tillage Research. 2004. Vol. 75. P. 75-86. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00154-5.

16. Soane B.D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects // Soil and Tillage Research. 1990. Vol.16 (1-2). P. 179-201. https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90029-D

17. Ekwue E.I., Stone R.J. Density-moisture relation of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge // Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 1997. Vol. 40 (2). P. 317-323. https://doi.org/10.13031/2013.21276

18. Defossez P., Richard G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation // Soil and Tillage Research. 2002. Vol. 67 (1). P. 41-64. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00030-2

19. Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F., Arvidsson J., Keller T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface // Biosystems Engineering. 2008. Vol. 99 (1). P. 119-133. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005.

20. Lamandé M., Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage // Soil & Tillage Research. 2011. Vol. 114. P. 57-70. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.004.

21. Terranimo - Terramechanical model [Электронный ресурс]. URL: https://ch.terranimo.world/light (дата обращения 16.02.2023).

22. Stettler M., Keller T., Schjønning P., Lamande M., Lassen P., Pedersen J., Weisskopf P. Terranimo®-a web-based tool for assessment of the risk of soil compaction due to agricultural field traffic. In: Towards environmental technologies. Proc. Int. Conf. on Agr. Eng.-AgEng 2010 (6-8 September 2010). Clermont-Ferrand, France: Cemagref. 2010. P.384

23. Орда А.Н., Селеши А.Б. Уплотнение почвы под воздействием ходовых систем // Агро-панорама. 2007. С. 13-16. URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/11894/1/orda-a-n-uplotnenie-pochvy-pod-vozdejstviem-hodovyh-sistem.pdf

24. Орда А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. … д-р техн. наук. Минск: БАТУ. 1997. 269 с.

25. Качинский Н.А Физика почвы: монография. Ч. II. Водно-физические свойства и режимы почв. М.: Высш. школа, 1970. 363 с. URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493874

26. Орда А.Н., Шкляревич В.А., Тарасевич И.А. Выбор компоновки ходовых систем почвообрабатывающих агрегатов при различных почвенных условиях эксплуатации // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Материалы Международной научно-технической конференции (16-17 октября 2013 г. Минск.). Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. 2014. Т. 1. С. 116-120.

27. Орда А.Н., Алешкевич С.В., Селеши А.Б., Бушик А.Г. Исследование процесса уплотнения почвы различными типами ходовых систем // Энергосберегающие технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве: доклады Международной научно-практической конференции (12-13 июня 2008 г. Минск). Минск: БГАТУ. 2008. Ч. 1. С. 338-344. URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/4864/1/issledovanie-processa-uplotneniya-pochvy-razlichnymi-tipami-hodovyh-sistem.pdf

28. Чеботарев В.П. и др. Машины и оборудование в растениеводстве. Практикум: учебно-методическое пособие: в 3 ч. Минск: БГАТУ, 2021. Ч. 1. 284 с.

29. Устроев А. А., Калинин А. Б., Мурзаев Е. А. Анализ цифровых измерительных систем для определения параметров почвенного состояния // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 97. С. 19-28. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10085.

REFERENCES

1. Beylich A., Oberholzer H.R., Schrader S., Höper H., Wilke B.M. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. Soil and Tillage Research. 2010; 109: 133-143 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010

2. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2013; 33: 291-309 (In Eng.) https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8.

3. Natural Soil Compaction [online]. Available at: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/Glossary/Glossary.pdf (accessed 02.12.2023).

4. Venkatramaiah C. Geotechnical Engineering. 3rd revised edition. New Delhi: NewAge International (P) Ltd Publishers. 2006. 947 p. URL: https://books.google.ru/books?id=HkN_iRyHRiEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

5. Ramamurthy T.N., Sitharam T.G., Chand S. Geotechnical Engineering (Soil Mechanics). 3rd revised edition. New Delhi: S. Chand&Company. 2010. 290 p. URL: https://books.google.ru/books?id=PezuwUn_tKoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

6. Lambe T.W., Whitman R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1991. 576 p. (In Eng.) URL: https://books.google.ru/books/about/Soil_Mechanics.html?id=d-FzXyGhwcEC&redir_esc=y

7. Chigarev Yu.V., Sinkevich P.N. Mathematical foundations of soil mechanics: textbook. Minsk: Technoprint Publ, 2004. 164 p. (In Russ.) URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/14978/1/matematicheskie-osnovy-mekhaniki-pochv.pdf

8. Guimarães Júnnyor W.D.S., Diserens E., De Maria I.C., Araujo-Junior C.F., Farhate C.V.V., de Souza Z.M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. The Science of the Total Environment. 2019; 681: 424-434 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.009.

9. Söhne W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik. 1953; 5: 49-63 (In Germ.)

10. Birger D. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. Soil and Tillage Research. 1994; 29: 135-144. (In Eng.)

11. Etana A., Håkansson I. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. Soil and Tillage Research. 1994; 29: 167-172. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90053-1

12. Arvidsson J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. Soil and Tillage Research. 1998; 49:159-170. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00164-0

13. Alakukku L., Elonen P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. Soil and Tillage Research. 1995; 36 (3-4): 141-152. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00503-X

14. Kroulík M., Kumhála F., Hůla J., Honzík I. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. Soil and Tillage Research 2009; 105: 171-175. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.004

15. Schäfer-Landefeld L., Brandhuber R., Fenner S., Koch H.-J, Stockfisch N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. Soil and Tillage Research. 2004; 75: 75-86. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00154-5.

16. Soane B.D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. Soil and Tillage Research. 1990;16 (1-2): 179-201 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90029-D

17. Ekwue E.I., Stone R.J. Density-moisture relation of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. Transactions of the ASAE. 1997; 40 (2): 317-323. (In Eng.) https://doi.org/10.13031/2013.21276

18. Defossez P., Richard G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. Soil and Tillage Research. 2002; 67 (1): 41-64 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00030-2

19. Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F., Arvidsson J., Keller T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. Biosystems Engineering. 2008; 99 (1): 119-133 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005.

20. Lamandé M., Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage // Soil & Tillage Research. 2011. Vol. 114. P. 57-70. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.004.

21. Terranimo - Terramechanical model [Электронный ресурс]. URL: https://ch.terranimo.world/light (дата обращения 16.02.2023).

22. Stettler M., Keller T., Schjønning P., Lamande M., Lassen P., Pedersen J., Weisskopf P. Terranimo®-a web-based tool for assessment of the risk of soil compaction due to agricultural field traffic. In: Towards environmental technologies. Proc. Int. Conf. on Agr. Eng.-AgEng 2010 (6-8 September 2010). Clermont-Ferrand, France: Cemagref. 2010:384 (In Eng.)

23. Orda A.N., Seleshi A.B. Soil compaction under the influence of running systems. Agro-panorama. 2007: 13-16. URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/11894/1/orda-a-n-uplotnenie-pochvy-pod-vozdejstviem-hodovyh-sistem.pdf

24. Orda A.N. Ecological and energy fundamentals of formation of machine and tractor units. Doct. Thesis. Minsk: Belarus Agrarian Technical University. 1997. 269 p. (In Russ.)

25. Kachinsky N.A. Soil Physics Part 2: Water-physical properties and soil regimes. Part 2. Moscow: Higher School Publ. 1970. 363 p. (In Russ.) URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493874

26. Orda A.N., Shklyarevich V.A., Tarasevich I.A. Selection of the layout of running systems of tillage units under different soil operating conditions. In: Scientific and technical progress in agricultural production. Proc. Int. Sci. Tech. Conf. (16-17 October 2013, Minsk). Minsk: Institute of Agricultural Mechanization of the National Academy of Sciences of Belarus. 2014;1: 116-120 (In Russ.)

27. Orda A.N., Aleshkevich S.V., Seleshi A.B., Bushik A.G. Study of the process of soil compaction by various types of running systems. In: Energy-saving technologies and technical means in agricultural production. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Minsk, June 12-13, 2008). Minsk: BGATU, 2008;1: 338-344. (In Russ.) URL: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/4864/1/issledovanie-processa-uplotneniya-pochvy-razlichnymi-tipami-hodovyh-sistem.pdf

28. Chebotarev V.P. et al. Machinery and equipment in crop production. Workshop: educational and methodological manual. Minsk: BGATU, 2021; 1. 284 p. (In Russ.)

29. Ustroev A. A., Kalinin A. B., Murzaev E. A. Analysis of digital measurement systems to determine the soil state parameters. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2018; 97: 19-28. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10085

Об авторах	**About the authors**
Захаров Антон Михайлович, канд. техн. наук; ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем	**Zakharov Anton Mikhailovich**, Cand. Sc. (Engineering), Leading Researcher, Department of Agroecology in Plant Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of

сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3). zamsznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3501-0543.	Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia zamsznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3501-0543.
Мурзаев Евгений Александрович, научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3) murzaev.e.a@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5143-7665.	**Murzaev Evgeniy Aleksandrovich**, researcher, Department of Agroecology in Plant Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia murzaev.e.a@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5143-7665.
Комоедов Алексей Дмитриевич, младший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3) komoedov.alexej@yandex.ru ORCID: 0009-0008-7718-6436	**Komoedov Alexey Dmitrievich**, junior researcher, Department of Agroecology in Plant Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia komoedov.alexej@yandex.ru ORCID: 0009-0008-7718-6436
Иванов Даниил Юрьевич, младший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3) daniil.id29@yandex.ru	**Ivanov Daniil Yurievich**, junior researcher, Department of Agroecology in Plant Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia daniil.id29@yandex.ru ORCID: 0000-0003-1231-1220.

ORCID: 0000-0003-1231-1220.	
Заявленный вклад авторов Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования.	**Authors'contribution** All authors of this study were directly involved in its design, execution, and analytical work.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 29.11.2023	**Received:** 29.11.2023
Одобрена после рецензирования: 21.12.2023	**Approved after reviewing:** 21.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 634.11:631.11 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-32-42

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДОЗ ВНЕСЕНИЯ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УРОЖАЙНОСТЬ И РАЗВИТИЕ ЯБЛОНИ СОРТА АНТОНОВКА

Безух Евгений Петрович[1], Зыков Андрей Владимирович[2]✉

[1,2]Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

[1]info@petrosad.ru https://orcid.org/0000-0002-3444-0632
[2]info@petrosad.ru https://orcid.org/0000-0002-3435-7468

Аннотация. В статье представлены результаты исследований влияния различных доз азотных удобрении и системы содержания почвы в междурядьях посадок на урожайность яблоневого сада. Почва сада – дерново-карбонатная супесчаная, подстилаемая карбонатным суглинком с высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия. Согласно методике

исследований, весной в почву при паровой и дерново-перегнойной системах содержания почвы вносили карбамид из расчета 90, 120, 240 и 360 кг азота на га. При паровой системе органические удобрения (20 т/га в год) вносили под вспашку, карбамид – под дискование; при дерново-перегнойной системе карбамид разбрасывали по поверхности задернённой почвы. Опыт также включал вариант без внесения азотных удобрений с целью установления влияния систем содержания почвы на урожайность яблонь в условиях возможного дефицита азота. Целью исследования являлось определение рациональных доз внесения азотных удобрений при различных способах содержания междурядий сада с точки зрения их влияния на урожайность и развитие плодовых деревьев. Результаты исследования показали, что во всех вариантах опыта происходило накопление подвижных форм азота в почве. Установлено, что наиболее эффективно внесение азота при дерново-перегнойной системе содержания почвы из расчёта 90-120 кг/га, при паровой системе – 120 кг/га. Реализация потенциального плодородия при дерново-перегнойной системе выше, чем при паровой. Высокие дозы азота 240-360 кг/га на дерново-карбонатной высокоокультуренной почве неэффективны.

Ключевые слова: яблоня, урожайность, обработка почвы, питание, качество плодов, минеральное питание.

Для цитирования: Безух Е.П., Зыков А.В. Обоснование рациональных доз внесения азотных удобрений и их влияние на урожайность и развитие яблони сорта Антоновка // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4 (117) С. 32-42 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-32-42

Research article
Universal Decimal Code 634.11:631.11

JUSTIFICATION OF RATIONAL DOSES OF NITROGEN FERTILIZERS AND THEIR EFFECT ON YIELD AND GROWTH OF ANTONOVKA APPLE TREE VARIETY

Evgeny P. Bezukh[1], Andrey V. Zykov [2]✉

[1, 2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

[1]info@petrosad.ru https://orcid.org/0000-0002-3444-0632
[2]info@petrosad.ru https://orcid.org/0000-0002-3435-7468

Abstract. The article presents the research results on the effect of different doses of nitrogen fertilizers and the maintenance system of soil in the planting inter-rows on the yielding capacity of an apple orchard. The soil in the orchard was sod-carbonate sandy loam underlain by carbonate loam with a high content of mobile forms of phosphorus and potassium. According to the research methodology, in spring, urea was applied to soil under the fallow-based and sod-and-humus based soil maintenance systems at the rate of 90, 120, 240 and 360 kg of nitrogen per hectare. In the fallow-based system, organic fertilizers (20 t/ha/year) were applied together with plowing and urea – together with disking; in the sod-and-humus system, the urea was spread on the surface of sodded soil. The experiment also included a variant without nitrogen fertilizers to establish the effect of soil maintenance systems on apple yields under conditions of possible nitrogen deficiency. The study

purpose was to determine efficient doses of nitrogen fertilizer under different methods of orchard row-spacing maintenance in terms of their effect on yielding capacity and development of fruit trees. According to the study results, all experiment variants showed the accumulation of mobile forms of nitrogen in the soil. The study established that the most effective nitrogen application dose in the sod-and-humus soil maintenance system was 90 to 120 kg/ha, in the fallow-based system – 120 kg/ha. Fulfillment of potential soil fertility in the sod-and-humus soil maintenance system is higher than that in fallow-based system. High doses of nitrogen of 240-360 kg/ha on sod-carbonate highly cultivated soil were found ineffective.

Key words: apple tree, productivity, tillage, nutrition, fruit quality, mineral nutrition.

For citation: Bezukh E.P., Zykov A.V. Justification of rational doses of nitrogen fertilizers and their effect on yield and growth of Antonovka apple tree variety // AgroEcoEngineering. 2023;4(117): 32-42 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-32-42

Введение. Азотные удобрения имеют первостепенное значение для питания деревьев в условиях дерново-подзолистых почв. В Северо-Западном регионе под яблоню вносят умеренные дозы азота (90-120 кг/га) [1].

Анализ литературных источников показал, что в некоторых исследованиях описывается не только положительное влияние азотных удобрении способствующих сильному морфологическому развитию саженцев, но и снижение иммунитета к болезням, вредителям и заморозкам. Исследования по влиянию корневых и некорневых удобрении на качество плодов яблони свидетельствуют о том, что повышение доз азотных удобрении ведёт к увеличению размера и количества зеленных плодов, но одновременно ухудшает их биохимический состав. В плодах яблони увеличивается размер клеток и происходит уменьшение уровня кальция, что уменьшает твёрдость и, как следствие, лёжкость плодов [2-5].

В настоящее время в садоводстве кроме традиционной операции внесения минеральных удобрении в почву внедряют некорневое питание растений. Этот способ заключается в высокой скорости усвоения нутриентов в растении. Данный способ даёт возможность быстрого снижения их дефицита в микроэлементах при питании[8]. Оба способа применения удобрений влияют не только на урожайность, но и на химический состав плодов. В плодах изменяется содержание как органических, так и минеральных компонентов [6].

Качественные показатели плодовых культур изменяются не только от суммарного содержания элементов, но и от их соотношения между собой и их концентрации. Исследователи в своих работах описывают статистические взаимосвязи двух или более случайных величин между лёжкостью плодов, их качеством и соотношением в плодах микроэлементов [7-9]. Факторы погодных условий, годовой урожай дерева и агротехника непосредственно влияют на концентрацию кальция, калия, магния в плодах яблони [10-14]. До настоящего времени воздействие более высоких доз азотных удобрении на продуктивность яблони в условиях Северо-Западного региона не изучено.

Целью исследования являлось определение рациональных доз внесения азотных удобрений при различных способах содержания междурядий сада с

[8] Трунов Ю.В. Биологические основы минерального питания яблони. Воронеж: Кварта. 2013. 428 с.

точки зрения их влияния на урожайность и развитие плодовых деревьев.

Материалы и методы исследования. Все экспериментальные работы проводились в садах Ленинградской плодоовощной опытной станции – Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. В опыте использовались яблоневые деревья сорта Антоновка. В настоящее время данный сорт является сортотипом, объединяющим ряд родственных сортов. Районирован в юго-восточной, северо- и юго-западной зонах региона. Раннезимний сорт. Достоинства сорта: высокая экологическая приспособленность, урожайность, высокая товарность плодов, имеющих неповторимый "антоновский" вкус и аромат, пригодность для потребления в свежем виде, для различных видов переработки и мочения. Возраст сада при начале исследования достиг 25 лет. Почва сада – дерново-карбонатная супесчаная, книзу суглинистая, подстилаемая карбонатным суглинком с высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия. При паровой и дерново-перегнойной системах содержания почвы в весенний период вносили карбамид из расчёта 90, 120, 240 и 360 кг азота на га. При паровой системе органические удобрения (20 т/га в год) вносили под вспашку, а карбамид – под дискование; при дерново-перегнойной системе карбамид разбрасывали по поверхности задернённой почвы.

Опыт также включал вариант без внесения азотных удобрений с целью установления влияния систем содержания почвы на урожайность яблонь в условиях возможного дефицита азота.

Подвижные формы азота определяли в динамике 4-5 раз за период вегетации по стандартным методикам[9].

Содержание азота в почве зависит от многих факторов (удобрений, влагообеспеченности почвы, интенсивности ее нитрификационных процессов, поглощения растениями и вымывания питательных веществ осадками и др.).

При проведении исследований нами использовался системный комплексный подход к научному изучению влияния почвенных условий на развитие и плодоношение яблонь по общепринятым методам проведения экспериментов: Морфология плодовых и ягодных растений и методы её изучения, Руководство по химическому анализу почв, Методика полевых и вегетационных опытов с удобрениями и гербицидами, Учёт развития растений, Методические указания по диагностике минерального питания яблони и других садовых культур. При проведении исследований использовались полевые, лабораторные и вегетационные методы; методы статистического и экономического анализа[10,11,12].

Результаты и обсуждение. Результаты восьмилетнего исследования показали, что во всех вариантах опыта происходило накопление подвижных форм

[9] Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука. 1985. 496 с.

[10] Савин Е. З., Березина Т. В. Методические рекомендации изучения плодово-ягодных культур. Известия Самарского научного центра РАН, 2014. Вып. 16. №. 5-5. С. 1796-1801.

[11] Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Альянс. 2011. 352 с.

[12] Леоничева Е.В., Роева Т. А, Леонтьева Л. И., Столяров М. Е. Диагностика минерального питания яблони: Методические рекомендации. Орел: Всероссийский научно–исследовательский институт селекции плодовых культур. 2021. 36 с.

азота в почве. Количество азота в почве находилось в прямой зависимости от доз его внесения (табл. 1).

Таблица 1. Содержание влаги и подвижных форм азота в почве в зависимости от системы содержания почвы и доз азота (2010-2018 гг.)

Table 1. Moisture content and mobile forms of nitrogen in the soil depending on the soil maintenance system and nitrogen doses (2010-2018)

Доза азота, кг/га	Слой почвы, см	Дерново-перегнойная система			Паровая система		
		Продуктивная влага, мм	NO_3 г на 100 г почвы	NH_4 г на 100 г почвы	Продуктивная влага, мм	NO_3 г на 100 г почвы	NH_4 г на 100 г почвы
0	0-20	62	1,9	0,7	54	6,3	1,3
0	20-40	45	0,4	0,5	48	2,5	0,7
0	40-60	39	0,4	0,6	37	1,9	0,6
0	0-60	146	0,9	0,6	139	3,6	0,9
90	0-20	60	3,5	1,1	52	10,7	1,1
90	20-40	40	0,9	0,5	42	4,7	0,8
90	40-60	38	0,4	0,6	34	2,2	0,7
90	0-60	138	1,6	0,7	128	5,9	0,9
120	0-20	45	6,0	0,9	48	13,7	0,7
120	20-40	38	3,5	0,6	46	8,4	0,6
120	40-60	30	2,2	0,6	39	3,6	0,6
120	0-60	113	3,8	0,7	133	8,5	0,6
240	0-20	50	11,6	0,8	48	20,2	0,9
240	20-40	41	6,4	0,6	43	9,7	0,6
240	40-60	39	2,3	0,6	32	5,3	0,6
240	0-60	130	7,0	0,7	123	11,7	0,7
360	0-20	63	13,1	1,2	49	23,3	0,9
360	20-40	46	4,4	0,6	44	10,3	0,8
360	40-60	37	2,4	0,7	36	4,9	0,6
360	0-60	146	6,6	0,8	129	12,8	0,8

Период ведения опыта характеризовался повышенной влагообеспеченностью почвы: среднесезонное за 8 лет содержание продуктивной влаги в 60-и сантиметровом слое превысило среднемноголетние показатели.

Величина влагозапаса почвы различалась по вариантам опыта. В результате более высокой водопроницаемости задернённой почвы в условиях повышенной влагообеспеченности среднесезонные запасы влаги при дерново-перегнойной системе ее содержания превосходили влагозапас паровой почвы. Доза вносимого азота могла оказать влияние на поглощение влаги корнями яблони и травы, этим может быть объяснено лучшее сохранение влаги в задернённой и паровой почве в варианте без удобрений. Более высокая влагообеспеченность задернённой почвы при внесении азота в дозе 360 кг по сравнению с другими вариантами опыта (90 и 120 кг) обусловлена, как было показано нами[13], мульчирующим действием большого количества скошенной травы.

В первые четыре года, до суровой зимы 2010-2011 гг. состояние деревьев, растущих на задернённой почве, было лучше, чем на чёрном пару (табл. 2). Деревья, не получившие азотных удобрений, сократили ежегодный прирост ветвей, и оценка их состояния по бальной системе была несколько ниже, чем в других вариантах опыта.

[13] Безух Е.П. Плодовый питомник Северо-Запада РФ. СПб.: ИАЭП. 2020. 442 с.

Таблица 2. Состояние (в баллах) деревьев яблони сорта Антоновка в зависимости от систем содержания почвы и доз азота.
Table 2. Condition (in points) of Antonovka apple trees depending on soil maintenance systems and nitrogen doses

Система содержания почвы	Доза азота, кг/га					Среднее по системе содержания почвы
	0	90	120	240	360	
2010-2018 гг.						$НСР_{05}$=0,3
Дерново-перегнойная система	4,3	5,0	4,6	5,0	4,7	4,6
Паровая система	4,6	4,4	4,7	4,4	4,2	4,4
Среднее по дозе азота $НСР_{05}$=0,5	4,4	4,7	4,6	4,7	4,4	X_0=4,5 $НСР^0_{05}$=0,2
2010-2018 гг.						$НСР_{05}$=0.1
Дерново-перегнойная система	3,9	4,1	4,0	4,0	3,9	4,0
Паровая система	3,9	3,9	4,2	4,0	3,7	3,9
Среднее по дозе азота $НСР_{05}$=0,3	3,9	4,0	4,1	4,0	3,8	X_0=3,9 $НСР^0_{05}$=0,3

Среднемноголетние оценки состояния деревьев, растущих на задернённой почве, были одинаковы при внесении азота в дозе 360 кг и без азота; при паровой системе деревья при внесении в почву азота в дозе 360 кг по состоянию уступали деревьям, не получившим его.

У деревьев на чёрном пару при дозе азота 360 кг усилился однолетний прирост ветвей, но ежегодно в период активного роста наблюдалась хлоротичность листьев на длинных побегах которая исчезала во вторую половину вегетации или сохранялась до листопада. Состояние деревьев при паровой системе содержания почвы и внесении азота в дозе 360 кг было одинаково с состоянием деревьев на задернении без удобрений.

После подмерзания деревьев зимой 2010 года состояние их ухудшилось, а высокие дозы азота не способствовали улучшению состояния.

Высокие дозы азота (240 и 360 кг/га) не обеспечили повышение продуктивности деревьев. В первые четыре года урожайность была высокой, при этом на задернённой почве независимо от доз азота она оставалась на одном уровне; на чёрном пару отмечена тенденция одинаковой прибавки урожайности при дозах 120 и 240 кг/га (табл. 3).

Таблица 3. Урожайность (т/га) яблони сорта Антоновка в зависимости от систем содержания почвы и доз азота.
Table 3. Productivity (t/ha) of Antonovka apple trees depending on soil maintenance systems and nitrogen doses.

Система содержания почвы	Доза азота, кг/га					Среднее по системе содержания почвы
	0	90	120	240	360	
2010-2014 гг.						$НСР_{05}$=0,3
Дерново-перегнойная система	10,1	17,5	17,6	16,6	18,0	16,0
Паровая система	12,0	12,5	16,2	16,3	13,6	14,1
Среднее по дозе азота $НСР_{05}$=3,4	11,0	15,0	16,9	16,5	15,8	X_0=15,0 $НСР^0_{05}$=4,9

2015-2018 гг.						$НСР_{05}$=2,2
Дерново-перегнойная система	10,9	10,7	8,2	10,5	11,0	10,3
Паровая система	8,9	9,6	6,6	15,8	14,3	10,9
Среднее по дозе азота $НСР_{05}$=1,5	9,5	10,1	7,4	13,1	12,6	X_0=10,6 $НСР^0_{05}$=5,0
2010-2018 гг.						$НСР_{05}$=0,9
Дерново-перегнойная система	10,5	13,4	12,2	12,9	12,4	12,3
Паровая система	9,8	11,0	12,5	13,6	11,4	12,3
Среднее по дозе азота $НСР_{05}$=4,6	10,1	12,2	12,3	13,3	11,9	X_0=12,3 $НСР^0_{05}$=6,5

При обильном плодоношении в 2018 году максимальная урожайность деревьев на задернении при дозе азота 90 кг составила 31,3 т/га, а на пару при дозах 90 и 240 кг – 19,3 т/га, соответственно. В 2022 году урожайность деревьев на задернении существенно превышала их урожайность на паровой почве и составила 22,1 и 18,3 т/га ($НСР_{05}$ = 4 т/га).

Обсуждение. В результате подмерзания деревьев урожайность снизилась и в последующие за суровой зимой четыре года на задернённой почве при разных дозах внесения азота была одинаковой, в период восстановления деревьев под влиянием высоких доз азота урожайность увеличилась.

В среднем за восьмилетний период урожайность яблони при обеих системах содержания и различных дозах внесения осталась на одном уровне без существенных различий между вариантами. Наибольшая средняя урожайность за 2018 год у деревьев на задернённой почве (13,4 т га) отмечена при дозе азота 90 кг, на чёрном пару (13,6 т/га) – при дозе 240 кг.

Урожайность деревьев в варианте без внесения в почву азота хотя и уступала урожайности в других вариантах на 20-30%, была достаточно высокой – 10 т/га. В урожайном 2018 году на задернённой почве продуктивность деревьев, не получавших четыре года азотных удобрений, была такой же (17,0 т/га), как и деревьев при внесении под них азота в дозе 240 кг. На чёрном пару без удобрений, а также с дозами азота 120 и 360 кг урожайность яблони была одинаковой и составила 17,6 т/га.

Выводы. Результаты восьмилетних исследований показали, что почва опытного сада, относящаяся по комплексу агрофизических и агрохимических показателей к лучшим почвам зоны, обладает достаточно высоким потенциалом плодородия. Реализация потенциального плодородия при дерново-перегнойной системе содержания почвы выше, чем при паровой системе. Это выражается в лучшем состоянии деревьев и высокой урожайности при внесении в почву низкой дозы азота (90 кг/га).

Наиболее эффективно внесение азота при дерново-перегнойной системе содержания почвы из расчёта 90-120 кг/га, при паровой – 120 кг/га. Высокие дозы азота 240-360 кг/га на дерново-карбонатной высокоокультуренной почве неэффективны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Воробьёв В.А., Цыганова Н.А. Агроэкологические последствия длительного применения дефицитных систем удобрений на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2016. №4. С. 10-17.

2. Столяров М.Е., Леоничева Е.В., Роева Т.А., Леонтьева Л.И. Влияние корневого и некорневого удобрения на качество плодов яблони двух сортов // Агрохимический вестник. №. 6. 2020. С. 59-67. https://doi.org/10.24412/1029-2551-2020-10087

3. Zargar M., Tumanyan A., Ivanenko E., Dronik A., Tyutyuma N., Pakina E. Impact of foliar fertilization on apple and pear trees in reconciling productivity and alleviation of environmental concerns under arid conditions // Communicative & Integrative Biology. 2019. Vol.12 (1). P.1-9. https://doi.org/10.1080/19420889.2019.1565252

4. Liao Y., Cao H.-X., Xue W.-K., Liu X. Effects of the combination of mulching and deficit irrigation on the soil water and heat, growth and productivity of apples // Agricultural Water Management. 2021. Vol. 243, 106482. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106482

5. Dzanagov S. Kh., Gazdanov A.V., Lazarov T.K., Asaeva T.D., Basiev A.E., Kanukov Z.T. Fertilizers effect on yield and apples' fruits quality on leached chernozem // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 624, 012201. https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012201

6. Shutian Li, Yan’an Tong, Rongzong Cui, Ren Wang. 4R potassium management in apple production in North China // Better Crops with Plant Food. 2017. Vol. 101(1). P. 4-6. URL: http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/2C450BCD21A84E92852580CA0074DC71/$FILE/BC-2017-1%20p4.pdf

7. De Macedo T. A., da Silva P. S., Sander G. F., Welter J. F., Rufato L., de Rossi A. Productivity and quality of 'Fuji Suprema' apple fruit in different rootstocks and growing conditions // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 256, 108651. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108651

8. Ganiyeva F. A., Yunusov R. The growth, development and yield of apple trees in intensive fruit orchards are hardwood cutting combinations and their dependence on the thickness of seedlings // Natural Volatiles & Essential Oils Journal. 2021. Vol. 8(5). P. 9591-9595 URL:https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/2663

9. Van Der Boon J. Prediction and control of bitter pit in apples. I. Prediction based on mineral leaf composition, cropping levels and summer temperatures // Journal of Horticultural Science. 1980. Vol. 55(3). P. 307-312. https://doi.org/10.1080/00221589.1980.11514939

10. Kviklys D., Viskelis J., Lanauskas J., Uselis N., Liaudanskas M., Janulis V. Effects of growth control on yield and fruit quality of the apple cultivar «Rubin» // Agricultural and Food Science. 2020. Vol.29. P. 245-252. https://doi.org/10.23986/afsci.90757

11. Dilmaghani M.R., Malakouti M.J., Neilsen G.H., Fallahi E. Interactive effects of potassium and calcium on K/Ca ratio and its consequences on apple fruit quality in calcareous soils of Iran // Journal of Plant Nutrition. 2005. Vol. 27(7), 11491162. https://doi.org/10.1081/PLN-120038541

12. Jemric T., Fruk I., Fruk M., Radman S., Sinkovic L., Fruk G. Bitter pit: pre- and postharvest factors: A review // Spanish Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 14(4). P. 1-12. http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016144-8491

13. Atay E., Crété X., Loubet D., Lauri P.-E. Effects of different crop loads on physiological, yield and fruit quality of 'Joya™' apple trees: high crop load decreases maximum daily trunk diameter and does not affect stem water potential // International Journal of Fruit Science. 2021. Vol. 21(1). P. 955-969. https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1951922

14. Леоничева Е.В., Роева Т.А., Леонтьева Л.И., Ветрова О.А., Столяров М.Е. Влияние некорневых подкормок на содержание калия, кальция и магния в плодах двух сортов яблони // Агрохимия. 2018. № 8. С. 22-33. https://doi.org/10.1134/S0002188118080094

REFERENCES

1. Ivanov A.I., Ivanova Zh.A., Vorob'ev V.A., Tsyganova N.A. The agri-environmental consequences of long-term use of scarce systems of fertilizer on well-cultivated soddy-podzolic soils. Agrokhimiya = Agrohimia (Agricultural Chemistry). 2016; 4:10-17 (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26017791

2. Stolyarov M.E., Leonicheva E.V., Roeva T.A., Leonteva L.I. Influence of foliar and ground fertilization by potassium and nitrogen on calcium, potassium and magnesium content in apple fruits of two cultivars. Agrokhimicheskiy vestnik = Agrochemical Herald. 2020; 6:50-67 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/1029-2551-2020-10087

3. Zargar M., Tumanyan A., Ivanenko E., Dronik A., Tyutyuma N., Pakina E. Impact of foliar fertilization on apple and pear trees in reconciling productivity and alleviation of environmental concerns under arid conditions. Communicative & Integrative Biology. 2019;.12 (1):1-9 (In Eng.) https://doi.org/10.1080/19420889.2019.1565252

4. Liao Y., Cao H.-X., Xue W.-K., Liu X. Effects of the combination of mulching and deficit irrigation on the soil water and heat, growth and productivity of apples. Agricultural Water Management. 2021;243, 106482. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106482

5. Dzanagov S. Kh., Gazdanov A.V., Lazarov T.K., Asaeva T.D., Basiev A.E., Kanukov Z.T. Fertilizers effect on yield and apples' fruits quality on leached chernozem. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021; 624, 012201. (In Eng.) https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012201

6. Shutian Li, Yan'an Tong, Rongzong Cui, Ren Wang. 4R potassium management in apple production in North China. Better Crops with Plant Food. 2017; 101(1):4-6. (In Eng.) URL: http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/2C450BCD21A84E92852580CA0074DC71/$FILE/BC-2017-1%20p4.pdf

7. De Macedo T. A., da Silva P. S., Sander G. F., Welter J. F., Rufato L., de Rossi A. Productivity and quality of 'Fuji Suprema' apple fruit in different rootstocks and growing conditions. Scientia Horticulturae. 2019; 256, 108651. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108651

8. Ganiyeva F. A., Yunusov R. The growth, development and yield of apple trees in intensive fruit orchards are hardwood cutting combinations and their dependence on the thickness of seedlings. Natural Volatiles & Essential Oils Journal, 2021; 8(5): 9591-9595. (In Eng.) URL: https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/2663

9. Van Der Boon J. Prediction and control of bitter pit in apples. I. Prediction based on mineral leaf composition, cropping levels and summer temperatures. Journal of Horticultural Science. 1980; 55(3):307-312. (In Eng.) https://doi.org/10.1080/00221589.1980.11514939.

10. Kviklys D., Viskelis J., Lanauskas J., Uselis N., Liaudanskas M., Janulis V. Effects of growth control on yield and fruit quality of the apple cultivar “Rubin”. Agricultural and Food Science. 2020. 29: 245–252. (In Eng.) https://doi.org/10.23986/afsci.90757

11. Dilmaghani M.R., Malakouti M.J., Neilsen G.H., Fallahi E. Interactive effects of potassium and calcium on K/Ca ratio and its consequences on apple fruit quality in calcareous soils of Iran. Journal of Plant Nutrition. 2005; 27(7), 11491162. (In Eng.) https://doi.org/10.1081/PLN-120038541

12. Jemric T., Fruk I., Fruk M., Radman S., Sinkovic L., Fruk G. Bitter pit: pre- and postharvest factors: A review. Spanish Journal of Agricultural Research. 2016; 14(4): 1-12. (In Eng.) http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016144-8491

13. Atay E., Crété X., Loubet D., Lauri P.-E. Effects of different crop loads on physiological, yield and fruit quality of ‘Joya™’ apple trees: high crop load decreases maximum daily trunk diameter and does not affect stem water potential. International Journal of Fruit Science. 2021; 21(1): 965-969. (In Eng.) https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1951922

14. Leonicheva E.V., Roeva T.A., Leont’eva L.I., Vetrova O.A., Stolyarov M.E. The effect of foliar fertilization on contents of potassium, calciumand magnesium of fruits for two apple cultivars. Agrokhimiya = Agrohimia (Agricultural Chemistry). 2018; 8: 22-33. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0002188118080094

Об авторах	**About the authors**
Евгений Петрович Безух, канд. с.-х. наук; ведущий специалист, консультационно-экспертный отдел, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3) info@petrosad.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3444-0632	**Evgeny P. Bezukh,** Cand. Sc. (Agriculture), lead specialist, Advisory and Expert Department, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia info@petrosad.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3444-0632
Андрей Владимирович Зыков, научный сотрудник, отдел агроэкологии в садоводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево,	**Andrei V. Zykov**, researcher, Department of Agroecology in Horticulture, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia sznii@inrternet.ru,

Фильтровское ш., д. 3) sznii@inrternet.ru, ResearcherID: A-7155-2015. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3435-7468	ResearcherID: A-7155-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3435-7468
Заявленный вклад авторов А.В. Зыков – сбор, анализ и обобщение литературных данных, создание черновика рукописи, оформление окончательного варианта рукописи. Е.П. Безух – руководство исследованием, формальный анализ, концептуализация, редактирование.	**Authors' contribution** A.V. Zykov – collection, analysis and synthesis of literary data, creation of a draft manuscript, design of the final version of the manuscript. E.P. Bezukh – research supervision, formal analysis, conceptualization, editing.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this paper.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 09.11.2023	**Received:** 09.11.2023
Одобрена после рецензирования: 07.12.2023	**Approved after reviewing:** 07.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 633.491+57.087 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-42-57

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Минин Владислав Борисович[1]✉, Черникова Марина Владимировна[2]

[1,2]Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

[1]minin.iamfe@mail.ru ORCID: 0000-0002-5207-8921
[2] laboratorychm@yandex.ru

Аннотация. Законодательная и нормативно-правовая основа, утверждённая Правительством Российской Федерации в области экологической безопасности, гласит, что в настоящее время переход к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству является одним из приоритетных вызовов. Органическое сельскохозяйственное производство способствует сохранению экосистем и обеспечивает создание продукции для здорового питания человека. Исследовался процесс развития картофеля, возделываемого по органической технологии. В опытах изучалось воздействие на картофель компоста, изготовленного на основе куриного помета, и биологического мультифункционального препарата «Картофин» для защиты растений от ряда грибковых заболеваний. В 2023 году в опыт были введены варианты с минеральным удобрением – нитроаммофоской. В статье описаны результаты исследования за 2022 и 2023 гг. Почва опыта – дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая на остаточно-карбонатном моренном суглинке. Концентрация нитратов в почве на контрольных вариантах в большем количестве накапливалась в 2022 году, чем в 2023 году. Установлено, что компост в оба года обеспечивал увеличение продуктивности картофеля на 20-30% по сравнению с контрольным вариантом. Доза, соответствующая 120 кг азота/га компоста и нитроаммофоски, позволила получить общую биологическую продуктивность картофеля в пределах 28-32 т/га. Использование удобрений несколько понижало содержание крахмала в клубнях картофеля, но увеличивало его урожайность, проявления фитофтороза не было отмечено.

Ключевые слова: картофель, компост, органическое производство, урожайность картофеля, содержание нитратов, крахмал

Для цитирования: Минин В.Б., Черникова М.В. Оценка эффективности органической технологии возделывания картофеля в условиях Ленинградской области // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 42-57 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-42-57

Research article
Universal Decimal Code 633.491+57.087

EFFICIENCY ASSESSMENT OF ORGANIC POTATO CULTIVATION TECHNOLOGY IN THE LENINGRAD REGION

Vladislav B. Minin[1]✉, Marina V. Chernikova[2]

[1,2]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

[1]minin.iamfe@mail.ru ORCID: 0000-0002-5207-8921
[2] laboratorychm@yandex.ru

Abstract. The legislative and regulatory framework approved by the Government of the Russian Federation in the sphere of environmental safety states that currently the transition to highly productive and environmentally friendly agriculture is one of the priority challenges. Organic agricultural production contributes to preservation of ecosystems and ensures the creation of products for healthy human nutrition. The study investigated the development of

potato cultivated by organic technology. The experiments considered the effect of compost made from poultry manure and Kartofin biological multifunctional chemical, which protected plants from some fungal diseases, on potatoes. In 2023, the study introduced the variants with a mineral fertilizer – nitroammophoska in the experiment. The article describes the study results for the years of 2022 and 2023. The soil of the experiment was soddy-podzolic, light loamy, gleyic, on residual carbonate moraine loam. The nitrate concentration in the soil in the control variants accumulated in greater quantities in 2022 than in 2023. The study discovered that the compost in both years provided an increase in potato productivity by 20-30% compared to the control variant. The dose corresponding to 120 kg of nitrogen/ha of compost and nitroammophoska allowed obtaining the overall biological productivity of potatoes in the range of 28 to 32 t/ha. Application of fertilizers slightly reduced the starch content in potato tubers, but increased its yield; no manifestations of late blight were noted.

Key words: potato, compost, organic production, potato yield, nitrate content, starch

For citation: Minin V.B., Chernikova M.V. Efficiency assessment of organic potato cultivation technology in the Leningrad Region // AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 42-57 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-42-57

Введение. В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642, отмечается, что возрастание антропогенной нагрузки на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, формирует рост рисков для жизни и здоровья граждан.

Соответственно, необходимо добиться снижения технологических рисков в агропромышленном комплексе. При этом следует обеспечить переход к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству. Это предусматривает разработку и внедрение систем рационального применения агротехнологических средств, в том числе биологической защиты сельскохозяйственных растений, организацию надлежащего хранения и эффективной переработки сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания[14].

Органическое сельское хозяйство - направление, в котором применяются способы, методы и технологии, направленные на обеспечение благоприятного состояния окружающей среды, оно способствует улучшению экосистем, сохранению биоразнообразия и восстановлению плодородия почв [1], поэтому следует его активно развивать. А для этого необходимы технологии органического сельскохозяйственного производства, адаптированные к местным почвенно-климатическим условиям [2].

Картофель является культурой, которая легко адаптируется к различным условиям. Не случайно его возделывают в 150 странах мира. В обзоре Jennings et al., 2020 рассмотрены результаты моделирования, использующего

[14] Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: http://base.garant.ru/71551998/ (дата обращения 21.11.2023)

следующие элементы адаптации возделывания картофеля к изменению погодных условий: различные сроки посадки, подбор сортов картофеля, а также дополнительное поглощение CO_2. Результаты моделирования свидетельствуют, что при включении адаптационных механизмов, повышение урожайности картофеля составляет от 9 до 20% в зависимости от исходных данных климатической модели. При этом, урожайность картофеля демонстрировала более высокий прирост при адаптации, чем у других основных культур к 2050 году [3].

В последнее время особое внимание обращается на производство органического картофеля. По прогнозу, подготовленному IFOAM, рынок органической продукции к 2020 году достиг 120,6 млрд. евро и продолжит свой дальнейший рост со скоростью 10…12% в год [4].

В Европейском Союзе, после некоторого снижения производства картофеля, наибольшее его количество производится в северных странах и в северных регионах Германии, Франции, Великобритании, на всей территории Нидерландов и Бельгии. Однако, площади, на которых возделывается органический картофель, составляют только 1,9%. Большее всего возделывается органического картофеля в Германии, его площади достигают 3,9% от общей площади под картофель в этой стране [5].

В 2023 году в России, согласно промежуточным данным Минсельхоза на середину октября, валовые сборы картофеля составили 6,6 млн. т., что на 34,5% выше уровня прошлого года. При этом, хотя посадки картофеля в ЛПХ сокращаются, в товарном секторе общая площадь посадок картофеля выросла с 301,9 тыс. га в 2022-м до 305 тыс. га в 2023 году [6]. К сожалению, органическое производство картофеля почти не осуществляется, хотя существует ряд рекомендаций по возделывания картофеля согласно органическим требованиям, изданные в России [7-9].

Согласно Стратегии развития производства органической продукции в Российской Федерации[15], из 173 производителей и экспортёров органической продукции, имеющих российский и (или) иностранный сертификаты соответствия, только 12 процентов (или около 21 хозяйства) занимаются выращиванием овощей и фруктов. Картофелеводство в России активно развивается и в настоящее время товаропроизводителям следует ориентироваться на целевое использование сорта, которое распределяется на применение в свежем виде, для переработки в продукты из картофеля или в крахмал, или для здорового (диетического) питания [10].

Целью данной работы является оценка эффективности органической технологии возделывания картофеля в условиях Ленинградской области в 2022 и 2023 годах.

Материалы и методы. Эксперимент проводился на территории опытной станции ИАЭП - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Используемый сорт картофеля «Удача» относится к раннему типу. Он предназначен для столового потребления, салатного типа, клубни не развариваются. [11]. Сорт

[15]Распоряжение Правительства РФ от 4 июля 2023 г. № 1788-р «Об утверждении Стратегии развития производства органической продукции в РФ до 2030 г.» [Электронный ресурс] URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407297286/ (дата обращения 21.11.2023)

выведен во Всероссийском НИИ картофельного хозяйства имени А.Г. Лорха. При возделывании в условиях органического производства данный сорт хорошо реагирует на внесение компоста и использование биологических препаратов [12]. В опыте реализуется органическая технология возделывания картофеля, разработанная в институте и включающая следующие операции: выбор устойчивого сорта картофеля; осуществление посадки (в Ленинградской области – не ранее второй половины мая), углублённую обработку межгребневого пространства, использование концентрированного компоста, внесение биологических препаратов при посадке по клубням, по листьям и перед хранением. [13]. Биологические препараты имеют комплексное защитное действие, защищая картофель, в первую очередь, от грибковых болезней [14].

Почва опытного участка – дерново-подзолистая легкосуглинистая глееватая на остаточно-карбонатном моренном суглинке. Она характеризуется практически нейтральной реакцией почвенной среды и высоким содержанием органического вещества. Содержание подвижных соединений фосфора и калия отличается достаточно высокой вариабельностью, но не ниже среднего уровня по плодородию.

В опыте 2022 года вносили только одну дозу компоста, соответствующую 110 кг N/га. В опыте изучался значительный ряд средств защиты растений, поэтому использовали одну усреднённую дозу компоста.

В опыте 2023 года, использовали две дозы компоста, соответствующие 60 и 120 кг N/га. Эти дозы соотносились с рекомендованными дозами минерального удобрения (нитроаммофоски), варианты с которыми также были включены в опыт 2023 года. Этот опыт был размещён вне севооборотного участка.

В опыте, при реализации органической технологии возделывания картофеля изучались две группы факторов: уровень минерального питания, обеспеченный действием компоста «БИАГУМ» на основе куриного помета, приготовленного индустриальным способом в биоконверторе в ИАЭП [15], и минерального удобрения, и действием биологических средств защиты растений. В исследовании эффективность технологии оценивалась по величине продуктивности картофеля [16, 17].

Удобрения вносились в почву за день до посадки картофеля и заделывались. Варианты опыта представлены в таблицах ниже. Площадь делянки в опыте в 2022 году – 5,6м х 11м = 61,6 м^2, а в 2023 году – 2,8м х 5м = 14 м^2. Повторность – четырёхкратная. Посадка картофеля в 2022 году состоялась 25 мая, а в 2023 году – 24 мая.

Отобранные с делянок образцы клубней картофеля отправлялись в лабораторию на анализ, часть образцов картофеля были размещены в хранилище для изучения их изменения при хранении. В образцах картофеля определялись: содержание сухого вещества, согласно ГОСТ 28561-90[16], крахмала – по ГОСТ 7194-81[17]. Товарность клубней картофеля, а также выделение заболевших клубней

[16] ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги. М.: Стандартинформ. 2011. 11 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data/73/7384.pdf

[17] ГОСТ 7194-8. Картофель свежий. Правила приемки и методы определения качества. М.: Стандартинформ. 2010. 13 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294822/4294822617.pdf

определялись согласно ГОСТ 7176-2017[18].

В 2022 году определялась водорастворимая форма аммония в почве опыта, а в 2023 году – обменный аммоний.

Погодные условия фиксировались в динамике автоматической метеостанцией Davis Vantage pro 2. Результаты опыта были обработаны статистически в программах Windows EXELL и Statistica 10.

Результаты исследований. *Погодные условия.* Два рассматриваемые года заметно отличались по погодным условиям во время вегетационного периода (табл.1). 2022 год характеризовался несколько более холодными условиями в мае и меньшим количеством осадков, выпавших в это время. В 2023 году температура была несколько выше, но осадков выпало меньше, чем по среднемноголетним значениям. Тем не менее, в дальнейшем температурные условия были близкими для рассматриваемых нами лет и достаточно комфортными для картофеля. Начиная с июня 2022 года, температура вегетационного сезона была несколько выше, чем в 2023 году. С начала июля 2022 года осадков выпало значительно больше, чем в 2023 году. Согласно гидротермическому коэффициенту Селянинова, условия в 2023 были более аридные по сравнению с предыдущим годом.

Таблица 1. Погодные условия в вегетационный период в годы исследований

Table 1. Weather conditions in vegetation periods in the study years

Месяц	Показатель погодных условий	Годы		Годовые средние значения
		2022	2023	
Май	Температура С°	9,9	12,0	11,3
	Осадки, мм	15	33,5	46,0
	ГТК Селянинова	0,3	0,7	-
Июнь	Температура С°	17,4	17,3	15,7
	Осадки, мм	47,6	62,0	71,0
	ГТК Селянинова	0,9	1,2	-
Июль	Температура С°	18,7	17,0	18,8
	Осадки, мм	85,2	58,0	79,0
	ГТК Селянинова	1,5	1,1	-
Август	Температура С°	20,0	19,2	16,9
	Осадки, мм	149,6	40,4	83,0
	ГТК Селянинова	1,7	0,7	-

Влияние погодных условий, места расположения поля и антропогенных факторов на содержание влажности и минеральных форм азота в почве. Содержащиеся в почве влага и минеральные соединения азота обеспечивают развитие растений картофеля. Представленные данные свидетельствуют, что ко времени посадки картофеля в почве в 2022 году было несколько больше влаги и выше концентрация нитратов по сравнению с 2023 годом (табл. 2, рис. 1 и рис. 2)

[18] ГОСТ 7176-2017. Картофель продовольственный. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2018. 18 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293740/4293740954.htm

Таблица 2. Влияние свойств почвы, погодных условий и антропогенных воздействий на содержание минеральных форм азота в почве

Table 2. Influence of soil properties, weather conditions and anthropogenic impacts on the soil content of mineral forms of nitrogen

Вариант	Доза, кг N/га	Препарат	19.05.22		16.06.22		30.06.22		25.07.22					
			2022 год											
			Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$.	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$.	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$				
			%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг				
1	0	0	17,93 15,4-21,1	26,95 19,66-44,08	21,7	24,47	16,0	20,80	19,2	5,73				
2	110	0			22,2	36,72	17,0	41,94	18,8	20,02				
3	0	Картофин			21,3	31,19	17,2	17,74	21,2	8,94				
4	110	Картофин			20,7	34,06	17,3	28,39	21,4	23,11				
			2023 год											
			23.05		6.06		27.06		18.07		23.10.			
			Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$.	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$.	Влаж-ность	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$ обмен.	Nмин.
			%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	мг/кг	мг/кг
1	60	Мин. уд.	14,1 13,0-15,3	11,19 5,80-20,10	14,9	47,73	18,3	20,64	10,0	19,21	22,7	2,31	41,5	43,81
2	120	Мин. уд.			13,9	58,79	17,9	24,68	10,5	26,42	22,2	2,58	19,16	31,11
3	0	0			13,9	53,26	17,5	17,58	10,6	2,32	22,2	1,93	42,23	44,15
4	60	0			14,08	16,25	18,4	24,00	11,8	2,13	22,2	2,56	40,50	43,06
5	120	0			13,8	24,05	17,7	22,14	10,2	5,83	22,4	2,40	30,00	32,40
6	0	Картофин			13,3	2,39	17,5	11,83	10,4	2,73	22,2	2,20	24,58	26,78
7	60	Картофин			14,2	50,75	19,2	15,73	11,5	3,82	23,4	2,21	55,50	57,71
8	120	Картофин			13,3	43,94	18,11	30,26	10,6	6,51	22,50	2,16	37,00	30,83

Примечание: Nмин. – сумма азота нитратов и аммония в почве.

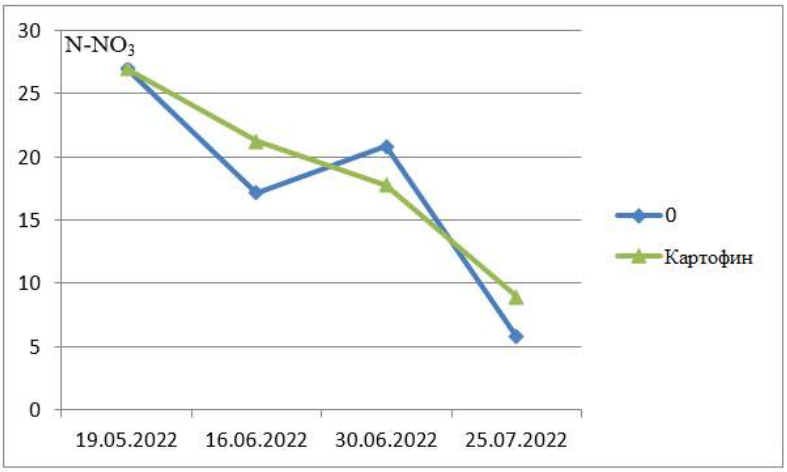


Рис. 1. Динамика содержания N-NO_3 (кг/га) в почве на контрольных вариантах (без компоста) в 2022 году

Fig.1. Dynamics of N-NO_3 content (kg/ha) in soil on control variants (without compost) in 2022

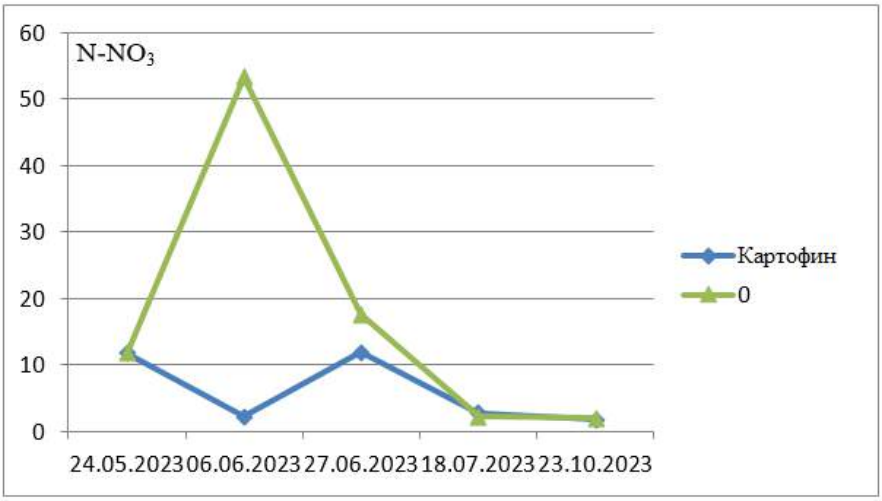


Рис. 2. Динамика содержания N-NO_3 кг/га в почве на контрольных вариантах (без компоста) в 2023 году

Fig. 2. Dynamics of N-NO_3 content (kg/ha) in soil on control variants (without compost) in 2023

В целом, во все сроки наблюдения, кроме конца июня, в 2022 году содержание влаги в почве было гораздо выше, чем в 2023 году. Также, в 2022 году, концентрация нитратного азота в почве на контрольном варианте, начиная с конца июня, была выше, чем в 2023 году. Однако, 6 июня 2023 года в почве контрольного варианта было отмечено повышенное содержание нитратов. По всей видимости, в почве остались органические остатки удобрений от предшественника, но их действие вскоре сократилось. Очевидно, что процесс нитрификации интенсивно шел в основной вегетационный период в июне, одинаково в оба года, несмотря на пиковое значение на рис. 2.

В июле 2023 года в почве было достаточно низкое содержание влаги. Это, по всей видимости, способствовало образованию пониженной концентрации нитратов в почве контрольных вариантов и в почве варианта с первой дозой компоста (2,13-3,82 мг N-NO_3/кг). Для активного протекания процессов нитрификации необходимы комфортная температура 25-32C^o окружающей среды, реакция почвенной среды близкая к нейтральной и достаточная влажность. В условиях

рассматриваемых лет, процесс нитрификации шёл достаточно активно, что было связано как с нейтральными параметрами почвенной среды, так и с погодными условиями [18]. Азот в форме нитратов очень подвижный, нестабильный, очень быстро изменяется под влиянием погодных условий и деятельности микроорганизмов, переходя в другие формы, а также усваивается растениями. Поэтому, представленные результаты очень динамичны. В почве в вегетационный период, в основном, минеральные формы азота представлены нитратами. Содержание азота в форме обменного аммония было примерно в два раз ниже, чем нитратного.

Почвенные условия, при которых проводились опыты, были очень близкими, так как расстояние между опытами составляло около 10 метров. Так, в почве поля с опыта 2022 года, общее содержание органического вещества составляло около 9,13%, а в 2023 году – 8,22%. Компост обеспечивал дополнительное содержание азота в почве за счёт значительных запасов этого элемента в нем, в том числе минеральных форм. Поэтому компост характеризуется пролонгированным действием содержащихся в нем питательных элементов, включая азот. Внесение компоста, в оба года содействовало дополнительному накоплению нитратов. Так? доза компоста в 110/120 кг N/га сформировала прибавки нитратного азота в пределах 4,56-21,14 мг/кг к контролю к концу июня.

В 2023 году впервые в опыт были включены варианты с минеральным азотным удобрением, которое было представлено нитроаммофоской. При первой дозе нитроаммофоски, в почве накапливалось примерно такое же содержание нитратов, как и на варианте с аналогичной дозой компоста. Однако, при внесении высокой дозы минерального удобрения сформировалось максимальное количество минеральных форм азота в почве. Нитроаммофоска обеспечила дополнительное накопление нитратов до конца июля в пределах 10-15 мг $N\text{-}NO_3$/кг.

Последний раз образцы почвы были отобраны 23 октября 2023 года. В связи с достаточно низкой температурой в октябре, нитрификация была заторможена и запас минеральных форм азота в почве, в основном, формировался за счёт аммонийного азота в пределах 26,78-57,71 мг/кг. При этом разницы между вариантами практически не было. Эта ситуация ещё раз подчёркивает необходимость не оставлять почву после пропашных культур в парующем состоянии на зиму, а засевать её озимыми культурами.

Влияние погодных условий, места расположения поля и антропогенных факторов на продуктивность картофеля. В таблице 3 представлена информация о биологической продуктивности картофеля и об урожайности стандартных клубней за 2 года. Сравнение продуктивности лучше вести по вариантам без внесения удобрений, так как дозы компоста по годам разные. В 2023 году урожайность картофеля в контрольном варианте была на 5 т/га ниже по сравнению с картофелем на аналогичном варианте в 2022 году, однако разница между вариантами с Картофином составила 2,7 т/га.

Компост в оба года обеспечил существенную прибавку общей урожайности картофеля и прибавку стандартных клубней. Так, в 2022 году доза компоста, соответствующая 110 кг азота/га, обеспечила достоверную прибавку общей биологической продуктивности 6,47-7,65 т/га по сравнению с контролем [19]. В 2023 году близкая доза компоста в 120 кг азота/га

способствовала формированию прибавки общей биологической продуктивности на 9,87-14,81 т/га. Минеральное удобрение при аналогичной дозе также обеспечило прибавку 11,87 т/га по сравнению с контролем.

Стоит подчеркнуть, что доза компоста в 120 кг азота/га так же как и аналогичная доза минерального удобрения обеспечили получение приблизительно равного количества общего урожая картофеля: компост – 31,77 т/га, компост + Картофин – 29,03 т/га, нитроаммофоска – 30,52 т/га. Разница между этими значениями не достоверна. Хотя содержание нитратов в почве было максимальным на вариантах с нитроаммофоской.

Следует отметить, что использование препарата Картофин достоверных различий в урожайности картофеля в эти годы не проявило.

Таблица 3. Влияние погодных условий, места расположения полей и антропогенных факторов на продуктивность картофеля

Table 3. Effect of weather conditions, field location and anthropogenic factors on potato productivity

Биопрепарат	Вид и доза удобрений, кг N/га	2022		2023	
		Биологическая урожайность	Стандарт	Биологическая урожайность	Стандарт
0	0	22,07	20,38	16,91	16,38
0	Компост, 60			25,71	24,38
0	Компост, 110	29,72	27,58		
0	Компост, 120			31,77	30,39
Картофин	0	21,85	20,48	19,16	18,27
Картофин	Компост, 60			23,43	21,84
Картофин	Компост, 110	28,32	24,93		
Картофин	Компост, 120			29,03	27,40
0	Мин. удоб. 60			28,78	26,92
0	Мин. удоб. 120			30,52	28,94
$НСР_{0,95}$		3,11	2,93	3,53	2,80

Примечание: Мин. удоб. – минеральное удобрение, нитроаммофоска

Влияние погодных условий, места расположения полей и антропогенных факторов на содержание крахмала и его сбор. В таблице 4 представлены данные по содержанию крахмала в клубнях картофеля и его сбору с урожаем. Очевидно, что в 2022 году в вариантах без компоста было синтезировано и накоплено достаточное высокое содержание крахмала (15,38-16,10 %).

Таблица 4. Влияние погодных условий, места расположения полей и антропогенных факторов на содержание крахмала и его сбор

Table 4. Effect of weather conditions, field location and anthropogenic factors on starch content and starch yield

Биопрепарат	Вид и доза удобрений, кг N/га	2022		2023	
		Крахмал, %	Сбор крахмала, т/га	Крахмал, %	Сбор крахмала, т/га
0	0	19,53	3,55	14,0	2,59
0	Компост, 60	-	-	13,93	3,55
0	Компост, 110	10,43	3,12	-	-
0	Компост, 120	-	-	15,04	4,41

Картофин	0	16,40	3,36	13,01	2,48
Картофин	Компост, 60	-	-	13,33	3,10
Картофин	Компост, 110	14,53	3,74	-	-
Картофин	Компост, 120	-	-	12,60	3,66
0	Мин. удоб. 60	-	-	11,23	3,54
0	Мин. удоб. 120	-	-	12,95	3,98
$НСР_{0,95}$		2,40		1,69	

Примечание: Мин. удоб. – минеральное удобрение, нитроаммофоска

В 2023 году в клубнях с контрольных делянок было накоплено несколько меньшее количество крахмала, несмотря на снижение урожайности.

Использование компоста и удобрений, способствовало некоторому снижению содержания крахмала в клубнях картофеля, однако увеличило его урожайность. Тем не менее, высокие дозы компоста и минеральных удобрений повысили уровень содержания крахмала, приближая и даже превосходя отметку в 4 т крахмала на гектар.

Обсуждение. Проведённые исследования в 2022 и 2023 годах продемонстрировали высокую эффективность технологии органического возделывания картофеля по адаптации к изменениям погодных условий в рассматриваемые годы в условиях Ленинградской области. Учитывая высокий уровень плодородия почвы на опытах, использование компоста обеспечило такую же продуктивность картофеля, как и минеральное удобрений, внесённое в той же дозе по азоту. Максимальная биологическая урожайность при максимальной дозе компоста составила 28,32-29,72 т/га в 2022 году и 29,03-31,77 т/га в 2023 году. Урожайность при аналогичной дозе нитроаммофоски составила 30,52 т/га.

При внесении компоста наблюдалось дополнительное содержание нитратов в почве за счёт больших запасов азота в нем в течение значительных сроков вегетации картофеля. Фактически, компост характеризуется свойством пролонгированного высвобождения питательных веществ, включая азот. Внесение повышенной дозы нитроаммофоски формировало максимальное содержание минеральных форм азота в почве.

Внесение компоста и минеральных удобрений приводило к некоторому снижению концентрации крахмала в клубнях картофеля, однако при этом способствовало повышению его урожайности. Высокие дозы компоста и минеральных удобрений существенно повысили сбор крахмала, приближая и даже превосходя отметку в 4 т крахмала на гектар.

Новый полифункциональный биопрепарат Картофин SC показал высокую биологическую эффективность в отношении подавления заболеваемости и развития комплекса грибковых заболеваний картофеля при его органическом возделывании без аддитивного эффекта с органическим удобрением БИОГУМ [16, 20].

Выводы. Результаты исследований подтвердили эффективность технологии органического возделывания картофеля в 2022 и 2023 году в условиях Ленинградской области. Компост, действуя в комплексе с другими технологическими операциями, в оба года обеспечивал существенную прибавку как общей урожайности картофеля, так и стандартных клубней. Так, в 2022 году при дозе компоста в 110 кг азота/га, общая продуктивность картофеля составила 28,32-29,72 т/га. В 2023 году, при дозе

компоста и минерального удобрения в 120 кг азота/га урожайность картофеля достигла значений в 29,0-31,8 т/га.

В 2023 году в клубнях с контрольных делянок концентрация крахмала была несколько ниже, чем в 2022 году, несмотря на снижение урожайности. Однако, благодаря использованию компоста или минерального удобрения, общий сбор крахмала с урожаем достиг 4 т/га.

Также была подтверждена необходимо выращивания озимых культур после уборки пропашных культур с целью снижения потерь минеральных форм азота за осенне-зимний и ранневесенний периоды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Органика: Укреплять и расширять // Информационный бюллетень Минсельхоза России. 2023. №1 с. 38. URL: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/54c/b746qb5yve6zgnbokrzyseyqfqwi7fm4.pdf

2. Максимов Д.А., Валкама Е., Минин В.Б., Ранта-Корхонен Т., Захаров А.М. Подходы к освоению органического земледелия // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4 (105). С. 101-113. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10270

3. Jennings S.A., Koehler A-K, Nicklin K.J., Deva C. et al. Global potato yields increase under climate change with adaptation and CO_2 fertilisation // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2020. Vol. 4, 519324. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.519324

4. Willer H., Trávníček J., Meier C. and Schlatter B. (Eds.) The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2022. Frick, Switzerland: Research Institute of Organic Agriculture FiBL. 2022. URL: http://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2022.html

5. Goffart J-P., Haverkort A., Storey M. et al. Potato production in Northwestern Europe (Germany, France, the Netherlands, United Kingdom, Belgium): characteristics, issues, challenges and opportunities // Potato Research. 2022. Vol. 65 P. 503-547 https://doi.org/10.1007/s11540-021-09535-8

6. Бутов И.С. Рынок картофеля в России в 2023-2024 годах: тенденции и прогнозы // Картофель и овощи. 2023. № 12. С. 10-11

7. Органическое выращивание овощей. Сб. инф. материалов / Отв. за выпуск Е. Кущева. Белгород: ОГАУ «ИКЦ АПК». 2022. 36 с. URL: http://ikc.belapk.ru/upload/iblock/af9/af95084f625964950da1c9a81015a2e7.pdf

8. Гаспарян И.Н., Левшин А.Г., Ивашова О.Н., Бутузов А.Е., Дыйканова М.Е. Органическая технология возделывания экологически чистого картофеля раннего // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 6(94). С. 14-18. https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-14-18.

9. Нековаль С.Н., Чурикова А.К., Беляева А.В., Маскаленко О.А., Чумаков С.С., Тихонова А.Н. Перспективы производства органической овощной продукции в России // Картофель и овощи. 2018. № 11. С. 14-16. https://doi.org/10.25630/PAV.2018.93.11.002

10. Симаков Е.А., Митюшкин А.В., Журалев А.А., Митюшкин Ал-р. В., Гайзатулин А.С., Салюков С.С., Овечкин С.В., Семенов В.А. Селекция конкурентоспособных сортов картофеля для различного назначения // Картофель и овощи. 2023. № 1. С. 35-40 https://doi.org/10.25630/PAV.2023.49.99.005

11. Шабанов А.Э., Анисимов Б.В., Киселев А.И., Попова Н.П., Долгова Т.И., Малютин О.В. Методическое положение по оценке продуктивности и столовых качеств картофеля (кулинарный тип). М.: ФГБНУ ВНИИКХ. 2017. 20 с.

12. Шабанов А.Э., Жевора С.В., Анисимов Б.В., Киселев А.И. и др. Параметры потенциальной урожайности сортов картофеля селекционного центра ВНИИКХ (справочник). М.: ФГБНУ ВНИИКХ. 2016. 13 с.

13. Минин В.Б., Захаров А.М., Мельников С.П., Васильев М.А. Продуктивность и качество картофеля, возделываемого по биологизированной технологии в условиях Ленинградской области // АгроЭкоИнженерия. 2021. №3(108). С. 51-66. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-51-65

14. Novikova I.I., Minin V.B., Titova J.A., Zakharov A.M, Krasnobaeva I.L., Murzaev E.A. The use of new polyfunctional biologics and compost to achieve a competitive yield of organic potatoes in the conditions of the North-West region of Russia // Plants. 2022. Vol.11 (7), 962 https://doi.org/10.3390/plants11070962

15. Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., Vasilev E. Method of designing of manure utilization technology // Agronomy Research. 2017. Vol. 15(3). P. 658-663. URL: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/05/Vol15Nr3_Briukhanov.pdf.

16. Перекопский А.Н., Захаров А.М. Варианты внесения органических удобрений в биологизированном севообороте // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020. № 18. С. 61-63. https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-18-61-63

17. Юнин В.А., Захаров А.М., Кузнецов Н.Н., Слизков А.М., Зыков А.В. Способ и техническое средство для локального внесения твердых органических удобрений при посадке картофеля // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4 (105). С. 62-79. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10267

18. Sahrawat K. L. Factors affecting nitrification in soils // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2008. Vol. 39. P. 1436-1446 https://doi.org/10.1080/00103620802004235

19. Мельников С.П., Минин В.Б., Черникова М.В. Зависимость продуктивности картофеля от антропогенных субсидий и погодных условий // Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики. Материалы межд. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава, посвященной 190-летию со дня рождения И.А. Стебута (23-24 мая 2023 г.). СПб.: СПбГАУ. 2023. С. 18-21. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54170285

20. Novikova I.I., Titova J.A., Krasnobaeva I.L., Minin V.B., Zaharov A.M., Perekopsky A.N. Biological effectiveness of a new multifunctional biopesticide in the protection of organic potatoes from diseases // Agronomy Research. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 1617-1626. https://doi.org/10.15159/AR.21.135

REFERENCES

1. Organics: Strengthen and expand. Informatsionnyi byulleten' Minsel'khoza Rossii = Information Bulletin of the Russian Ministry of Agriculture. 2023; 1: 38 (In Russ.) URL: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/54c/b746qb5yve6zgnbokrzyseyqfqwi7fm4.pdf

2. Maksimov D.A., Valkama E., Minin V.B, Ranta-Korhonen T., Zakharov A.M. Approaches to harnessing organic agriculture. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2020; 4 (105):101-113 (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10270

3. Jennings S.A., Koehler A-K, Nicklin K.J., Deva C. et al. Global potato yields increase under climate change with adaptation and CO_2 fertilisation. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2020; 4, 519324. (In Eng.) https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.519324

4. Willer H., Trávníček J., Meier C. and Schlatter B. (Eds.) The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2022. Frick, Switzerland: Research Institute of Organic Agriculture FiBL. 2022. URL: http://www.organic-world.net/yearbook/yearbook-2022.html

5. Goffart, J-P., Haverkort, A., Storey, M. et al. Potato production in Northwestern Europe (Germany, France, the Netherlands, United Kingdom, Belgium): characteristics, issues, challenges and opportunities. Potato Research. 2022;65:503-547 (In Eng.) https://doi.org/10.1007/s11540-021-09535-8

6. Butov I.S. Potato market in Russia in 2023-2024: trends and forecasts. Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables. 2023; 12:10-11 (In Russ.)

7. Organic Cultivation of Vegetables. Coll. Inf. Materials / Responsible for the issue E. Kushcheva. Belgorod: Information and Advisory Center of Agro-Industrial Complex. 2022. 36 p. (In Russ.) URL: http://ikc.belapk.ru/upload/iblock/af9/af95084f625964950da1c9a81015a2e7.pdf

8. Gasparyan I.N., Levshin A.G., Ivashova O.N., Butuzov A.Ye., Dyikanova M.Ye. Organic cultivation technology of ecologically pure potatoes of early varieties. Vestnik FGOU VPO «MGAU imeni V.P. Goryachkina» = Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University. 2019; 6(94): 14-18. (In Russ.) https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-14-18

9. Nekoval S.N., Churikova A.K., Belyaeva A.V., Maskalenko O.A., Chumakov S.S., Tikhonova A.N. Prospects for the production of organic products in Russia. Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables. 2018;11: 14-16. (In Russ.) https://doi.org/10.25630/PAV.2018.93.11.002

10. Simakov E.A., Mityushkin A.V., Zhuravlev A.A., Mityushkin Al-r V., Gaizatulin A.S., Salyukov S.S., Ovechkin S.V., Semenov V.A. Selection of competitive potato varieties for various purposes. Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables. 2023; 1: 35-40 (In Russ.) https://doi.org/10.25630/PAV.2023.49.99.005

11. Shabanov A.E., Anisimov B.V., Kiselev A.I., Popova N.P., Dolgova T.I., Malyutin O.V. Methodological regulation for assessing the productivity and table qualities of potatoes (culinary type). Moscow: FGBNU VNIIKH. 2017. 20 p. (In Russ.)

12. Shabanov A.E., Zhevora S.V., Anisimov B.V., Kiselev A.I. et al. Parameters of potential yield of potato varieties of VNIIKh breeding center (reference book). Moscow: FGBNU VNIIKH. 2016. 13 p. (In Russ.)

13. Minin V.B., Zakharov A.M., Melnikov S.P., Vasilev M. A. Yielding capacity and quality of potato cultivated by biology-based technology in the conditions of the Leningrad Region. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2021;3 (108): 51-66 (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-51-65

14. Novikova I.I., Minin V.B., Titova J.A., Zakharov A.M, Krasnobaeva I.L., Murzaev E.A. The use of new polyfunctional biologics and compost to achieve a competitive yield of organic potatoes in the conditions of the North-West region of Russia. Plants. 2022;11 (7), 962 (In Eng.) https://doi.org/10.3390/plants11070962

15. Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., Vasilev E. Method of designing of manure utilization technology. Agronomy Research. 2017; 15(3): 658-663. (In Eng.) URL: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/05/Vol15Nr3_Briukhanov.pdf

16. Perekopskiy A.N., Zakharov A.M. Options for the application of organic fertilizers in a biologized crop rotation. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020;18: 61-63.(In Russ.) https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-18-61-63

17. Yunin V.A., Kuznetsov N.N., Zakharov A.M., Slizkov A.M., Zykov A.V. Method and device for local application of solid organic fertilisers in potato planting. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2020; 4 (105): 62-79 (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10267

18. Sahrawat K. L. Factors affecting nitrification in soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2008; 39: 1436-1446 (In Eng.) https://doi.org/10.1080/00103620802004235

19. Melnikov S.P., Minin V.B., Chernikova M.V. Dependence of potato productivity on anthropogenic subsidies and weather conditions. In: Priorities of development of agroindustrial complex in the conditions of digitalization and structural changes in the national economy. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. of teaching staff devoted to the 190th anniversary of I.A. Stebut (May 23-24, 2023). Saint Petersburg: SPbGAU. 2023: 18-21. (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54170285

20. Novikova I.I., Titova J.A., Krasnobaeva I.L., Minin V.B., Zaharov A.M., Perekopsky A.N. Biological effectiveness of a new multifunctional biopesticide in the protection of organic potatoes from diseases. Agronomy Research. 2021; 19 (3): 1617-1626 (In Eng.) https://doi.org/10.15159/AR.21.135

Об авторах	**About the authors**
Минин Владислав Борисович, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское ш. 3 minin.iamfe@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-5207-8921	**Vladislav B. Minin**, Cand. Sc. (Agriculture), senior researcher, the Department of Agroecology in Plant Production, the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia minin.iamfe@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-5207-8921
Черникова Марина Владимировна, Заведующая сектором «Аналитические методы инженерной экологии» Отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское ш. 3 laboratorychm@yandex.ru	**Marina V. Chernikova** Head of the Sector “Analytical Methods of Engineering Ecology”, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems**,** the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia laboratorychm@yandex.ru
Заявленный вклад авторов М.В. Черникова – сбор, анализ и обобщение литературных данных, создание черновика рукописи, оформление окончательного варианта рукописи. В.Б. Минин – руководство исследованием, формальный анализ, концептуализация, редактирование.	**Authors’contribution** M.V. Chernikova – collection, analysis and synthesis of literary data, creation of a draft manuscript, design of the final version of the manuscript. V.B. Minin – research supervision, formal analysis, conceptualization, editing.

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 13.12.2023	**Received:** 13.12.2023
Одобрена после рецензирования: 22.12.2023	**Approved after reviewing:** 22.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 631.3 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

Артем Сергеевич Угловский[1]✉, Наталья Юрьевна Семеренко[2]

[1,2]Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

[1]a.uglovskii@yarcx.ru, https: //orchid 0000-0002-5678-4786
[2]semerenko@yarcx.ru

Аннотация. Современные тенденции сельскохозяйственного производства предполагают всё более широкое использование элементов точного земледелия, основанных на применении геоинформационных систем (ГИС) и специальных роботизированных устройств. Роботизированные устройства (агроботы) в последнее время начинают применять как для обследования сельскохозяйственных полей, так и для выполнения технологических операций при возделывании сельскохозяйственных культур. Особенности условий функционирование таких устройств в поле затрудняют создание алгоритмов управления ими. Разработка математических моделей для формирования траектории и планирования пути движения является важной задачей в области управления мобильными роботами. Определение точного местоположения робота играет ключевую роль в обеспечении быстрого и плавного отслеживания перемещений. Цель работы – создать имитационную модель автономного четырехколесного мобильного робота, который способен выполнять полевые исследования почвы или посевов. Разработка выполнена в программном обеспечении Simulink с помощью пакета поддержки для Arduino и Raspberry PI.

Смоделирован алгоритм движения агроробота к определенным точкам маршрута, в которых проводятся необходимые измерения. Это позволит предварительно оценить эффективность предлагаемого алгоритма управления и провести необходимую оптимизацию. Моделированием определяется необходимое техническое оснащение мобильного робота. Для оценки положения и ориентации робота на поле необходимо оснастить его GPS-модулем и гироскопом, которые не только помогут точно определить место его нахождения, но и повысят точность производимых измерений. В статье описываются преимущества данного мобильного робота, а также различные виды задач, которые он может выполнять согласно имитационной модели. Предложены типы применяемых плат для обработки различного вида информации, необходимой при выполнении полевых работ и управления движением мобильного робота. Предложенная модель может быть модифицирована для включения любой другой стратегии управления или кинематики в зависимости от конкретных требований и решаемых задач. Полученные результаты эксперимента движения робота по указанным траекториям достаточно хорошо согласуются с заданными параметрами в основных блоках имитационной модели. В процессе разработки были выявлены сферы применения и пути дальнейшего развития наземного роботизированного комплекса.

***Ключевые слова*:** точное земледелие, мобильный сельскохозяйственный робот, шаговый двигатель, GPS-модуль, имитационная модель

Для цитирования: Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Моделирование работы мобильного робота для обоснования его функциональных параметров и алгоритма управления // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 57-72 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71

Research article
Universal Decimal Code 631.3

SIMULATION OF THE OPERATION OF A MOBILE ROBOT TO JUSTIFY ITS FUNCTIONAL PARAMETERS AND CONTROL ALGORITHMS

Artem S. Uglovsky[1], Natalia Yu. Semerenko[2]

[1,2]Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

[1]a.uglovskii@yarcx.ru, https: //orcid 0000-0002-5678-4786;
[2]semerenko@yarcx.ru

Abstract. Modern farming trends imply a wider use of precision farming elements based on application of GIS and special robotic devices. Recently, agro-robots come into use for both farm field survey and technological operations in crop growing. The specific features of their field operation environment make the design of their control algorithms more effortful. Creation of mathematical models for trajectory formation and path planning is an important task in the mobile robot control. The robot positioning plays a key role in providing fast and smooth movement tracking. The study aimed to design a simulation model of an autonomous four-wheeled mobile robot for field surveys of soil or crops. Simulink software with the support package for Arduino and Raspberry PI was applied. The study modelled the travelling algorithm of the agro-robot to specific

waypoints for required measurements. This allowed for preliminary estimates of the control algorithm efficiency and required optimization. Modeling determines the required equipment for the mobile robot. GPS module and a gyroscope help to detect the field position and orientation of the robot for both determining its exact location and increasing the measurement accuracy. The paper describes the advantages of the robot and different types of tasks it can perform according to the simulation model. The study identified the board types used for various information processing in the fieldwork and controlling the mobile robot travelling. The created model can be modified to incorporate any other control strategy or kinematics depending on the specific requirements and tasks to be performed. The obtained experimental results of the robot travelling along the designated trajectories agree well with the set out parameters in the main blocks of the simulation model. The study identified the application spheres and improvement paths of the ground robotic complex.

Key words: precision farming, mobile agricultural robot, step motor, GPS-module, simulation model

For citation: Uglovsky A.S., Semerenko N. Yu. Simulation of the operation of a mobile robot to justify its functional parameters and control algorithms. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 57-72 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71

Введение. Перед сельскохозяйственным производством остро стоит задача обеспечения увеличивающегося числа жителей планеты продуктами питания, а сельскохозяйственных животных кормами. Этого возможно достичь путем наращивания эффективности производства, повышения урожайности возделываемых культур, снижения энергетических и трудовых затрат. Для решения этих задач сельскохозяйственным товаропроизводителям необходима точная информация о росте и состоянии возделываемых культур в течение вегетационного периода [1, 2]. Существующие в настоящее время подходы к мониторингу состояния растений предполагают использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Однако они не могут обеспечить получение достаточной информации из-под закрытой листовой поверхностью части посевов [3]. Попытки использовать наземный мониторинг были ограничены необходимостью наличия дополнительной инфраструктуры, такой как прокладка кабелей или радиомаяки.

Мобильный робот способен передвигаться автономно по полю, сканировать растения и выполнять требуемые измерения. Он оснащен необходимыми сенсорами и инструментами, которые позволяют получать данные о влажности почвы, содержании в ней питательных элементов, наличии вредителей и болезней, а также о росте и развитии растений. Полученные данные передаются в общую базу данных, где они обрабатываются и анализируются. Владельцы робота могут получать доступ к этой информации через интерфейс пользователя, где они могут увидеть текущее состояние растений и урожайность культуры [4-7].

Получение подробной и периодической информации о состоянии культур позволяет производителям прогнозировать урожайность более точно и своевременно принимать решения по оптимизации процесса выращивания. Они получают возможность вовремя реагировать на проблемы, такие как

вредители, болезни, сорняки или недостаточное питание с целью минимизации потерь и повышения урожайности [8].

Таким образом, мобильный робот автоматизирует сбор данных о состоянии и урожайности растений на значительных территориях, предоставляя производителям ценную информацию, необходимую для эффективного управления и оптимизации технологий возделывания культур [1, 9, 10].

Цель исследования. Цель работы – создать имитационную модель автономного четырехколесного мобильного робота, который способен выполнять полевые исследования почвы или посевов.

Материалы и методы исследований. Главный алгоритм управления реализован в среде Simulink. Цель алгоритма - управление физической моделью мобильной платформы, которая принимает и выполняет следующие команды: перемещение, поворот, сбор информации об урожае на полях в виде снимков, диагностика степени поражения растений болезнями или вредителями, определение наличия сорных растений.

Для разработки физической модели мобильного робота использованы следующие комплектующие:

1) Плата Arduino Due, Программируемый контроллер на базе AT91SAM3X8E. Именно на этой карте реализован алгоритм работы робота. Плата Arduino DUE отвечает за навигацию и стратегию перемещения по объектам. Она оснащена дочерней платой для силовой части двигателя: Драйвер моторов двухканальный DFRobot для Arduino на L298P v1.2 4,8-35В 2А.

Для навигации и обработки данных в реальном времени необходим микропроцессор. Вычислительная мощность микропроцессоров одноплатных компьютеров, таких как Raspberry Pi 3, обычно ограничена, но все же может быть подходящей для приложений с минимальной или умеренной автономностью или чувствительностью.

2) Плата Raspberry Pi 3 Model B, Одноплатный компьютер на базе процессора Broadcom BCM2837 с Wi-Fi и Bluetooth.

По потоку изображений с подключенной камеры эта карта определяет наличие или отсутствие одного, или нескольких объектов в поле ее зрения. Они обозначены цветными маркерами на земле.

После вычислений он определяет расстояние в сантиметрах и угол (0° спереди, положительный угол слева и отрицательный угол справа) обнаруженных объектов. Затем эта информация отправляется на плату Arduino по I²C.

3) Веб-камера Microsoft LifeCam Cinema HD. Она подключается напрямую к Raspberry Pi в части машинного зрения.

4) Шаговый двигатель 57CSTH009-06BAG30 с интегрированным редуктором.

5) Аккумулятор емкостью 10000 мАч, аккумуляторная батарея ROBITON.

6) Сканирующий оптический дальномер (лидар) LD19.

Для обнаружения света и измерения дальности используется импульсный лазер для измерения расстояний с очень высоким разрешением с минимальным шумом по сравнению со стереодатчиками и датчиками ToF-камер. Хотя эти датчики могут фиксировать объекты в очень мелких деталях, они требуют точного знания положения датчика и значительно дороже, чем другие методы дистанционного зондирования. Обратная связь с датчиками выражается в плотных облаках точек и может генерировать

огромные объемы данных, которые сложно абстрагировать до полезных функций [11, 12].

7) Датчик определения курса и месторасположения AH200C.

8) GPS-модуль NEO-6M.

Данные от нескольких датчиков можно объединить, чтобы получить точное положение и ориентацию робота во время его перемещения по полю. Если доступны точные координаты посадки, можно установить пути через ряды. В противном случае роботом можно управлять вручную, одновременно собирая данные GPS для определения путевых точек. Если робот перемещается, не полагаясь на какое-то предполагаемое расположение объекта, и/или при его следовании по заранее определенному маршруту требуется точность на уровне сантиметра, тогда необходима точность кинематического GPS (RTK) реального времени [13].

10) Датчик влажности почвы

С применением бесконтактного датчика влажности почвы можно строить карты влажности почвы и автоматически выбирать наиболее оптимальные места отбора проб.

11) Инфракрасная камера PYTHON2000 2 МП.

Количественная диагностика степени поражения растений болезнью – одно из важных направлений гиперспектральных исследований. Основными критериями оценки серьезности заболевания являются интенсивность и распространенность поражения.

Предлагаемая система позволит получать видео изображения состояния растений на полях и с их помощью выявлять болезни, оценивать урожайность, принимать требуемые превентивные решения и помогать сельскохозяйственным товаропроизводителям выбирать оптимальное время для уборки урожая [3]. Анализ 18 конкретных примеров показал, что в определенных обстоятельствах использование автономных роботов в сельском хозяйстве экономически оправдано [14].

Результаты. Для составления имитационной модели рассмотрим кинематическую модель четырехколесного полноприводного робота (рис. 1), имеющего наиболее широкое применение для нужд сельского хозяйства. Блок-схема алгоритма обхода препятствий таким роботом представлена на рис. 2.

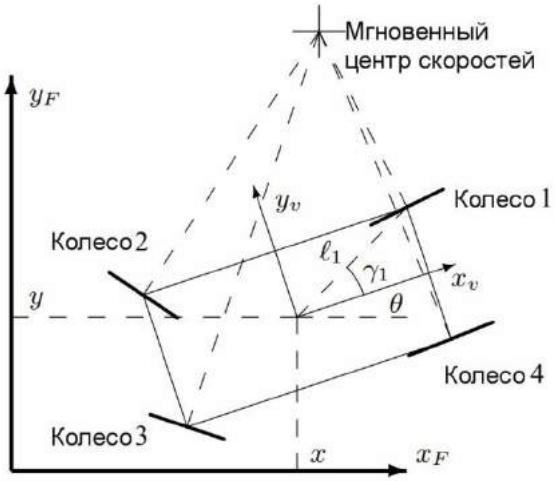


Рис. 1. Определение системы координат поля (x_F, y_F), системы координат мобильного робота (x_v, y_v), ориентации транспортного средства θ, расстояния l_1 и направления γ_1 от центра масс (x, y) к колесу 1. Каждая плоскость колеса перпендикулярна мгновенному центру скоростей

Fig. 1. Determination of the field coordinate system (x_F, y_F), the mobile robot coordinate system (x_v, y_v), the vehicle orientation θ, the distance l_1 and the direction γ_1 from the center of mass (x, y) to the wheel 1. Each wheel plane is perpendicular to the instantaneous center of velocity

Кинематическая модель сельскохозяйственного робота в основном

описывает взаимосвязь между его направлением движения и скоростью и интуитивно преобразует задачу движения в математическую задачу:

$$\dot{y}cos\,\gamma_1 - \dot{x}sin\theta = 0, \qquad (1)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}cos\theta & 0\\ sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ w\end{bmatrix}, \qquad (2)$$

Формула (3) представляет собой условие ограничения при движении робота, а формула (4) представляет собой кинематическую модель робота.

При движении сельскохозяйственного робота существует определенная связь между линейной скоростью v и угловой скоростью ω, следовательно

$$\begin{bmatrix}v_l\\ v_r\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{1}{R} & \frac{L}{2R}\\ \frac{1}{R} & -\frac{L}{2R}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ w\end{bmatrix}, \qquad (3)$$

На основе приведенных выше формул кинематическую модель сельскохозяйственного робота можно получить как

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \gamma_1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{R}{2}cos\theta & \frac{R}{2}cos\theta\\ \frac{R}{2}sin\theta & \frac{R}{2}sin\theta\\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_l\\ v_r\end{bmatrix}, \qquad (4)$$

где R – мгновенный радиус кривизны траектории робота относительно средней точки оси, L – расстояние между колесами

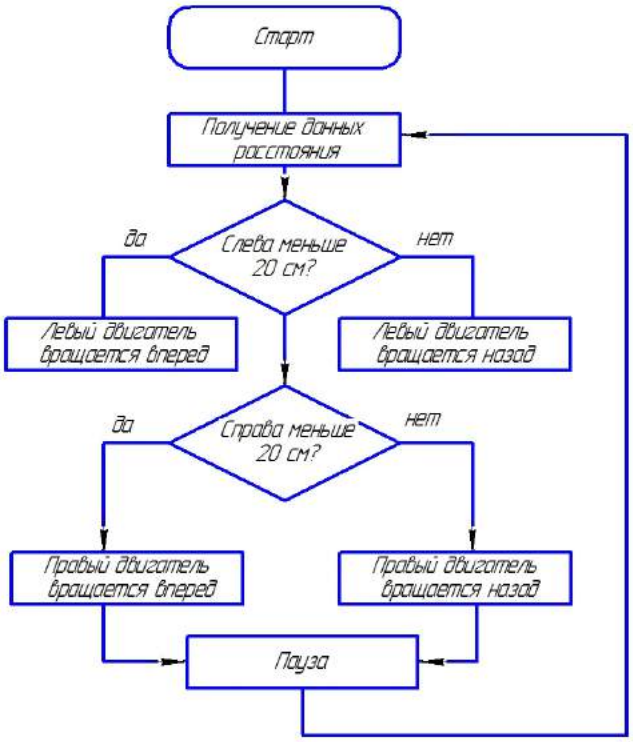


Рис. 2. Блок-схема алгоритма для обхода препятствий
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for obstacle avoidance

Блок-схема на рисунке 2 описывает следующий цикл.

1. Блок «Старт» переходит в блок «Получение данных расстояния», где робот получает данные о расстоянии от каждого датчика.

2. Сначала ориентируемся на результат измерения левого датчика. Расстояние до объекта составляет больше или меньше 20 см (допустимое расстояние для продолжения движения).

а) Если меньше, необходимо, чтобы левый двигатель начал вращаться в обратном направлении, благодаря чему робот осуществит поворот и обойдет препятствие.

б) Если больше, направление вращения не изменится.

3. Теперь проверяем правый датчик расстояния. Согласно его данным, расстояние до объекта составляет больше или меньше 20 см. Если больше, то направление вращения правого двигателя не меняется, если расстояние до объекта меньше 20 см, то вращение двигателя меняется на обратное.

4. Затем программа делает паузу, и цикл повторяется.

Визуальная навигация на основе платы Raspberry Pi 3 Model B заключается в сравнении текущего изображения с видеокамеры с ранее запомненными изображениями, сохраненными на карте местности. При таком сравнении производится коррекция угла ориентации робота, а также в некоторых случаях, координат x, y робота.

На рисунке 3 показана имитационная модель системы мобильного робота, разработанной в среде Matlab/Simulink. Она включает в себя программу, которая будет запускаться на роботе.

Данные формулы (4) заносятся в блок («модель робота») (рис. 3).

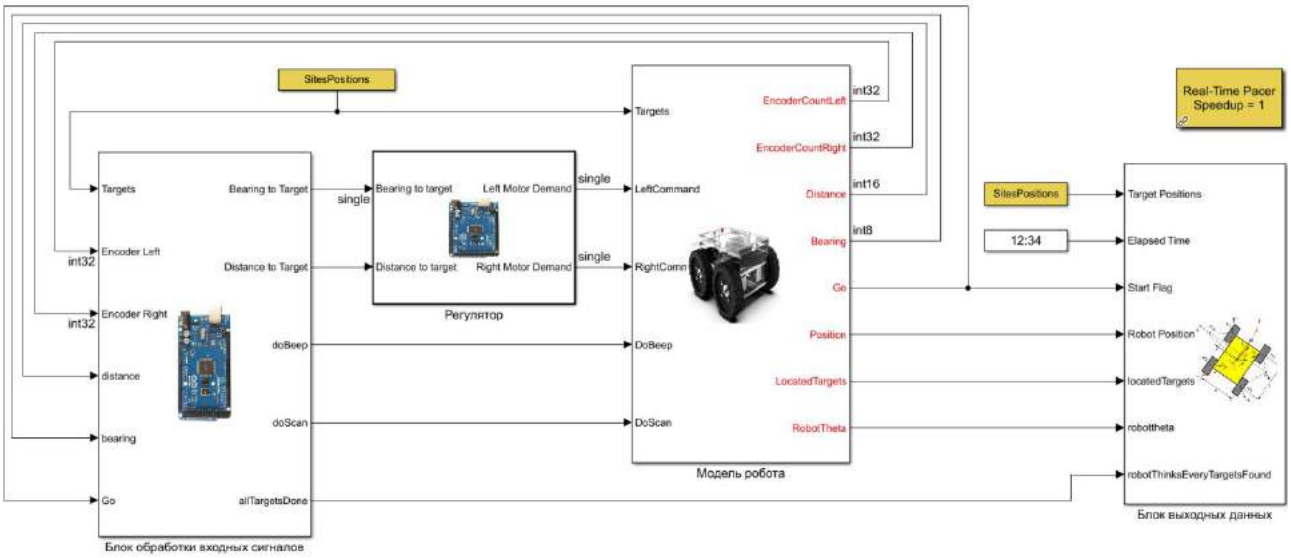


Рис.3. Имитационная модель мобильного робота, разработанная в среде Matlab/Simulink

Figure 3. Simulation model of the mobile robot developed in Matlab/Simulink environment

Данная модель состоит из 3 основных частей:

1. Блок обработки входных сигналов реализует стратегию движения робота. Учитывая предполагаемое положение робота и информацию с камеры, этот блок дает возможность принять решение о направлении и расстоянии, которое пройдет робот. Данный блок имеет непосредственную связь с платой

Raspberry Pi 3 Model B и подключения оборудования для машинного зрения.

2. Блок (Регулятор) позволяет управлять двигателями робота и, следовательно, его движением. Изменение этого параметра может заставить робота двигаться вперед или поворачиваться быстрее. Данный блок имеет непосредственную связь с платой Arduino Due и подключение оборудования для управления ходовой системой мобильного робота.

3. Остальные блоки соответствуют среде моделирования и физическому моделированию робота.

Блок модели мобильного робота показан на рисунке 4, который включает в себя блок динамики двигателя, блок считывания с двух энкодеров скорости вращения колес, блок позиции робота по координатам XY, блок включения камеры и обработки изображений.

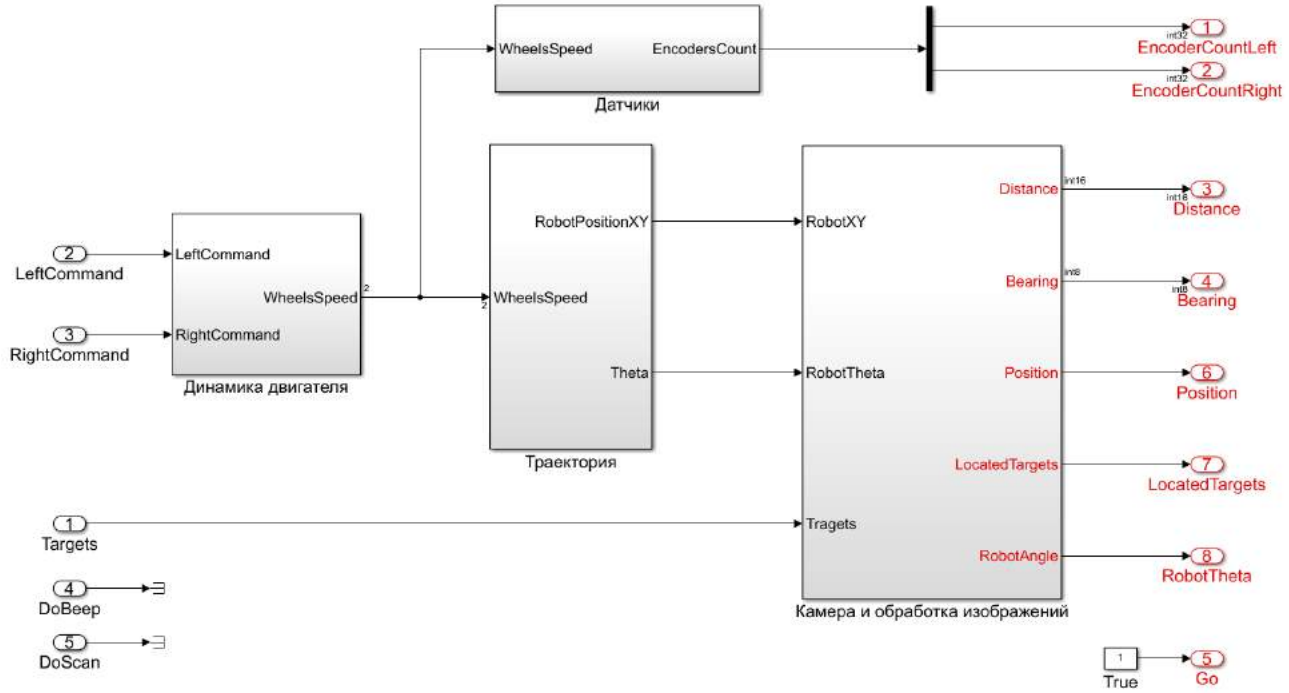


Рис.4. Блок модели мобильного робота

Fig. 4. Block of the mobile robot model

При выполнении моделирования мобильного робота как показано на открывается окно отслеживания рисунке 5.

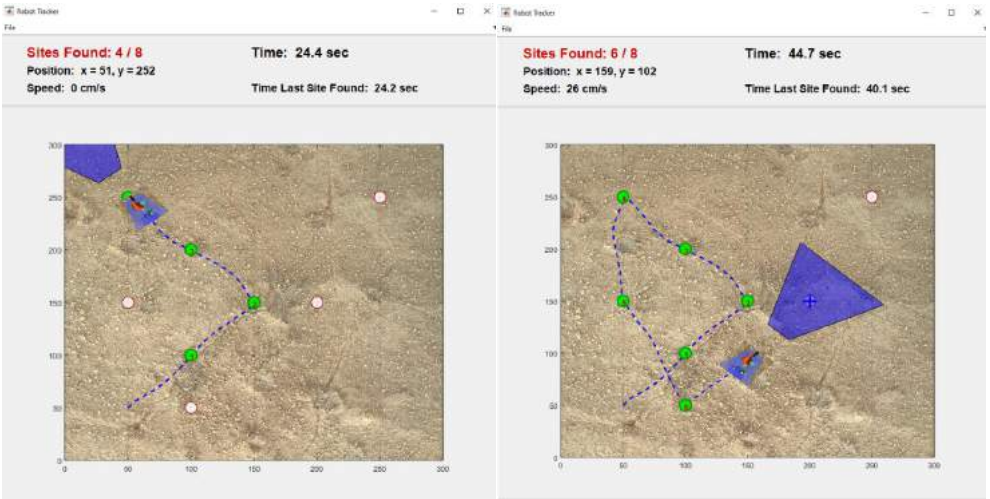


Рис.5. Симуляция движения мобильного робота

Fig. 5. Simulation of mobile robot travelling

На рисунке 5 можно наблюдать имитацию перемещения робота:

1. Места обхода робота по полю.

2. Поле зрения камеры робота представлено «синим» четырехугольником. Объект(ы) в поле зрения робота будут обнаружены.

3. Траектория движения робота представлена «синими» пунктирными линиями.

4. В этом окне также отображается время передвижения мобильного робота.

«Синий» четырехугольник описывает область, «видимую» камерой робота. Когда робот правильно зафиксировал области, они становятся в окне симуляции «зелеными».

Для оптимизации модели доступно несколько вариантов:

– можно посещать точки в выбранном порядке, например, чтобы сократить расстояние, которое придется пройти роботу.
– либо можно изменить параметры управления роботом, например, его скорость, или принять решение изменить предложенную стратегию.

На рисунке 6 показана модель регулятора мобильного робота, которая отвечает за управление его скоростью. С помощью данной модели, сняв необходимые характеристики с блока выходных данных, можно настроить регулятор по каждому из каналов управления, воспользовавшись одной из методик выбора оптимальных параметров. Введя в настроенный регулятор усиление рулевого управления и скорости, осуществив совместную симуляцию, получим следующие переходные процессы перемещения мобильного робота (рис. 7).

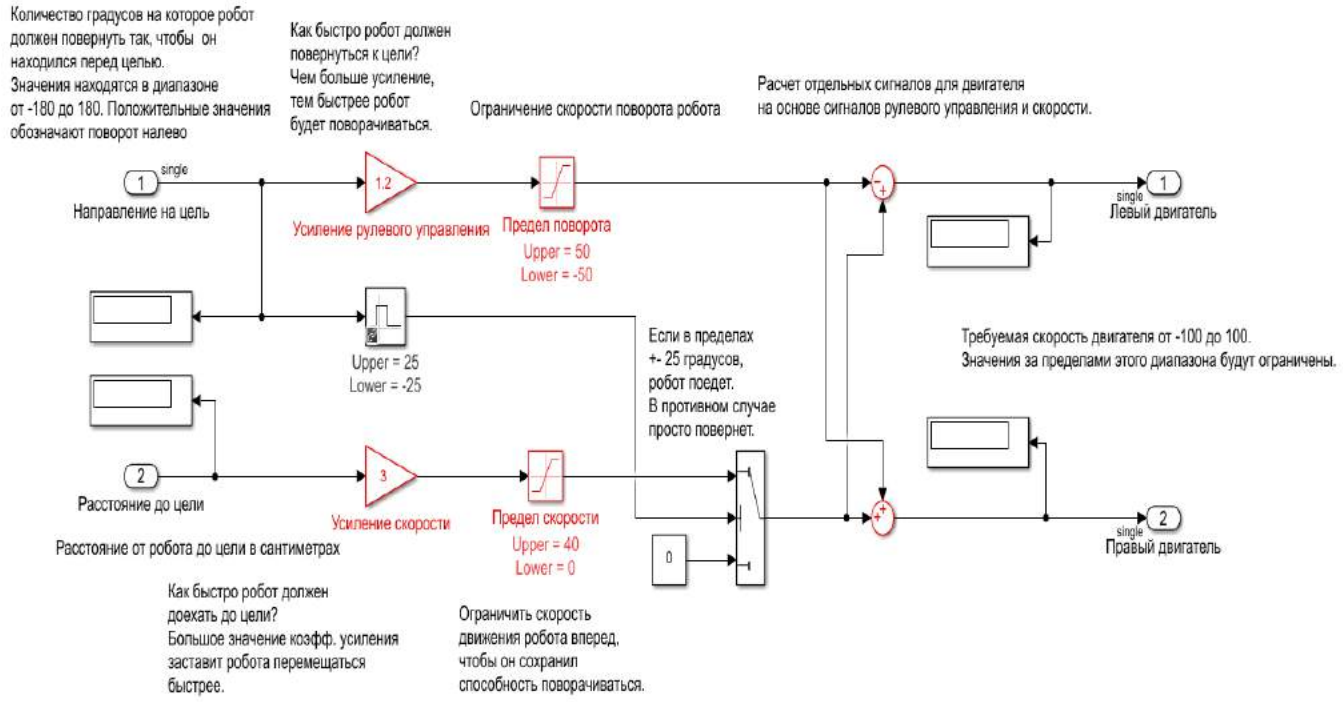


Рис. 6. Модель регулятора мобильного робота
Fig. 6. Model of the mobile robot controller

Ежедневно робот должен обходить ранее выстроенную траекторию для фиксации подробных данных об урожае, что позволит ему точно прогнозировать урожайность и состояние растений.

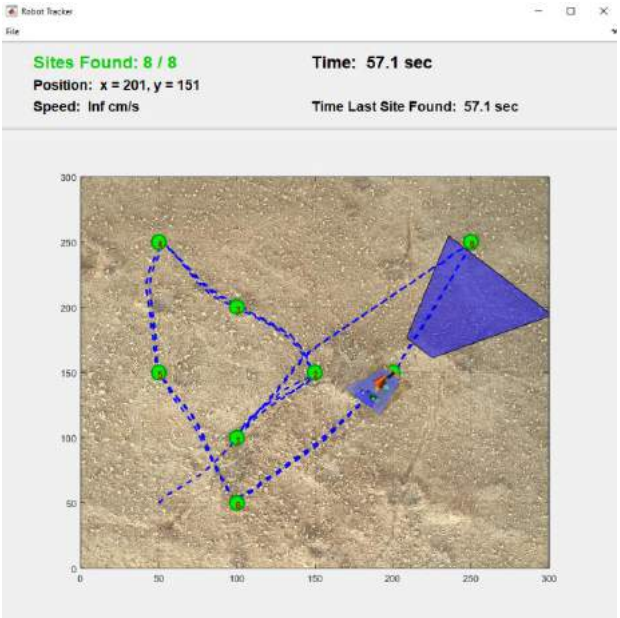


Рис.7. Прохождение мобильного робота по ранее выстроенной им траектории
Fig. 7. Travelling of the mobile robot along the previously plotted trajectory

Также результатами моделирования являются данные об изменении позиции мобильного робота (рис. 8).

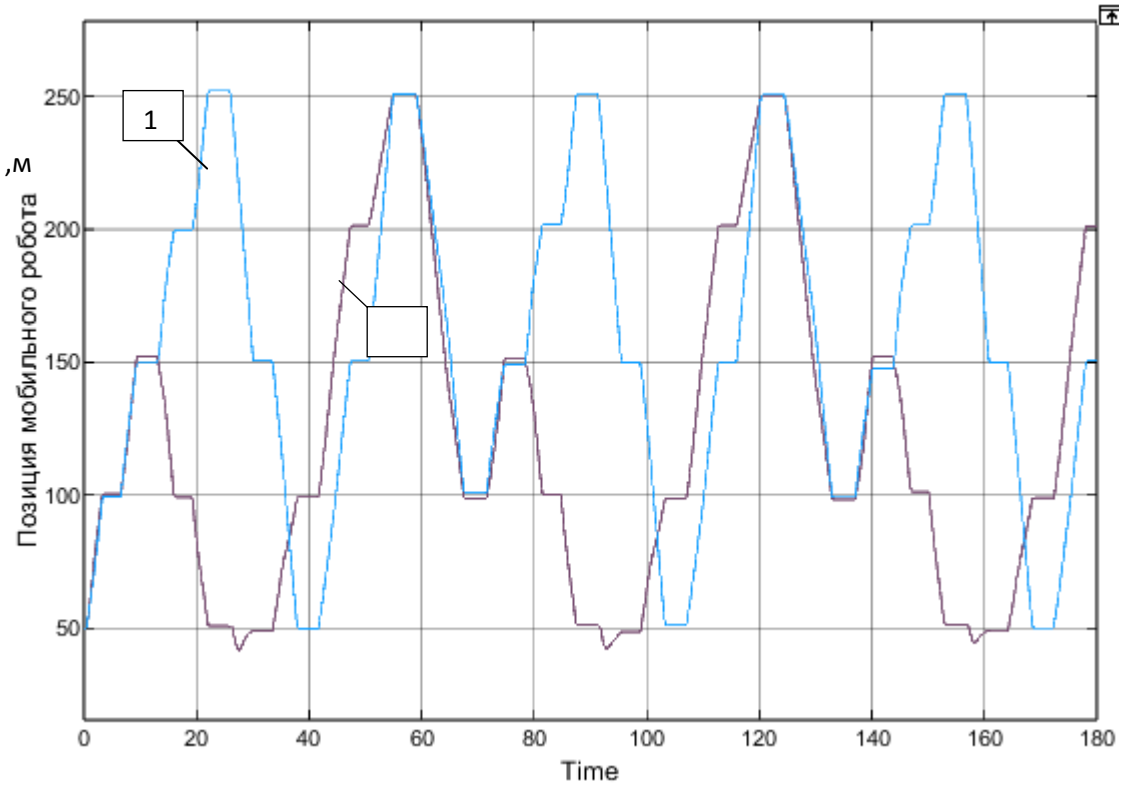


Рис. 8. Изменение основных параметров мобильного робота при прохождении заданной траектории (1 – правый двигатель, 2 – левый двигатель)
Fig. 8. Changes in the main parameters of the mobile robot when travelling along a given trajectory (1 – right motor, 2 – left motor)

Обсуждение. Таким образом, алгоритм успешно реализован в соответствии с его концепцией и позволяет моделировать траекторию мобильного робота. В результате эксперимента, судя по периодичности форм сигналов (0-72 сек, 72-138 сек), робот отклонился от курса всего на 1 градус, что является приемлемой погрешностью. Изучив результаты эксперимента, можно сделать вывод, что данный алгоритм, с некоторыми модификациями, может быть применен для работы с роботами различных размеров, а также на поле прямоугольной формы.

Ряд исследователей изучают системы технического зрения мобильного робота, основанные на использовании видеокамеры для оценки расстояния до объекта [6,8,9]. В данной работе предложены блок-схема алгоритма для обхода препятствий (рис. 2) и имитационная модель (рис. 3), которая выполняет реализацию движения мобильного робота. Для ситуаций возможного столкновения реализована стратегия, обеспечивающая безопасное движение робота по визуальной навигации и с наличием дальномеров. В зависимости от сложившейся ситуации реализуются различные алгоритмы поведения робота. Предложенный метод обеспечивает безопасное перемещение робота в целевую точку.

Дальнейшие улучшения предложенного метода будут включать определение промежуточной точки при объезде статических препятствий с учетом прогноза изменения их расположения на интервале.

Подобный подход к имитационному моделированию позволяет проверить ходовые качества будущего устройства ещё на стадии проектирования и учесть основные недостатки модели. Дальнейшее развитие модели и подходов к моделированию позволит оценивать значительно большее число параметров мобильного робота.

Выводы. 1. Представлена имитационная модель мобильного робота, выполненная в программной среде Matlab/Simulink Simulink. Моделированием установлена возможность использования микроконтроллеров Arduino и Raspberry PI для управления движением мобильного сельскохозяйственного робота по заданной траектории, а также для контроля в процессе его работы координат и угла поворота по обратной связи. Представлено описание подсистем мобильного робота и их взаимодействие. При смоделированной периодичности сигналов управления от 0 до 72 сек и от 72 до 138 сек установлено, что отклонения от заданного направления движения не превышают 1 градуса. Это является достаточным для использования агроробота на операциях по обследованию сельскохозяйственных полей, а при дальнейшей доработке и дооснащении и при выполнении отдельных технологических операций.

2. Моделированием определена достаточная конфигурация мобильного робота, дополнительно к микроконтроллерам, состоящего из блока динамики двигателя, блока считывания данных с двух энкодеров скорости вращения колес, блока позиции робота по координатам XY, блока включения видеокамеры и обработки изображений с неё.

3. Представлена блок-схема алгоритма для обхода препятствий мобильным роботом. Алгоритм управления движением робота позволяет

по мере приближения к препятствию снижать частоту вращения двигателя, и при дальнейшем приближении включать двигатель на вращение в обратную сторону для исключения контакта с препятствием или иным объектом. Основываясь на значении временной задержки, условия реверсивного вращения двигателя и разворота задним ходом, можно управлять роботом эффективнее. Временная задержка дает роботу время на принятие решения, а временной фактор отвечает, на каком расстоянии от объекта необходимо повернуть.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Perekopskiy A., Smelik V., Zakharov A. Prerequisites and effectiveness of the introduction of precision farming elements in the sowing of grain crops in the Leningrad region // BIO Web of Conferences. 2023. Vol. 67, 02015. https://doi.org/10.1051/bioconf/20236702015

2. Смелик В.А., Цыганова Н.А., Теплинский И.З. Внесение минеральных удобрений в точном земледелии // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2012. № 3. С. 38-40. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17721195

3. Сутугина И.М., Смелик В.А. Информационное обеспечение кадастра недвижимости и точного земледелия по материалам аэрофотосъемки. СПб.: СПбГАУ. 2016. 198 с.

4. Абросимов В.К., Райков А.Н. Агропромышленные роботы и искусственный интеллект // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022): Труды Пятнадцатой международной конференции, Москва, 26-28 сентября 2022 г. / Под общей ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2022. С. 329-335. https://doi.org/10.25728/mlsd.2022.0329.

5. Диченский А.В., Гриц Н.В., Удотов А.Ю. Аспекты применения роботизированной техники в аграрном производстве – современное состояние и перспективы // Известия Международной академии аграрного образования. 2020. № 50. С. 15-19.

6. Zhiqiang C., Duzhesheng L., Krasnov A. Yu., Yanyu L. Trajectory tracking control for mobile robots with adaptive gain // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023. Vol. 23 (5). P. 904-910 https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-904-910

7.Романенкова М.С., Балабанов В.И. Применение цифровых технологий в растениеводстве // Наука в центральной России. 2020. № 2(44). С. 74-82. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-2-74-82

8. Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. №15(4). С. 35-41. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41

9. Бобырь, М. В., Кулабухов С. А., Архипов А. Е. Способ очувствления мобильного робота с использованием системы стереозрения для управления мобильным роботом // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации – Распознавание-2018: Сб. матер. XIV межд. науч.-техн. конф. (Курск, 25-28 сентября 2018 г.) Курск: Юго-Западный государственный университет, 2018. С. 61-64.

10. Виноградов А.В., Тюрин И.Ю., Левченко Г.В., Кудрявцев В.А., Маракулин А.С. Роботизированные системы в сельском хозяйстве // Аграрный научный журнал. 2019. № 9. С. 79-81. https://doi.org/10.28983/asj.y2019i9

11. Joerger M., Pervan B. Range-domain integration of GPS and laser scanner measurements for outdoor navigation. In: Proc. ION GNSS 19th Int. Tech. Meeting (Fort Worth, TX, USA, 26-29 September 2006). Fort Worth: ION GNSS. 2006. P. 1115-1123. URL: https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6953

12. Hentschel M., Wulf O., Wagner B. A GPS and laser-based localization for urban and non-urban outdoor environments. In: Proc. 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008 (Nice, France, 22-26 September 2008). Nice: IEEE. 2008. P. 149-154. https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650585

13. Jabbour M., Bonnifait P. Backing up GPS in urban areas using a scanning laser. In: Proc. 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (Monterey, CA, USA, 5-8 May 2008). Monterey: IEEE. 2008. P. 505-510. https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4570058

14. Lowenberg-DeBoer J., Yuelu Huang I., Grigoriadis V., Blackmore S. Economics of robots and automation in field crop production // Precision Agriculture. 2020. Vol. 21(2). P. 278-299. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

REFERENCES

1. Perekopskiy A., Smelik V., Zakharov A. Prerequisites and effectiveness of the introduction of precision farming elements in the sowing of grain crops in the Leningrad region. BIO Web of Conferences. 2023;. 67, 02015. (In Eng.) https://doi.org/10.1051/bioconf/20236702015

2. Smelik V.A., Tsyganova N.A., Teplinsky I.Z. Application of mineral fertilizers in precision farming. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies. 2012; 3: 38-40. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17721195

3. Sutugina I.M., Smelik V.A. Information support of the real estate cadastre and precision agriculture on the materials of aerial photography. Saint Petersburg: SPbGAU. 2016. 198 p. (In Russ.)

4. Abrosimov V.K., Raikov A.N. Agroindustrial robots and artificial intelligence. Management of Large-Scale System Development (MLSD'2022): Proc. 15th Int. Conf. (Moscow, September 26-28, 2022). Vasiliev S.N., Tsvirkun A.D. (eds.) Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of RAS. 2022: 329-335. (In Russ.) https://doi.org/10.25728/mlsd.2022.0329

5. Dichenskiy A.V., Grits N.V., Udotov A.Yu. Aspects of the use of robotic technology in agricultural production – current state and prospects. Izvestia MAAO = Transaction of International Academy of Agrarian Education. 2020;50: 15-19 (In Russ.)

6. Zhiqiang C., Duzhesheng L., Krasnov A. Yu., Yanyu L. Trajectory tracking control for mobile robots with adaptive gain. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023; 23 (5): 904-910 (In Eng.) https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-904-910

7. Romanenkova M.S., Balabanov V.I.. Application of digital technologies in plant crops. Nauka v tsentral'noi Rossii = Science in the Central Russia. 2020; 2(44): 74-82. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-2-74-82

8. Smirnov I. G., Khort D. O., Kutyrev A. I. Intelligent technologies and robotic machines for garden crops cultivation. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(4): 35-41 (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41

9. Bobyr M. V., Kulabukhov S. A., Arkhipov A. E. Method of mobile robot sensing using stereo vision system for mobile robot control. In: Optoelectronic equipment and devices in systems of pattern recognition, image and symbol information processing – Recognition-2018. Proc. XI Int. Sci. Tech. Conf. (Kursk, September 25-28, 2018) Kursk: South-West State University, 2018; 61-64. (In Russ.)

10. Vinogradov A.V., Tyurin I.Yu., Levchenko G.V., Kudryavtsev V.A., Marakulin A.S. Robotic systems in agriculture. Agrarny nauchnyi zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2019; 9: 79-81. (In Russ.) https://doi.org/10.28983/asj.y2019i9

11. Joerger M., Pervan B. Range-domain integration of GPS and laser scanner measurements for outdoor navigation. In: Proc. ION GNSS 19th Int. Tech. Meeting (Fort Worth, TX, USA, 26-29 September 2006). Fort Worth: ION GNSS. 2006: 1115-1123 (In Eng.) URL: https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6953

12. Hentschel M., Wulf O., Wagner B. A GPS and laser-based localization for urban and non-urban outdoor environments. In: Proc. 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008 (Nice, France, 22-26 September 2008). Nice: IEEE. 2008: 149-154. (In Eng.) https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650585

13. Jabbour M., Bonnifait P. Backing up GPS in urban areas using a scanning laser. In: Proc. 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (Monterey, CA, USA, 5-8 May 2008). Monterey: IEEE. 2008: 505-510 (In Eng.) https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4570058

14. Lowenberg-DeBoer J., Yuelu Huang I., Grigoriadis V., Blackmore S. Economics of robots and automation in field crop production. Precision Agriculture. 2020; 21(2): 278-299. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5

Об авторах	**About the authors**
Угловский Артем Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет», 150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, д. 58 e-mail: a.uglovskii@yarcx.ru ORCID: 0000-0002-5678-4786;	Uglovskiy Artem Sergeevich, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Agrarian University”. 150042, Yaroslavl, Tutaevskoye Highway, 58 e-mail: a.uglovskii@yarcx.ru ORCID: 0000-0002-5678-4786;
Семеренко Наталья Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Электрификация», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет», 150042, г.	**Semerenko Natalya Yuryevna**, senior lecturer of the department of “Electrification”, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Agrarian University”. 150042, Yaroslavl, Tutaevskoye Highway, 58

Ярославль, Тутаевское шоссе, д. 58 e-mail: semerenko@yarcx.ru	e-mail: semerenko@yarcx.ru,
Заявленный вклад авторов Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования.	**Authors'contribution** All authors of this study were directly involved in its design, execution, and analysis of this study.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 08.12.2023	**Received:** 08.12.2023
Одобрена после рецензирования: 25.12.2023	**Approved after reviewing:** 25.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

РАЗДЕЛ 2. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Научная статья
УДК 636.2 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-72-84

АНАЛИЗ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Александр Юрьевич Брюханов[1], Эдуард Вадимович Васильев[2], Эдуард Александрович Папушин[3]✉

[1,2,3] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

[1]sznii@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4963-3821
[2]sznii6@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5910-5793
[3]papushinea@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7035-4654

Аннотация. Сбор данных о фактическом экологическом состоянии животноводческих объектов является важным элементом разрабатываемой «Интеллектуальной аналитической программной платформы для оценки экологической безопасности, прогнозирования и управления сельскохозяйственными экосистемами». Для получения оперативной информации о животноводческих объектах необходимо разработать новую методику, обеспечивающую получение данных о местоположении и направлении деятельности предприятия, о поголовье животных/птицы, размерах ферм, навозохранилищ и др., и основанную на использовании геоинформационных систем. Цель исследования – обзор методов мониторинга животноводческих объектов из литературных источников и Интернет-ресурсов и формирование методики оценки животноводческих объектов для получения оперативной информации. Предложен алгоритм рассмотрения объектов животноводства с использованием геоинформационных систем, предусматривающий подбор и анализ исходных данных и сравнение их с нормативными данными. Разработанная методика позволяет определить поголовье животных/птицы, выход навоза и количество навозохранилищ на рассматриваемых животноводческих объектах. Использование геоинформационных систем дает возможность моделировать развитие экологической ситуации на сельскохозяйственных объектах и исследовать зависимости состояния экосистемы от характеристик источников загрязнений, а также получать комплексную оценку состояния объектов на основе разнородных данных. Дальнейшее совершенствование методики заключается в накоплении данных (дешифровочных признаков производственных зданий, навозохранилищ) и формировании экологической оценки сельскохозяйственной деятельности, разработке автоматизированной самообучающейся системы для экологической оценки сельскохозяйственных объектов.

Ключевые слова: методика, информационная технология, геоинформационная система, объект животноводства

***Для цитирования*:** Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Анализ животноводческих объектов с использованием геоинформационных систем //

АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 72- 84 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-72-84

Research article
Universal Decimal Code 636.2

ANALYSIS OF LIVESTOCK FACILITIES USING GEO-INFORMATION SYSTEMS

Aleksandr Yu. Briukhanov[1], Eduard V. Vasilev[2], Eduard A.Papushin[3]✉

[1,2,3]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia

[1]sznii@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4963-3821
[2]sznii6@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5910-5793
[3]papushinea@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7035-4654

Abstract. An important element of the “Intelligent analytical software platform for environmental safety assessment, forecasting and management of agricultural ecosystems” under development is to collect the data on the actual ecological status of livestock facilities. To get the latest related information requires new methods which would supply the data on the farm location, its specialization, number of animals/poultry, the size of livestock houses, manure storages, etc. with the use of geographic information systems. The purpose of the study was to review the relevant monitoring practices from literary sources and Internet resources and to design a method for assessing the livestock facilities. The study suggested an algorithm for considering the livestock production facilities using geographic information systems, which involved selecting and analyzing the source data and comparing them with the standards. The developed methodology makes it possible to determine the number of animals/poultry, manure yield and the number of manure storage facilities at the livestock farms under consideration. The use of geographic information systems allows simulating the progress of ecological situation on agricultural objects and studying the dependence of the ecosystem’s status on the characteristics of pollution sources, as well as getting a comprehensive assessment of the state of objects based on heterogeneous data. Further improvement of the methodology includes the data accumulation concerning the decipherable signs of livestock houses and manure storage facilities and formation of an environmental assessment of agricultural activities, the development of an automated self-learning system for such an assessment.

Key words: methodology, information technology, geo-information system, livestock production object

For citation: Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Papushin E. A. Analysis of livestock facilities using geo-information systems. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 72-84. (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-72-84

Введение. Уровень развития информационных технологий дал толчок формированию геоинформационных систем (ГИС), позволяющих осуществлять сбор, хранение, обработку и отображение пространственных данных в различных отраслях производства. В сельском хозяйстве ГИС стали неотъемлемой

частью процессов планирования и управления. Их применение способствует повышению эффективности работы за счет оптимизации использования ресурсов и снижения затрат.

Использование геоинформационных систем позволяет:

- проводить анализ и оценку земельных ресурсов: ГИС дают возможность определить наиболее подходящие для сельского хозяйства земли, учитывать их плодородие и наметить меры повышения урожайности;
- планировать и контролировать выполнение сельскохозяйственных работ от обработки почвы и посева до сбора урожая, и его транспортировки;
- моделировать и прогнозировать изменения в окружающей среде: оценивать влияние различных факторов, таких как климатические изменения, эрозия почв, загрязнение водоемов и др., на урожайность и принимать соответствующие решения;
- анализировать и контролировать распространение вредителей и болезней: ГИС-анализ позволяет выявить зоны повышенного риска и своевременно принять меры по борьбе с вредителями и болезнями;
- создавать электронные карты полей: это упрощает процесс учета, контроля и анализа урожайности, а также обеспечивает более точный расчет объема удобрений и средств защиты растений;
- вести учет и контроль сельскохозяйственной техники, оборудования и материалов.

Существуют следующие методы мониторинга животноводческих объектов:

- наземные методы, основанные на визуальном мониторинге (фотовидеосъемка) [1], эти методы предполагают непосредственный контакт с объектом мониторинга;

дистанционные методы: мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [2, 3]; в работах [2, 3] рассматриваются возможности применения БПЛА для контроля загрязнений воздуха, почвы, водных источников продуктами жизнедеятельности животных, нерационального использования удобрений и техники.

- аэрокосмические, космические, авиационного базирования, мониторинг с использование геоинформационных систем [4-7].

В целом, системы мониторинга могут существенно улучшить управление и контроль над сельскохозяйственными процессами, обеспечивая более эффективное и устойчивое развитие отрасли.

Цель исследований – анализ методов мониторинга и разработка алгоритма оценки животноводческих объектов для получения оперативной информации.

Материалы и методы. При рассмотрении мониторинга объектов животноводства были применены методы системного и структурного анализа на основе литературных источников [6 –11], ГИС-анализа, дешифрирования космических снимков, цифровой обработки изображений, распознавания образов.

Объектами мониторинга были здания для содержания животных и птицы, территория рядом с фермами и комплексами, поля, навозохранилища и т. д.

Основными источниками информации при проведении анализа сельскохозяйственных объектов были:

– картографическая информация на основе имеющихся топографических и тематических карт;
– дистанционная аэро- и космическая информация (данные дистанционного зондирования Земли - ДДЗ);
– информация полевых обследований с инструментальной пространственной привязкой;
– статистическая информация;
– литературная, фондовая и архивная информация;
– информация из проектной документации.

Для определения количественных характеристик навоза/помета использовалась методика расчета количественных характеристик навоза из [12].

Геоинформационный мониторинг сельскохозяйственных объектов имеет единую принципиальную схему (рис. 1), состоящую из сбора данных, их обработки, анализа, моделирования и представления информации. Он объединяет в себе локальное и экологическое направления.

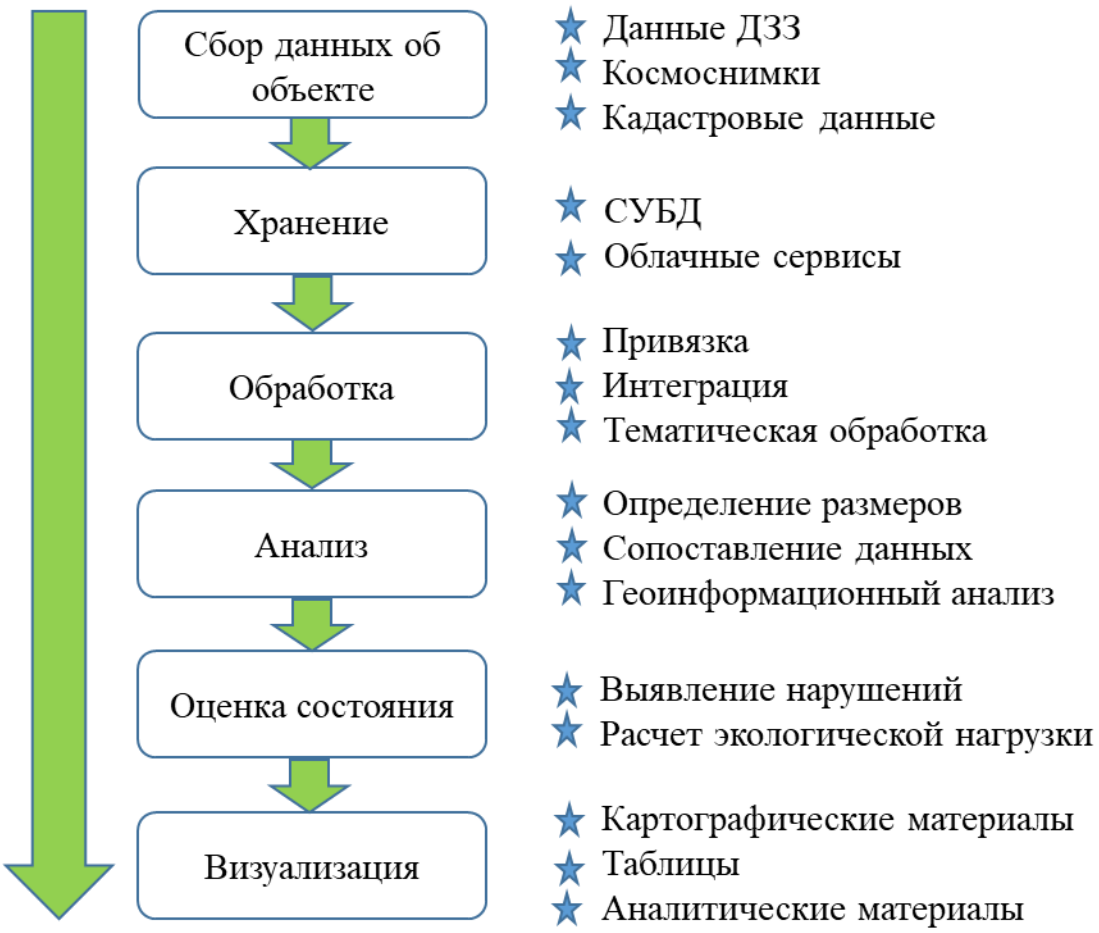


Рис. 1. Принципиальная схема анализа сельскохозяйственных объектов
Fig. 1. Schematic diagram of agricultural objects analysis

Результаты. Анализ животноводческих сельскохозяйственных объектов осуществлялся по алгоритму, позволяющему выполнить их количественную оценку с учетом эколого-

экономических и природно-климатических условий на исследуемой территории.

Работа алгоритма описывается следующим образом.

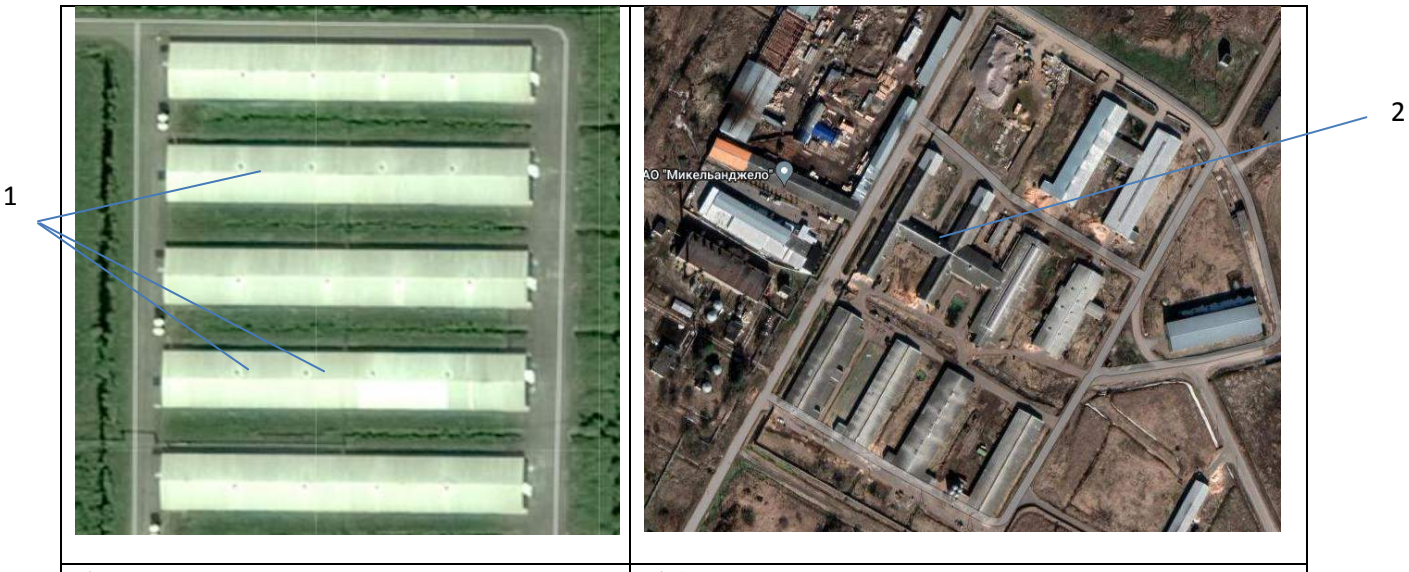
1. Задается подлежащая анализу территория (ГИС координаты).

2. Определяется исходная информация (наименование сельскохозяйственных предприятий, направления деятельности) из достоверных источников (данные Росстата – Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС), интернет-сайт Министерства сельского хозяйства РФ, сайты региональных Комитетов агропромышленного комплекса, из Информационно-аналитической системы «СЕЛЭКС»).

3.На рассматриваемой территории выявляются сельскохозяйственные объекты (животноводческий/свиноводческий/птицеводческий комплекс, навозохранилища) (рис. 2)

Рис. 2. Сельскохозяйственные объекты на карте ГИС
1, 2, 3, 4, 5 – помещения для содержания КРС
Fig. 2. Agricultural objects on the GIS map
1, 2, 3, 4, 5 – premises for cattle housing

4. По геометрическим признакам, составу, структуре и размещению объектов определяется направление деятельности комплекса, фермы (КРС, свиноводство, птицеводство) (рис. 3)



а) a)	б) b)

Рис. 3. Сельскохозяйственные объекты на карте ГИС

а) – здания свинофермы; б) – комплекс КРС.

1 – вентиляционные системы на крыше здания; 2 – галерея в здании содержания КРС.

Fig.3. Agricultural objects on the GIS map

a) – buildings of a pig farm; b) – cattle complex

1 – ventilation systems on the building roof; 2 – gallery in the cattle house

Основные признаки для определения направления деятельности анализируемого объекта:

– наличие галереи говорит о содержании КРС;

– наличие вентиляционных систем на крыше зданий характерно для птицефабрик;

– узкогабаритные здания характерны для свиноводческих помещений.

5. По геометрическим признакам, составу, структуре и размещению объектов с использованием инструментов измерения на карте ГИС определяются количественные значения объектов (количество голов, объем навозохранилищ, площадь компостных площадок и т.д.) (рис. 4), (табл. 1).

Геометрические (размеры, форма)

Состав (количество объектов)

Структура

Размещение

№ п/п	Номенклатура производственных зданий	Вместимость, гол	Габаритные размеры, длина*ширина (м)
1	Коровник с привязным содержанием коров	100	90*12
		200	78*21
		400	120*21
2	Коровник с беспривязным содержанием коров	400	114*27, 144*21
		600	126*35
		800	120*30, 96*28
		1200	168*36, 80*42

Рис. 4. Определение количества голов по геометрическим размерам на карте ГИС

Fig. 5. Determining the number of animal head by the dimensions on the GIS map

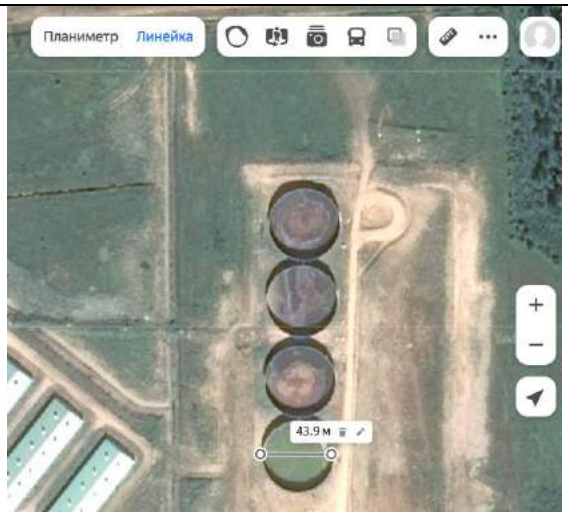
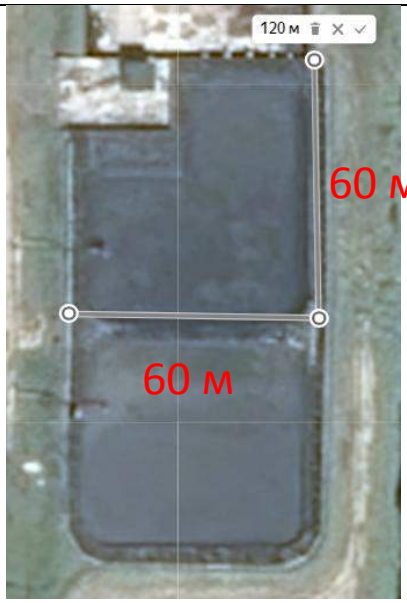
Пример (рис. 4) показывает, что размер животноводческого здания длиной 78 м и шириной 21 м соответствует коровнику с вместимостью 200 голов.

Размеры навозохранилищ и их вместимость определяются на карте с помощью инструмента измерения. Анализ и расчет проводится с учетом нормативных документов АПК Минсельхоза РФ[19,20]. Пример анализа навозохранилищ представлен в таблице.

[19] РД-АПК 1.10.15.02-17. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/495876346

[20] РД-АПК 1.10.01.01-18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/560851915

Таблица. Определение количественных характеристик навозохранилищ с помощью ГИС
Table. Quantification of manure storage facilities using GIS

Класс объекта	Образец	Характеристика по ГИС	Сравнение
1. Наземное закрытое навозохранилище цилиндрической формы		4 штуки H ≥ 5 м D=44 м V = 7 600 м^3 M = 6 080 т ∑M = 24 320 т	Погрешность ±10%
2. Навозохранилище секционное лагунного типа		2 секции H (высота) ≥ 3 м V = 10 800 м^3 M = 8 640 т ∑M = 17 280 т	Погрешность ± 10%

Пример расчета: на сельскохозяйственном предприятии имеются 4 наземных навозохранилища цилиндрической формы с диаметром 44 м и высотой 5 м, что соответствует вместимости 24 320 т навоза.

6. Определение количественных характеристик навоза/помета осуществляется по методике расчета из [12].

Выполняется расчет выхода навоза/помета по количеству животных/птицы, определенному с использованием ГИС, и анализируется соответствие с имеющимися навозохранилищами.

Пример (таблица 1): хозяйство 1 занимается выращиванием 18 500 голов свиней, выход навоза составляет 49 539 т/год, в наличии имеются 4 наземных навозохранилища цилиндрической формы общей вместимостью 24 320 т.

Блок-схема алгоритма анализа животноводческих объектов с использованием ГИС представлена на рисунке 5.

Рис. 5. Блок схема алгоритма анализа животноводческих сельскохозяйственных объектов с использованием ГИС

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for analyzing livestock facilities using GIS

Обсуждение. В связи с интенсификацией производства в животноводстве и усилением его воздействия на окружающую среду вопросы мониторинга сельскохозяйственных объектов требуют все большего внимания.

В работах [1, 2] рассмотрены подходы по использованию БПЛА для мониторинга животноводческих объектов и подчеркнута необходимость активизации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию специализированных комплексов измерительных средств параметров среды.

В настоящей работе рассмотрены методы и представлен алгоритм анализа животноводческих сельскохозяйственных

объектов с использованием ГИС. Использование этого алгоритма позволяет оценивать:

– поголовье животноводческих/птицеводческих предприятий, гол;

– выход навоза/помета, т;

– количество и объём навозохранилищ.

– соответствие имеющихся на сельскохозяйственном предприятии навозохранилищ выходу навоза/помета.

Выводы. 1. Разработанный алгоритм анализа сельскохозяйственных объектов с использованием геоинформационных систем позволяет определить поголовье животных, птицы, выход навоза и количество навозохранилищ на анализируемом сельскохозяйственном предприятии.

2. Использование геоинформационных систем позволяет моделировать развитие экологической ситуации на сельскохозяйственных объектах, получать комплексную оценку состояния объектов на основе разнородных данных.

3. Дальнейшее развитие методов анализа животноводческих объектов заключается в накоплении данных (дешифровочных признаков производственных зданий, навозохранилищ), разработке автоматизированной самообучающейся системы по экологической оценке сельскохозяйственных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kirichek R., Pham V.D., Kolechkin A., Al-Bahri M., Paramonov A. Transfer of Multimedia Data via LoRa. In: Galinina, O., Andreev, S., Balandin, S., Koucheryavy, Y. (eds.) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham. 2017. P. 708-720. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67380-6_67

2. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Экологический мониторинг животноводческих объектов беспилотными летательными аппаратами // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 2 (107). С.125-137. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46302064

3. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. №. 92. С. 158-165. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30258921

4. Белянина Н. В. Организация и функционирование геоинформационной системы экологического мониторинга на основе распределенных вычислений. М.: Синергия, 2014. 396 с.

5. Бешенцев А.Н. Геоинформационная оценка природопользования: монография. М.: БНЦ СО РАН, 2018. 120 с.

6. Блиновская Я.Ю. Введение в геоинформационные системы. Учебное пособие. М.: Инфра-М, Форум, 2018. 685 с.

7. Захаров М.С. Картографический метод и геоинформационные системы в инженерной геологии. Учебное пособие. М.: Лань, 2017. 435 с.

8. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование: монография. М.: КДУ. 2017. 424 с.

9. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование: методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2016. 424 с.

10. Битюков Н. А. Геоинформационные системы: монография. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 364 с.
11. Ивакин Я.И. Интеллектуализация геоинформационных систем. М.: LAP - Lambert Academic Publishing, 2015. 332 с.
12. Шалавина Е. В., Уваров Р. А., Васильев Э. В. Методика расчета распределения общего азота и общего фосфора между фракциями свиного навоза // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 54-70. https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070

REFERENCES

1. Kirichek R., Pham V.D., Kolechkin A., Al-Bahri M., Paramonov A. Transfer of Multimedia Data via LoRa. In: Galinina, O., Andreev, S., Balandin, S., Koucheryavy, Y. (eds.) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham. 2017: 708-720 (In Eng.) https://doi.org/10.1007/978-3-319-67380-6_67

2. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Ecological monitoring of livestock facilities using unmanned aerial vehicles. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2021; 2(107): 125-137 (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46302064

3. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Prospects for environmental monitoring of agricultural facilities using unmanned aerial vehicles. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2017; 92: 158-165. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30258921
4. Belyanina N. V. Organisation and functioning of the geoinformation system of environmental monitoring based on distributed computing. Moscow: Synergy Publ. 2014. 396 p. (In Russ.)
5. Beshentsev A.N. Geoinformation assessment of nature management: a monograph. M.: Buryatia Scientific Center of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2018. 120 p. (In Russ.)
6. Blinovskaya Y.Yu. Introduction to geoinformation systems. Study guide. Moscow: Infra-M, Forum, 2018. 685 p. (In Russ.)
7 Zakharov M.S. Cartographic method and geoinformation systems in engineering geology. Study guide. Moscow: Lan Publ. 2017. 435 p. (In Russ.)
8. Lurie I. K. Geoinformation mapping: monograph. Moscow: Lomonosov University Book Center. 2017. 424 p. (In Russ.)
9. Lurie I. K. Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images. Textbook. Moscow: Lomonosov University Book Center. 2016. 424 p. (In Russ.)
10. Bityukov N. A. Geoinformation systems: monograph. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 364 p. (In Russ.)
11. Ivakin Y.I. Intellectualisation of geoinformation systems. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 332 p. (In Russ.)
12 Shalavina E.V., Uvarov R.A., Vasilev E.V. Calculation methods of total nitrogen and total phosphorus distribution in pig manure fractions. Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems. 2022; 32(1):54-70. (In Russ.) https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070

Об авторах	About the authors
Брюханов Александр Юрьевич доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института аг-роинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское ш. 3 sznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4963-3821	**Aleksandr Yu. Briukhanov,** DSc (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia sznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4963-3821
Васильев Эдуард Вадимович канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское ш. 3 sznii6@ yandex.ru.ru ORCID: 0000-0002-5910-5793	**Eduard V. Vasilev**, Cand. Sc. (Engineering), leading researcher, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia sznii6@ yandex.ru.ru ORCID: 0000-0002-5910-5793
Папушин Эдуард Александрович канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское ш. 3 papushinea@yandex.ru ORCID: 0000-0001-7035-4654	**Eduard A. Papushin,** Cand. Sc. (Engineering), leading researcher, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia papushinea@yandex.ru ORCID: 0000-0001-7035-4654
Заявленный вклад авторов А.Ю. Брюханов – методология, Э.В. Васильев – концептуализация, Э.А. Папушин – создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.	**Authors'contribution** A. Yu. Briukhanov – methodology, E.V. Vasilev – research concept, E.A. Papushin – drafting, editing, and shaping the final version (revision) of the manuscript, visualisation
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interests

интересов	regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 08.12.2023	**Received:** 08.12.2023
Одобрена после рецензирования: 22.12.2023	**Approved after reviewing:** 22.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 636.4.003 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-84-95

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫБРОСОВ МЕТАНА ОТ ЭНТЕРАЛЬНОЙ ФЕРМЕНТАЦИИ ПРИ СОДЕРЖАНИИ СВИНЕЙ

Алексей Валериевич Трифанов✉, Валентин Игоревич Базыкин, Илья Евгеньевич Плаксин

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

✉trifanovav@mail.ru

Аннотация. В настоящее время свинина является наиболее широко потребляемым мясным продуктом в мире. Ожидается, что в ближайшие несколько десятилетий ее производство будет только расти. Производство и выбросы газов при содержании свиней связаны со сложными биологическими, физическими и химическими процессами. На скорость выбросов влияют многие факторы, такие как состав рациона и эффективность преобразования корма в мясо, методы обращения с навозом и условия окружающей среды. Выбросы от выращивания свиней составляют 13% от общих выбросов климатически активных газов. Цель исследований – определение количества выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней. В исследовании был использован расчетный метод на основе статистических значений поголовья животных. В результате исследований была разработана методика расчета выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней, соответствующая второму уровню. Определены коэффициенты выбросов метана от энтеральной ферментации для каждой половозрастной группы свиней. Коэффициенты выбросов CH_4 для хряков составили 1,515 кг CH_4/гол×год, для ремонтных свиноматок – 0,182 кг CH_4/гол×год, для холостых свиноматок – 0,050 кг CH_4/гол×год, для супоросных свиноматок – 0,811 кг CH_4/гол×год, для подсосных свиноматок – 0,618 кг CH_4/гол×год, для поросят-отъемышей – 0,176 кг CH_4/гол×год, для поросят на откорме – 0,227 кг CH_4/гол×год. Определены общие выбросы CH_4 от энтеральной

ферментации при содержании свиней в Российской Федерации в 22 978 т, что на 23% ниже значений, заявленных в Национальном докладе о кадастре выбросов.

Ключевые слова: сельское хозяйство, животноводство, свиноводство, выбросы, энтеральная ферментация, метан.

Для цитирования: Трифанов А.В., Базыкин В.И., Плаксин И.Е. Определения выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 84-95 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-84-95

Research article
Universal Decimal Code 636.5.033

DETERMINING METHANE EMISSIONS FROM ENTERAL FERMENTATION IN PIGS

Alexey V. Trifanov[1]✉, Valentin I. Bazykin[1], Ilya E. Plaksin[1]

[1]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia.

✉ trifanovav@mail.ru

Abstract. Pork is currently the most widely consumed meat product in the world. Its production is only expected to increase in the next few decades. The gas generation and emission in pig housing are associated with complex biological, physical, and chemical processes. Many factors influence the emission rate such as diet composition and efficiency of feed-to-meat conversion, manure handling practices, and environmental conditions. Emissions from pig growing account for 13% of the total emissions of climatically active gases. The research purpose was to determine the amount of methane emissions from enteric fermentation in pig housing. The study used a calculation method based on statistical values of the animal population. The study resulted in a method for calculating methane emissions from enteral fermentation in pigs corresponding to level 2. Methane emission factors were calculated for each age and gender group of pigs. The CH_4 emission coefficients for boars were 1.515 kg CH_4/ head×year, for replacement gilts – 0.182 kg CH_4/head×year, for barren sows – 0.050 kg CH_4/head×year, for farrow sows – 0.811 kg CH_4/head×year, for lactating sows – 0.618 kg CH_4/head×year, for weaning piglets – 0.176 kg CH_4/head×year, for fattening pigs – 0,227 kg CH_4/head×year. The total CH_4 emissions from enteral fermentation in pork production in the Russian Federation were determined to be 22,978 tons that was 23% lower than the values stated in the National Emission Inventory Report.

Key words: agriculture, animal husbandry, pig rearing, emissions, enteral fermentation, methane.

For citation: Trifanov A.V., Bazykin V.I., Plaksin I.E. Determining methane emissions from enteral fermentation in pigs. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 84-95. (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-84-95

Введение. Воздействие животноводства на окружающую среду привлекает все большее внимание, особенно выбросы парниковых газов. В настоящее время свинина является наиболее широко потребляемым мясным продуктом в мире, и ожидается, что в ближайшие несколько десятилетий ее производство будет только расти.

Выбросы от выращивания свиней составляют 13% от общих выбросов климатически активных газов от животноводства (табл. 1) [1-3].

Таблица 1. Выбросы парниковых газов от животноводства и птицеводства

Table 1. Greenhouse gas emissions from livestock and poultry farming

Животные	Выбросы, %			
	CO_2	CH_4	N_2O	Всего
Крупный рогатый скот	61	81	60	70
Мелкий рогатый скот	4	10	18	9
Свиньи	18	9	12	13
Птица	17	нет данных	10	8

Совокупные выбросы парниковых газов, производимых свиньями, включая выбросы из навоза, оцениваются приблизительно в 4,87 кг в CO_2-эквиваленте на один кг произведенной свинины в убойном весе. Хотя CO_2 – основной вкладчик в эти выбросы, на долю которых приходится около 81%, этот газ обычно не включают в расчет общего производства парниковых газов, поскольку предполагается, что CO_2 компенсируется при фотосинтезе растениями, используемыми в качестве корма. Кроме того, выбросы CO_2 от навоза часто ошибочно считали незначительными, в то время как они могут представлять собой до 40% дыхательной продукции [4-9].

В таблице 2 приведены доступные статистические показатели поголовья свиней в РФ по основным группам за 2022 г[21].

Таблица 2. Поголовье свиней в хозяйствах всех категорий за 2022 год

Table 2. The number of pigs in farms of all categories for 2022

Регион	Всего свиней	В том числе		
		Основные свиноматки	Молодняк	Поросята до 4месяцев (доращивание)
ЦФО	15112,	793,4	13789,1	5155,2
СЗФО	1856,7	83,1	1703,1	656,0
ЮФО	1415,8	107,0	1272,2	623,1
СКФО	415,3	25,0	347,6	162,4
ПФО	4279,	256,6	3908,3	1766,3
УФО	1463,	101,0	1331,4	640,7
СФО	2299,	173,3	2042,1	979,0
ДФО	764,0	53,4	689,0	297,1

Производство и выбросы газов при содержании свиней связаны со сложными биологическими, физическими и химическими процессами. На скорость выбросов влияют многие факторы, такие как состав рациона и эффективность его преобразования в метан, методы обращения с навозом и условия окружающей среды. Состав рациона свиней влияет на количество и физико-химические свойства навоза. Методы обращения с навозом и условия окружающей среды также влияют на химические и физические свойства навоза, способность к биологическому разложению, микробные популяции, содержание кислорода, влажность и pH.

Целью исследований являлось определение количества выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней.

[21] Бюллетень «Поголовье скота в хозяйствах всех категорий в 2022 году». URL:https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277 (дата обращения: 10.07.2023)

Материалы и методы исследований. Определение количества выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней осуществлялось с использованием расчетного метода на основе статистических значений поголовья животных.

Результаты и обсуждение. Для определения коэффициента выбросов метана по второму уровню методики в Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)[22] укрупненных данных по поголовью недостаточно. Выбросы в результате энтеральной ферментации от заданной категории животных определяются по формуле:

$$Выбросы = EF_{(T)} \times \frac{N_{(T)}}{10^6},$$

где:

Выбросы – выбросы метана в результате энтеральной ферментации, Гг CH_4/год;

$EF_{(T)}$ – коэффициент выбросов для каждой половозрастной группы, кг CH_4/гол×год;

$N_{(T)}$ – количество голов половозрастной группы животных Т в стране;

Т – половозрастная группа животных.

Суммарные выбросы от животных в результате энтеральной ферментации определяются по формуле:

$$Сумм.CH_{4Энтер} = \sum_i E_i, \quad (1)$$

где E_i – выбросы для *i*-ой половозрастной группы животных

Коэффициент выбросов CH_4 от энтеральной ферментации от различных половозрастных групп свиней определяется по формуле:

$$EF = \left[\frac{GE \times \left(\frac{Y_m}{100} \right) \times 365}{55{,}65} \right], \quad (2)$$

где:

EF – коэффициент выбросов, кг CH_4/гол×год;

GE – валовое потребление энергии, МДж/гол×год;

Ym – коэффициент преобразования метана, процентная доля валовой энергии, преобразованная в метан;

Коэффициент 55,65 (МДж/кг CH_4) представляет собой энергосодержание метана.

Уравнение (2) предполагает, что коэффициенты выбросов выводятся для половозрастной группы на весь год (365 дней). Однако в отрасли свиноводства достаточно сложная структура стада. В частности, основная свиноматка в течение года, в соответствии с циклограммой производства, находится в технологических группах холостых, супоросных и подсосных свиноматок. Продолжительность содержания и нормы кормления в указанных группах существенно отличаются. Поскольку в статистических данных приведено среднегодовое поголовье. то интервал в 365 дней можно применить к следующим половозрастным группам свиней: хряки, поросята-отъемыши на доращивании и свиньи на откорме. Для остальных групп свиней продолжительность содержания устанавливается в соответствии с зоотехническими требованиями.

Для свиней в Руководящих принципах МГЭИК (2006) отсутствует

[22] Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов, МГЭИК, 2006 URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html (дата обращения: 10.07.2023)

информация по рекомендуемому коэффициенту преобразования метана. Поэтому было использовано значение, Ym=0,6% в соответствии с таблицей А-4б, стр. 4-35, том 3 (МГЭИК, 1997)[23].

Согласно таблице 3 пп. 5.2.4 Государственного стандарта ГОСТ 34109-2017 «Комбикорма полнорационные для свиней»[24], включающей в себя показатели обменной энергии одного кг корма для каждой возрастной группы свиней, рассчитали валовое суточное потребление энергии и коэффициенты выбросов EF по формуле (2). Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Потребление корма и коэффициенты выбросов CH_4 от энтеральной ферментации при содержании свиней

Table 3. Feed consumption and CH_4 emission factors from enteral fermentation in pigs

Наименование половозрастной группы	Валовое потребление энергии, МДж/гол×сутки	Коэффициент выбросов CH_4, кгCH_4/гол×год
Хряки	38,5	1,515
Ремонтный молодняк и матки на подготовке к осеменению	28,1	1,106
Холостые матки	28,2	0,143
Супоросные матки	28,2	0,729
Подсосные матки	70,0	0,592
Поросята-отъемыши	18,1	0,712
Откормочный молодняк	23,4	0,921

Из проведенных расчетов видно, что коэффициент выбросов метана напрямую зависит, в основном, от уровня кормления животных. Для стран с развитой отраслью свиноводства и соответствующими показателями генетики и кормления данный коэффициент в Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов (МГЭИК, 2006) устанавливается на уровне 1,5 кг CH_4/гол×год, а для стран с развивающейся отраслью – на уровне 1,0 кг CH_4/гол×год.

Расчетные значения коэффициентов выброса метана в результате энтеральной ферментации по различным половозрастным группам свиней и их сравнение с коэффициентами из Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов (МГЭИК, 2006), рассчитанных по уровню 1, представлены на рис. 1.

[23] Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6b.html (дата обращения: 10.07.2023)

[24] ГОСТ 34109-2017.Комбикорма полнорационные для свиней. М. Стандартинформ. 2017. 18 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743685.pdf

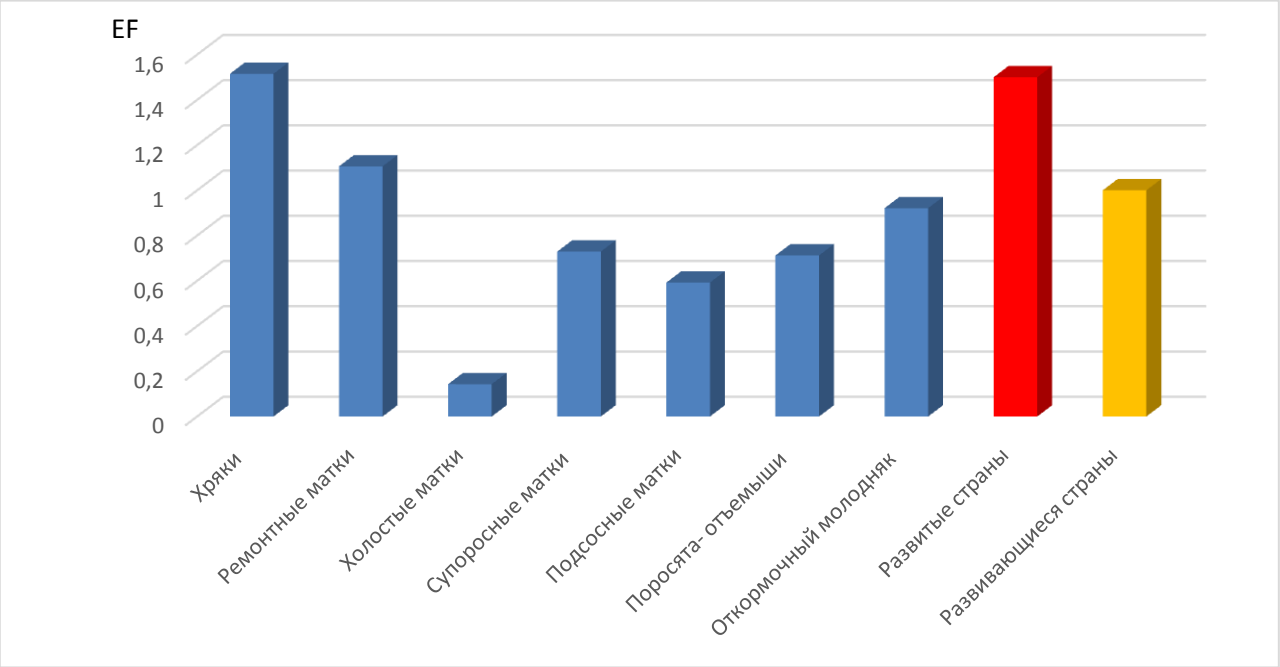


Рис. 1. Расчетные значения коэффициентов выброса метана в результате энтеральной ферментации по различным половозрастным группам свиней

Fig. 1. Calculated values of methane emission coefficients as a result of enteral fermentation for different age and gender groups of pigs

Для расчета выбросов от энтеральной ферментации статистические данные были разбиты по половозрастным и технологическим группам свиней на основании технологического расчета и экспертного метода (табл. 4).

Таблица 4. Расчетное поголовье свиней по половозрастным группам в 2022 году

Table 4. Estimated number of pigs by gender and age groups in 2022

№ строки расчета	Половозрастная группа свиней	Расчетное поголовье свиней, тыс. гол.
1	Всего свиней, $N_{св}$	27606,1
2	Основные свиноматки, $N_{осн}$, в том числе	1592,9
3	Холостые свиноматки, $N_{хол}$	205,163
4	Супоросные свиноматки, $N_{суп}$	1045,886
5	Подсосные свиноматки, $N_{подс}$	341,832
6	Хряки, $N_{хр}$	10,619
7	Ремонтные свиноматки, $N_{рем}$	919,89
8	Молодняк $N_{мол}$, в том числе	25082,8
9	Поросята на доращивании, $N_{дор}$	10279,8
10	Поросята на откорме, $N_{отк}$	14802,91

Данный расчет является довольно укрупненным. В него заложены средние показатели продолжительности содержания половозрастных групп животных. В качестве отправной точки принята продолжительность цикла свиноматки в 163 дня (21 день – холостой период; 107 дней супоросный период; 35 дней подсосный период, включающий в себя 7 дней содержания тяжелосупоросных свиноматок в секциях для опороса и 28 дней подсосного периода).

Продолжительность выращивания молодняка до достижения товарных кондиций принята в 180 дней. Это максимально допустимая продолжительность выращивания. На высокоэффективных предприятиях она, как правило, ниже. В реальных условиях, продолжительность содержания свиней на стадиях технологического процесса на разных предприятиях значительно отличается в зависимости от заложенных при проектировании исходных технологических показателей.

Порядок расчета строк в таблице 4.

- 1-я строка $N_{св}$ – статистические данные;

- 2-я строка $N_{осн}$ – статистические данные;

- 3-я строка $N_{хол}$ рассчитывается по формуле:

$$N_{хол} = N_{осн} \times \left(\frac{T_{хол}}{365} \times n_{п.ц.} \right),$$

где: $N_{осн}$ – поголовье основных свиноматок в РФ, гол.;

$T_{хол}$ – продолжительность содержания холостых свиноматок, дней;

$n_{п.ц.}$ – количество производственных циклов свиноматки в году.

Количество производственных циклов свиноматки в году определяется по формуле:

$$n_{п.ц.} = \frac{365}{T_{п.ц.}},$$

где $T_{п.ц.}$ – продолжительность производственного цикла свиноматки, дней.

Продолжительность производственного цикла свиноматки определяется по формуле:

$$T_{п.ц.} = T_{хол} + T_{суп} + T_{подс},$$

где: $T_{суп}$ – продолжительность содержания супоросных свиноматок, дней;

$T_{подс}$ – продолжительность содержания тяжелосупоросных и подсосных свиноматок в секциях для опороса, дней.

- 4-я строка $N_{суп}$ рассчитывается по формуле:

$$N_{суп} = N_{осн} \times \left(\frac{T_{суп}}{365} \times n_{п.ц.} \right)$$

- 5-я строка $N_{подс}$ рассчитывается по формуле:

$$N_{подс} = N_{осн} \times \left(\frac{T_{подс}}{365} \times n_{п.ц.} \right)$$

- 6-я строка $N_{хр}$ рассчитывается по формуле:

$$N_{хр} = \frac{N_{осн}}{150}$$

- 7-я строка $N_{рем}$ рассчитывается по формуле:

$$N_{рем} = N_{св} - N_{осн} - N_{хр} - N_{мол}$$

где: $N_{св}$ – общее поголовье свиней в РФ, гол.;

$N_{мол}$ – поголовье молодняка в РФ, гол.

- 8-я строка $N_{мол}$ – статистические данные;

- 9-я строка $N_{дор}$ – статистические данные;

- 10-я строка $N_{отк}$ рассчитывается по формуле:

$$N_{отк} = N_{мол} - N_{дор}$$

Используя полученные коэффициенты выражение 1 примет вид:

$$Сумм.СН_{4Энтер} = 1{,}515 \times \frac{N_{хр}}{10^6} + 1{,}106 \times \frac{N_{рем}}{10^6} + 0{,}143 \times \frac{N_{хол}}{10^6} + \\ + 0{,}729 \times \frac{N_{суп}}{10^6} + 0{,}592 \times \frac{N_{подс}}{10^6} + 0{,}712 \times \frac{N_{дор}}{10^6} + 0{,}921 \times \frac{N_{отк}}{10^6},$$

где: 1,515; 1,106; 0,143; 0,729; 0,592; 0,712; 0,921 - коэффициенты выбросов метана, кг CH_4/гол×год для хряков, ремонтного молодняка и свиноматок на подготовке к осеменению, холостых маток, супоросных маток, подсосных маток, поросят-отъемышей на доращивании и свиней на откорме соответственно;

$N_{хр}$ – среднегодовое количество хряков в РФ, гол.;

$N_{рем}$ – среднегодовое количество ремонтного молодняка и свиноматок на подготовке к осеменению, холостых маток в РФ, гол.;

$N_{хол}$ – среднегодовое количество холостых свиноматок в РФ, гол.;

$N_{суп}$ – среднегодовое количество супоросных свиноматок в РФ, гол.;

$N_{подс}$ – среднегодовое количество подсосных свиноматок в РФ, гол.;

$N_{дор}$ – среднегодовое количество поросят-отъемышей на доращивании в РФ, гол.;

$N_{отк}$ – среднегодовое количество свиней на откорме в РФ, гол.

Результаты определения выбросов представлены в таблице 5.

Таблица 5. Общие выбросы метана от свиней в результате энтеральной ферментации в Российской Федерации

Table 5. Total methane emissions from pigs from enteral fermentation in the Russian Federation

Наименование половозрастной группы		Общее поголовье, тыс. гол.	Коэффициент выбросов CH_4, кг CH_4/гол×год	Выбросы, Гг CH4/год
Хряки		10,619	1,515	0,016
Ремонтный молодняк и матки на подготовке к осеменению		919,89	1,106	1,017
Основные свиноматки	Холостые матки	205,163	0,143	0,029
	Супоросные матки	1045,886	0,729	0,762
	Подсосные матки	341,851	0,592	0,202
	Итого на среднегодовую основную свиноматку	1592,9	1,464	0,993
Поросята- отъемыши		10279,8	0,712	7,319
Откормочный молодняк		14802,91	0,921	13,633
Общие выбросы метана в результате энтеральной ферментации				22,978

Оценка коэффициентов выбросов с использованием методов уровня 2, предположительно, имеет уровень погрешности ±20%.

Свиноводство в России является высокоэффективной отраслью с использованием животных с высоким генетическим потенциалом и достаточным уровнем кормления. Однако полученные результаты расчета суммарных выбросов в результате энтеральной ферментации на 23% ниже, заявленных в Национальном докладе о кадастре выбросов [10].

Некоторые страны, для которых выбросы от животных имеют особо важное значение, могут пожелать провести расчеты на более высоком уровне, чем уровень 2, и включать дополнительную конкретную по стране информацию в свои оценки. При этом подходе может использоваться разработка усовершенствованных моделей, учитывающих подробный состав рациона;

сезонные изменения поголовья животных или качества и доступности кормов, а также возможные меры по снижению выбросов. Многие из этих оценок могут быть получены только с помощью прямых экспериментальных измерений.

Выводы. В результате проведения исследований была разработана методика расчета выбросов метана от энтеральной ферментации при содержании свиней, соответствующая уровню 2.

Авторами определены коэффициенты выбросов CH_4 от энтеральной ферментации для каждой половозрастной группы свиней. Коэффициенты выбросов CH_4 для хряков составили 1,515 кг CH_4/гол×год, для ремонтных свиноматок – 0,182 кг CH_4/гол×год, для холостых свиноматок – 0,050 кг CH_4/гол×год, для супоросных свиноматок – 0,811 кг CH_4/гол×год, для подсосных свиноматок – 0,618 кг CH_4/гол×год, для поросят-отъемышей – 0,176 кг CH_4/гол×год, для поросят на откорме – 0,227 кг CH_4/гол×год.

Определены общие выбросы CH_4 от энтеральной ферментации от производства свинины в Российской Федерации в 22978 т, что на 23% ниже значений, заявленных в Национальном докладе о кадастре выбросов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. MacLeod M., Gerber P., Mottet A., Tempio G., Falcucci A., Opio C., Vellinga T., Henderson B., Steinfeld H. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – A global life cycle assessment. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. 196 p. URL: https://www.fao.org/3/i3460e/i3460e.pdf

2. Opio C., Gerber P., Mottet A., Falcucci A., Tempio G., MacLeod M., Vellinga T., Henderson B., Steinfeld H. Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains – A global life cycle assessment. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. 214 p. URL: https://www.fao.org/3/i3461e/i3461e.pdf

3. Петрунина И.В., Горбунова Н.А. Системные меры по снижению выбросов парниковых газов в животноводческих хозяйствах. Обзор // Пищевые системы. 2022. №5(3). С. 202-211. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211

4. Zhang Q. Measuring carbon emissions from green and low-carbon full-life-cycle feeding in large-scale pig production systems: a case study from Shaanxi Province, China // Agriculture. 2023. Vol. 13 (12), 2281. https://doi.org/10.3390/agriculture13122281

5. Lesschen J.P., van den Berg M., Westhoek H.J., Witzke H.P., Oenema O. Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors // Animal Feed Science and Technology. 2011. Vol. 166-167. P. 16-28. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.058

6. Philippe F.X., Cabaraux J.F., Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: influencing factors and mitigation techniques // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2011. Vol.141. P. 245-260. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.012

7. Jorgensen H. Methane emission by growing pigs and adult sows as influenced by fermentation // Livestock Science. 2007. Vol. 109. P. 216-219. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.01.142

8. Guingand N., Quiniou N., Courboulay V. Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pigs kept either on partially slatted floor in cold conditions or on fully

slatted floor in thermoneutral conditions // Journées de la Recherche Porcine. 2010. Vol. 42. P. 277-284. https://doi.org/10.13031/2013.32688

9. Nicks B., Philippe F.X., Laitat M., Farnir F., Canart B., Vandenheede M. Gaseous emissions in the raising of fattening pigs on fully slatted-floor or on straw-based deep litter. In: Krynski, A., Wrzesien, R. (Eds.), Proc. XII Int. Cong. in Animal Hygiene (4-8 September 2005, Warszawa, Poland). Warsaw: Warsaw Agricultural University. 2005. P. 373-377. URL: https://www.isah-soc.org/?Events/Congresses/2005-Poland

10. Романовская А.А., Нахутин А.И., Гинзбург В.А., Грбар В.А., Имшенник Е.В., Карабань Р.Т., Коротков В.Н., Вертянкина В.Ю., Григурина Т.В., Говор И.Л., Литвинчук Г.Г., Лытов В.М., Полумиева П.Д., Попов Н.В., Трунов А.А., Прохорова Л.А. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг. М.: Росгидромет, ФГБУ «ИГКЭ». 2023. 479 с.

REFERENCES

1. MacLeod M., Gerber P., Mottet A., Tempio G., Falcucci A., Opio C., Vellinga T., Henderson B., Steinfeld H. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains – A global life cycle assessment. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. 196 p. (In Eng.) URL: https://www.fao.org/3/i3460e/i3460e.pdf

2. Opio C., Gerber P., Mottet A., Falcucci A., Tempio G., MacLeod M., Vellinga T., Henderson B., Steinfeld H. Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains – A global life cycle assessment. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. 214 p. (In Eng.) URL: https://www.fao.org/3/i3461e/i3461e.pdf

3. Petrunina I. V., Gorbunova N. A. Systemic measures on reduction of greenhouse gas emissions in animal husbandry enterprises. A review // Pishchevye sistemy = Food Systems. 2022;5(3):202-211 (In Russ.) https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211

4. Zhang Q. Measuring carbon emissions from green and low-carbon full-life-cycle feeding in large-scale pig production systems: a case study from Shaanxi Province, China. Agriculture. 2023; 13 (12), 2281 (In Eng.) https://doi.org/10.3390/agriculture13122281

5. Lesschen J.P., van den Berg M., Westhoek H.J., Witzke H.P., Oenema O. Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors. Animal Feed Science and Technology. 2011; 166-167: 16-28 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.058

6. Philippe F.X., Cabaraux J.F., Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: influencing factors and mitigation techniques. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2011;141: 245-260 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.012

7. Jorgensen H. Methane emission by growing pigs and adult sows as influenced by fermentation. Livestock Science. 2007: 109: 216-219 (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.01.142

8. Guingand N., Quiniou N., Courboulay V. Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pigs kept either on partially slatted floor in cold conditions or on fully slatted floor in thermoneutral conditions. Journées de la Recherche Porcine. 2010; 42: 277-284 (In Eng.) https://doi.org/10.13031/2013.32688

9. Nicks B., Philippe F.X., Laitat M., Farnir F., Canart B., Vandenheede M. Gaseous emissions in the raising of fattening pigs on fully slatted-floor or on straw-based deep litter. In:

Krynski, A., Wrzesien, R. (Eds.), Proc. XII Int. Cong. in Animal Hygiene (4-8 September 2005, Warszawa, Poland). Warsaw: Warsaw Agricultural University. 2005: 373-377 (In Eng.) URL: https://www.isah-soc.org/?Events/Congresses/2005-Poland

10. Romanovskaya A.A., Nakhutin A.I., Ginzburg V.A., Grbar V.A., Imshennik E.V., Karaban' R.T., Korotkov V.N., Vertyankina V.Yu., Grigurina T.V., Govor I.L., Litvinchuk G.G., Lytov V.M., Polumieva P.D., Popov N.V., Trunov A.A., Prokhorova L.A. National inventory report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases for the period 1990 - 2021. Moscow: Roshydromet, Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. 2023. 479 p. (In Russ.)

Об авторах	**About the authors**
Алексей Валериевич Трифанов, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия; trifanovav@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3503-6148	**Alexey V. Trifanov,** Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor, leading researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia, trifanovav@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3503-6148
Валентин Игоревич Базыкин, научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия. valentin-bazykin@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6417-6433	**Valentin I. Bazykin**, researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia valentin-bazykin@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6417-6433
Илья Евгеньевич Плаксин, канд. техн. наук, научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия; ilyaplaxin @gmail.com https://orcid.org/0000-0002-3695-0820	**Ilya E. Plaksin,** Cand. Sc. (Engineering), researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia ilyaplaxin @gmail.com https://orcid.org/0000-0002-3695-0820
Заявленный вклад авторов А.В. Трифанов – создание окончательной версии (доработка) рукописи, администрирование данных.	**Authors'contribution** A.V.Trifanov – revision and finalizing the manuscript, data administration. V.I. Bazykin - conducting research.

В.И. Базыкин - проведение исследований. И.Е. Плаксин – теоретические предпосылки, создание черновика рукописи.	I.E. Plaksin – theoretical background, drafting the manuscript.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 23.11.2023	**Received:** 23.11.2023
Одобрена после рецензирования: 06.12.2023	**Approved after reviewing:** 06.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 636.5.033:66.012.3 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-95-113

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЯСА ПТИЦЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЯХ

Нозим Исмоилович Джабборов[1] , Дмитрий Александрович Сошнев[2]✉, Алексей Валериевич Трифанов[3]

[12,3]Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

✉soshnevdima@mail.ru

Аннотация. Разработка и совершенствование методов и средств повышения эффективности производства мяса птицы на мелкотоварных предприятиях является актуальной задачей. Анализ литературы показал, что отсутствуют исследования по энергетическому анализу процессов и в целом технологии производства мяса птицы в технологических модулях. Применяемые методики энергетического анализа технологий в животноводстве и птицеводстве и изложенный в них математический аппарат в точности не описывают процессы, характерные для особенностей использования технологических модулей. Целью исследований являлась разработка математических моделей для определения составляющих структуры энергетических затрат и энергетический анализ технологии производства мяса птицы на мелкотоварных предприятиях с использованием технологических модулей. При проведении исследований применялись методы

математического моделирования процессов, расчетно-эмпирические методы определения энергетических затрат технологии производства мяса птицы в технологических модулях, анализ и обобщение экспериментальных данных. По результатам исследований разработаны аналитические и эмпирические математические модели для определения энергоемкости процесса производства мяса птицы в технологических модулях и её составляющих, выраженных расходом электроэнергии, корма, воды, затратами живого труда и т.д., что составляет новизну исследований. Основная суть моделей заключается в определении составляющих структуры энергетических затрат в реальном технологическом процессе выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях. Важность данных моделей состоит в том, что они наглядно показывают затраты энергии, приходящиеся на технологию выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях, и являются основой для осуществления оптимизации энергетических ресурсов, идущих на производство мяса птицы, а также выбора рациональной технологии его производства. Установлено, что при использовании одного технологического модуля затраты электроэнергии составляют 15,195 МДж/кг полученной продукции, затраты энергии, содержащейся в кормах – 36,115 МДж/кг, энергии, выраженной расходом воды - 0,001 МДж/кг. При этом энергоемкость технологического модуля и энергетические затраты живого труда соответственно составляют 3,51 и 0,62-1,85 МДж/кг полученной продукции. Общая энергоемкость технологии производства мяса птицы в одном технологическом модуле составляет 59,52 МДж на 1 кг продукции. Установлено, что увеличение количества модулей от 1 до 3 обеспечивает повышение производительности за 1 час функционирования модуля в 3 раза. При этом удельная энергоемкость технологии уменьшается на 2,1 % на каждый кг произведенной продукции.

Ключевые слова: энергетический анализ, цыплята-бройлеры, выращивание, технология, технологический модуль, сельское хозяйство, птицеводство

Для цитирования: Джабборов Н.И., Сошнев Д.А., Трифанов А.В. Результаты энергетического анализа технологии производства мяса птицы в технологических модулях // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 95-113 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-95-113

Research article

Universal Decimal Code 636.5.033:66.012.3

RESULTS OF ENERGY ANALYSIS OF POULTRY MEAT PRODUCTION TECHNOLOGY IN TECHNOLOGICAL MODULES

Nozim I. Dzhabborov[1], Dmitry A. Soshnev[2]✉, Alexey V. Trifanov[3]

[1,2,3]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia.

✉soshnevdima@mail.ru

Abstract. A current urgent task is to develop and improve the methods, machines and equipment designed to enhance the efficiency of poultry meat production at small-scale farms. The literature review revealed no studies available on energy analysis of separate processes, and the technology in general, associated with poultry meat production in technological modules. The

applied methods of energy analysis of livestock and poultry farming technologies and included mathematical apparatus do not describe the processes that characterize specific features of the use of technological modules. The research purpose was to develop mathematical models for determining the energy input components and the energy analysis of poultry meat production technology at small-scale farms with the use of technological modules. The research made use of the methods of mathematical modeling of processes, calculation and empirical methods of determining the energy inputs of poultry meat production technology in technological modules, analysis and generalization of experimental data. According research results, the analytical and empirical mathematical models were developed to determine the energy intensity of poultry meat production in technological modules and its components, expressed by the consumption of electricity, feed, water, live labor inputs, etc. that may be considered the research novelty. The main essence of the models is to determine the components of the structure of energy inputs in the real technological process of growing broiler chickens in technological modules. The importance of these models lies in the fact that they clearly show the energy inputs attributable to the technology of growing broiler chickens in technological modules and are the basis for optimization of energy resources used in the production of poultry meat, as well as the choice of rational technology of its production. It was established that when using one technological module, the electricity input was 15.195 MJ/kg, the feed energy input – 36.115 MJ/kg, the energy expressed by water consumption – 0.001 MJ/kg. At the same time, the energy intensity of the technological module and energy inputs of live labor, respectively, were 3.51 and 0.62-1.85 MJ/kg of the obtained products. The total energy intensity of poultry meat production technology in one technological module was 59.52 MJ per 1 kg of product. It was established that the increase in the number of modules from 1 to 3 provided an increase in productivity per 1 hour of module operation by 3 times. At the same time specific energy intensity of technology decreased by 2.1 % per each kg of obtained product.

Keywords: energy analysis, broiler chicken, rearing, technology, technological module, agriculture, poultry farming

For citation: Dzhabborov N.I., Soshnev D.A., Trifanov A.V., Results of energy analysis of poultry meat production technology in technological modules. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 95-113 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-95-113

Введение. Возросшая потребность в мясе птицы способствует поиску и разработке различных эффективных способов выращивания цыплят-бройлеров. В связи с этим, разработка методов и средств повышения эффективности производства мяса птицы на различных сельскохозяйственных предприятиях является актуальной задачей. Одним из наиболее надежных методов оценки эффективности технологий производства продукции является их энергетическая оценка, которая не зависит от политики ценообразования. Для лучшего понимания вопросов, рассмотренных в данной работе, достаточно знакомства с опубликованными результатами исследований относительно оценки эффективности различных способов выращивания цыплят-бройлеров.

Авторами работы [1] были проведены исследования по определению показателей продуктивности цыплят-бройлеров, выращенных на различном клеточном оборудовании. Установлено, что выращивание птицы на оборудовании «Hartmann» обеспечивает увеличение производства мяса птицы на 28,1 кг с 1 м^2. Среднесуточный прирост живой массы повышается на 1,3 %.

Полученные авторами [2] результаты исследований показали, что использование новой технологии «Патио» для выращивания цыплят-бройлеров дает достаточно высокий экономический эффект. Так, за период исследований, живая масса птицы в 40-дневном возрасте достигла в среднем по предприятию по закрытым партиям 2013 года 2220 г, сохранность поголовья составила 92,25%, среднесуточный прирост за период выращивания – 54,8 г, затраты корма на 1 кг прироста – 1,82 кг, себестоимость 1 кг прироста – 33,50 руб. Система «Патио» состоит из 2 рядов многоярусных батарей, установленных параллельно друг другу в одном птичнике (зале). Каждая батарея состоит из 4-6 ярусов шириной 234 см и высотой 75 см.

Выращивание цыплят-бройлеров при напольном и клеточном содержании показал, что при клеточном содержании живая масса в конце периода выращивания была выше на 8,9 и 8,3 % по сравнению с аналогичными группами цыплят при напольном содержании [3]. При этом, между затратами корма на 1 кг прироста при напольном и клеточном способах содержания существенной разницы не наблюдалось (2,25-2,40 кг).

Проведены исследования процесса выращивания цыплят-бройлеров в домашних условиях [4]. В данной работе описаны особенности правильного содержания цыплят- бройлеров для получения максимальной продуктивности в домашних условиях.

Исследовано влияние разной плотности посадки цыплят-бройлеров в клеточных батареях на выход в живой и убойной массе [5]. Установлено, что с повышением плотности посадки птицы от 23,1 до 31,0 гол/м² наблюдаются четкие тенденции увеличения выхода цыплят-бройлеров, а также выхода мяса в живой и убойной массе в расчете на 1 м² площади клеток.

В статье [6] приведены результаты сравнительной оценки систем содержания цыплят-бройлеров на их рост и развитие. Авторами разработаны рекомендации производителям мяса цыплят-бройлеров относительно выбора системы содержания.

В работе [7] приведены результаты исследования, характеризующие мясную продуктивность цыплят-бройлеров кросса Хаббард, выращенных по разным технологиям в рамках технологии использования традиционной клеточной системы выращивания цыплят-бройлеров, а также более современных разработанных технологий.

На основании проведенных исследований авторами [8] проанализирован комплекс технологических приемов энергосберегающего производства мяса бройлеров, предусматривающий раздельное по полу и дифференцированное по продолжительности выращивание в клетках и на подстилке порционных, средних и крупных мясных цыплят с использованием оптимальных технологических параметров, применения современного технологического оборудования, энергосберегающих систем освещения.

Исследованы показатели эффективности клеточного выращивания бройлеров при разной плотности посадки [9]. Установлено, что освещение посадок 38,5 лк/м^2 площади напольной клетки следует применять лишь при выращивании бройлеров с живой массой до 1,3 кг. Плотность посадки 28,5-32,0 гол/м^2 целесообразна при выращивании бройлеров до средней живой массы около 1,6 кг, выращивание до более высоких показателей живой массы приводит к снижению скорости роста, значительному

увеличению расхода корма на 1 кг прироста. Наименьшая величина плотности посадки – 22,0 гол/м^2. Она позволяет выращивать более крупных мясных цыплят со средней живой массой 1,8 кг.

В работах [10, 11] приведены результаты опытно-производственной проверки работы технологического модуля для выращивания бройлеров. В ходе проведения анализа выявили, что существующие проектные решения, предназначенные для мелкотоварных птицеводческих предприятий, обладают рядом недостатков – это отсутствие новых наукоемких и ресурсосберегающих технологий. В своих работах авторы дали оценку новой технологии выращивания цыплят-бройлеров в технологическом модуле и получили основные экспериментальные данные, которые дают возможность построить математические модели по основным параметрам (кормление, поение, расход электроэнергии, выход помета и т.д.) технологического процесса выращивания цыплят-бройлеров в технологическом модуле. Наряду с полученными экспериментальными данными, была рассчитана экономическая эффективность данной технологии и проведена оценка качества готовой продукции.

В последние десятилетия из-за нестабильности национальных валют многих стран мира возникло затруднение в достоверной оценке эффективности различных технологий и технических средств производства продукции в растениеводстве и животноводстве.

Анализ литературы [12-17] показывает, что не проведены исследования по определению энергоемкости процессов и в целом технологии производства мяса птицы в технологических модулях. При этом, не разработаны математические модели для определения энергоемкости процессов, входящих в технологию производства мяса птицы, с учётом особенностей выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях. Сущность энергетического анализа производства мяса птицы в технологических модулях сводится к оценке затрат на его производство и количества заключенной в него энергии, выраженных в сопоставимых единицах. При этом принимают во внимание энергосодержание кормов, электроэнергии, воды, технологического модуля, живого труда, основной и побочной продукции, производительность труда и других показателей в МДж или ккал/кг.

Построение структуры энергозатрат на технологию наиболее наглядно показывает затраты энергии на технологию выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях. Структура энергозатрат является основой для осуществления оптимизации энергетических ресурсов, идущих на производство мяса птицы, а также выбора рациональной технологии его производства. Энергетический анализ позволяет оценивать применяемые в настоящее время в производстве перспективные технологии с точки зрения энергетической эффективности.

Целью исследований являлась разработка математических моделей для определения составляющих структуры энергетических затрат и энергетический анализ технологии производства мяса птицы на мелкотоварных предприятиях с использованием технологических модулей.

Материалы и методы. Объект исследований – технология выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях.

Предмет исследований – математические модели для определения энергетических затрат, закономерности изменения энерго-экономических показателей, структура энергетических затрат на технологию.

Эксплуатационно-технологическая оценка функционирования технологического модуля проводилась в соответствии с нормой времени[25] на выполнение ветеринарных работ на животноводческих фермах, комплексах и птицефабриках.

На рисунке 1 представлен общий вид технологического модуля для выращивания цыплят-бройлеров.

Рис. 1. Технологический модуль для выращивания цыплят-бройлеров
Fig. 1. Technological module for broiler chickens rearing

В процессе исследований для определения основных показателей эффективности функционирования технологического модуля были проведены хронометражные наблюдения[26] за технологическими операциями, входящими в технологию выращивания цыплят-бройлеров.

При проведении хронометражных наблюдений регистрировались следующие показатели:

- количество израсходованной электрической энергии за сутки и за производственный цикл;
- объем произведенной продукции за производственный цикл;
- количество израсходованного корма за сутки и за производственный цикл;
- время на кормление и поение цыплят-бройлеров;
- время на очистку поддонов и санитарные работы;
- время на мониторинг и управление процессами;
- затраты времени на отдых и личные надобности основного и вспомогательного персонала.

Обработка опытных данных производилась по методике, изложенной в работе [18].

Результаты. Технология выращивания цыплят-бройлеров вне зависимости от способа их содержания, представляет собой сложную систему. Математическое моделирование позволяет более глубоко изучить технологию, прогнозировать наиболее энергоемкие

[25] Нормы обслуживания птицы и оплата труда рабочих. URL: https://bibliotekar.ru/5-spravochnik-pticevoda/25.htm (дата обращения 20.12.2023 г.)

[26] ГОСТ 24055-88, ГОСТ 24056-88, ГОСТ 24057-88, ГОСТ 24058-88, ГОСТ 24059-88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки. М.: Государственный Комитет СССР по стандартам, 1988. 48 с.

процессы и разработать технико-технологические решения по снижению удельной энергоемкости производимой продукции.

На основании сказанного далее приводим разработанные нами математические модели, которые являются результатом формализации процесса изменения удельной энергоемкости производства мяса птицы с необходимой степенью приближения к действительности.

Перейдем к изложению результатов моделирования процессов исследуемой технологии производства мяса птицы в технологических модулях.

Энергосодержание полученной продукции (мясо птицы) $Э_{пр}$ (МДж) в технологическом модуле в единицу времени определяется из выражения:

$$Э_{пр} = Q_{пр}^{о} \cdot \alpha_{пр} \cdot n_{ц}\,, \tag{1}$$

где $Q_{пр}^{о}$ – масса полученной продукции за 1 цикл, кг;

$\alpha_{пр}$ – энергосодержание полученной продукции (мясо птицы), МДж/кг;

$n_{ц}$ – количество циклов в год.

Общие затраты энергии на производство продукции в технологическом модуле $\boldsymbol{Э_{тех}}$ (МДж) определяются из выражения:

$$Э_{тех} = Э_{мп}^{тм} \cdot Q_{пр}^{г}, \tag{2}$$

где $Э_{мп}^{тм}$ – удельная энергоемкость процесса производства мясо птицы в технологическом модуле, МДж/кг;

$Q_{пр}^{г} = n_{ц} \cdot Q_{пр}^{о}$ – масса полученной продукции за 1 год, кг.

Время t_p *(ч) на производство продукции* в течение года можно вычислить из выражения:

$$t_p = n_{ц} \cdot t_{ц}, \tag{3}$$

где $n_{ц}$ – количество циклов;

$t_{ц}$ – время (продолжительность) одного цикла, ч.

Удельную энергоемкость процесса производства мясо птицы (МДж/кг) в технологическом модуле можно определить по формуле:

$$Э_{мп}^{тм} = C_{ну}^{з} \cdot \left\{ Э_{эл}^{эн} + Э_{б}^{корм} + Э_{б}^{в} + \left[\left(Э_{тех}^{мод} + Э_{ж}^{тр} \right) \Big/ \psi_{ч} \right] \right\}, \tag{4}$$

где $C_{ну}^{з}$ – поправочный коэффициент, учитывающий неучтенные затраты энергии на технологию ($C_{ну}^{з} = 1{,}05$);

$\boldsymbol{Э_{эл}^{эн}}$ – затраты электрической энергии на производство единицы продукции (мяса птицы) в технологическом модуле, МДж/кг;

$Э_{б}^{корм}$ – затраты энергии на кормление цыплят-бройлеров на единицу полученной продукции, МДж/кг;

$Э_{тех}^{мод}$ – энергоемкость технологического модуля, МДж/ч.;

$Э_{ж}^{тр}$ – энергетические затраты живого труда, МДж/ч.;

$\psi_{ч}$ – производительность технологического модуля, кг/ч.

Затраты электрической энергии $\boldsymbol{Э_{эл}^{эн}}$ (МДж/кг) на производство единицы продукции (мяса птицы) в технологическом модуле можно определить по формуле:

$$Э_{эл}^{эн} = K_{эл}^{эн} \cdot \left(Э_{э}^{общ} \Big/ Q_{пр}^{г} \right), \quad (5)$$

где $\boldsymbol{Э_{э}^{общ}}$ – общий расход электрической энергии за время t_p на производство $Q_{пр}$ полученной продукции в единицу времени, кВт·ч.;

$\boldsymbol{K_{эл}^{эн}}$ – переводной коэффициент, учитывающий КПД сетей, $K_{эл}^{эн} = 3{,}6$ [12].

Затраты энергии на кормление цыплят-бройлеров $Э_{б}^{корм}$ (МДж/кг) на единицу полученной продукции определяются по формуле:

$$Э_{б}^{корм} = \left[e_{к} \cdot M_{корм} \right] \Big/ Q_{пр}^{г}, \quad (6)$$

где $e_{к}$ – энергосодержание корма, МДж/кг;

В технологии выращивания цыплят-бройлеров используются разные виды кормов. Тогда выражение (6) примет несколько другой вид:

$$Э_{б}^{корм} = \sum_{i=1}^{n} \left[e_{к} \cdot M_{корм} \right] \Big/ Q_{пр}^{г}, \quad (7)$$

где n – количество видов кормов.

Например, при кормлении цыплят-бройлеров тремя марками корма Purina: «Стартер», «Гроуэр» и «Финишер», выражение (6) можно записать так:

$$Э_{б}^{корм} = \left[e_{к}^{с} \cdot M_{корм}^{с} + e_{к}^{г} \cdot M_{корм}^{г} + e_{к}^{ф} \cdot M_{корм}^{ф} \right] \Big/ Q_{пр}^{г}, \quad (8)$$

где $e_{к}^{с}$ – энергосодержание корма Purina - «Стартер», МДж/кг;

$M_{корм}^{с}$ – масса корма Purina - «Стартер», кг;

$\boldsymbol{e_{к}^{г}}$ – энергосодержание корма Purina - «Гроуэр», МДж/кг;

$\boldsymbol{M_{корм}^{г}}$ – масса корма Purina - «Гроуэр», кг;

$\boldsymbol{e_{к}^{ф}}$ – энергосодержание корма Purina - «Финишер», МДж/кг;

$\boldsymbol{M_{корм}^{ф}}$ – масса корма Purina - «Финишер», кг;

$M_{корм}$ – общий годовой расход кормов, кг/год.

Энергозатраты, учитывающие расход воды $Э_{б}^{в}$ (МДж/кг) определяются из выражения:

$$Э_б^в = {(\alpha_в \cdot Q_в)}/{Q_{пр}^г}, \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\alpha_в}$ – энергосодержание воды ($\alpha_в = 0{,}002$ ***МДж/кг***), МДж/кг;

$\boldsymbol{Q_в}$ – общий годовой расход воды, кг.

Энергоемкость технологического модуля (МДж/ч) можно определить из выражения:

$$Э_{тех}^{мод} = (t_c)^{-1} \cdot \left[{(a_{тм} \cdot f_м)}/{100}\right] \cdot \left({a_a}/{T_з}\right), \quad (10)$$

где t_c – срок эксплуатации технологического модуля, который прослужит не менее 20 лет. С учётом эксплуатации технологического модуля в экстремальных климатических условий СЗ региона РФ примем $t_c = 10$ лет;

$a_{тм}$ – энергетический эквивалент технологического модуля, МДж/м^2;

$f_м$ – полезная площадь технологического модуля, м^2;

a_a – амортизационные отчисления технологического модуля, %;

$T_з$ – годовая загрузка технологического модуля ($T_з = t_p$), ч.

Энергетические затраты живого труда $Э_ж^{тр}$ (МДж/ч) можно определить из выражения:

$$Э_ж^{тр} = n_ч \cdot \alpha_ж, \quad (11)$$

где $n_ч$ – соответственно число основных работников;

$\alpha_ж$ – соответственно энергетические эквиваленты затрат живого труда, МДж/ч.

Производительность технологического модуля $\psi_ч$ (кг/ч) определяется из соотношения:

$$\psi_ч = {Q_{пр}^г}/{T_з}, \quad (12)$$

Полученная энергия от побочной продукции $Э_{уд}$ (МДж) в виде органического удобрения можно определить по формуле:

$$Э_{уд} = n_ц \cdot \left[\begin{matrix}(M_{пт}^{пом} \cdot \alpha_N \cdot f_N) \cdot 10^{-2} + (M_{пт}^{пом} \cdot \alpha_{P2O5} \cdot f_{P2O5}) \cdot 10^{-2} + \\ +(M_{пт}^{пом} \cdot \alpha_{K2O} \cdot f_{K2O}) \cdot 10^{-2}\end{matrix}\right], \quad (13)$$

$M_{пт}^{пом}$ – выход помёта за 1 цикл, кг;

α_N – энергосодержание азотных удобрений, МДж/кг;

f_N – содержание азота в птичьем помёте, %;

α_{P2O5} – энергосодержание фосфорных удобрений, МДж/кг;

f_{P2O5} – содержание фосфора в птичьем помёте, %;

α_{K2O} – энергосодержание калиевых удобрений, МДж/кг;

f_{K2O} – содержание калия в птичьем помёте, %.

С использованием разработанных математических моделей (1) – (13) и полученных данных в процессе проведения хронометражных наблюдений была составлена структура энергетических затрат на технологию производства мяса

птицы в зависимости от количества технологических модулей (табл. 1).

Таблица 1. Структура энергетических затрат на технологию производства мяса птицы
Table 1. Structure of energy inputs for poultry meat production technology

Статьи затрат энергии	Количество технологических модулей (поголовья)					
	1 (348)		2 (696)		3 (1044)	
	МДж/кг	%	МДж/кг	%	МДж/кг	%
Затраты электрической энергии на производство единицы продукции $Э_{эл}^{эн}$	15,195	25,5	15,195	25,9	15,195	26,0
Затраты энергии, содержащееся в кормах $Э_{б}^{корм}$	36,115	60,6	36,115	61,6	36,115	62,0
Энергозатраты, выраженные расходом воды $Э_{б}^{в}$	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Энергоемкость технологического модуля $Э_{тех}^{мод}$	3,517	5,91	3,516	6,0	3,518	6,0
Энергетические затраты живого труда $Э_{ж}^{тр}$	1,85	3,11	0,925	1,5	0,617	1,0
Неучтенные затраты энергии $Э_{эн}^{неучт}$	2,98	5	2,93	5	2,91	5
Удельная энергоемкость процесса $Э_{мп}^{тм}$	59,52	100	58,55	100	58,23	100

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация соотношений прямых и косвенных энергетических затрат в процентах от совокупных затрат энергии на технологию производства мяса птицы в зависимости от количества технологических модулей.

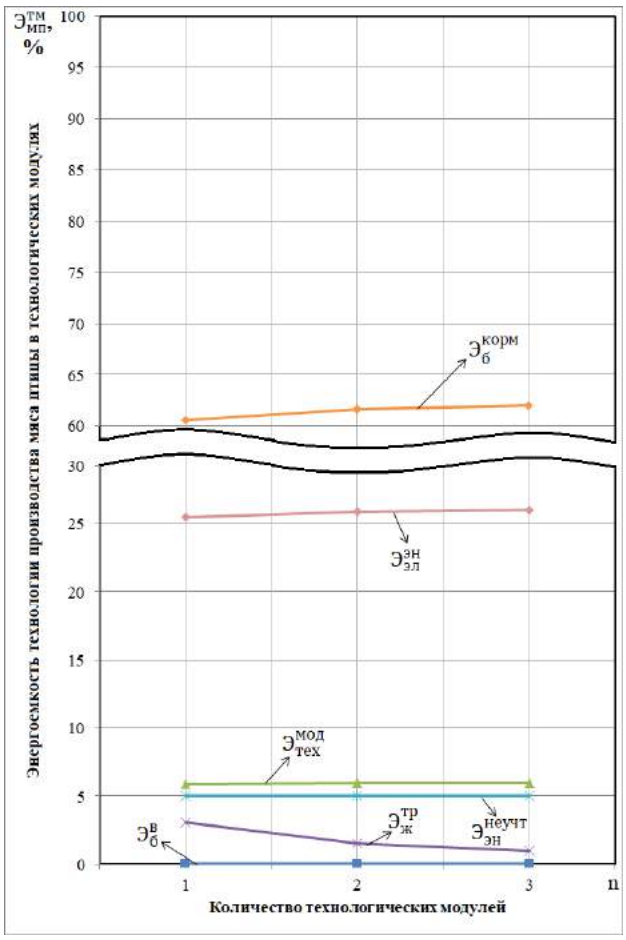


Рис. 2. Доля прямых и косвенных энергетических затрат (в %) от совокупных затрат энергии на технологию производства мяса птицы в зависимости от количества технологических модулей

Fig. 2. Share of direct and indirect energy inputs (in %) of total energy inputs for poultry meat production technology depending on the number of technological modules

Графическая зависимость энергоемкости технологии производства мяса птицы в технологических модулях от их количества показана на рисунке 3.

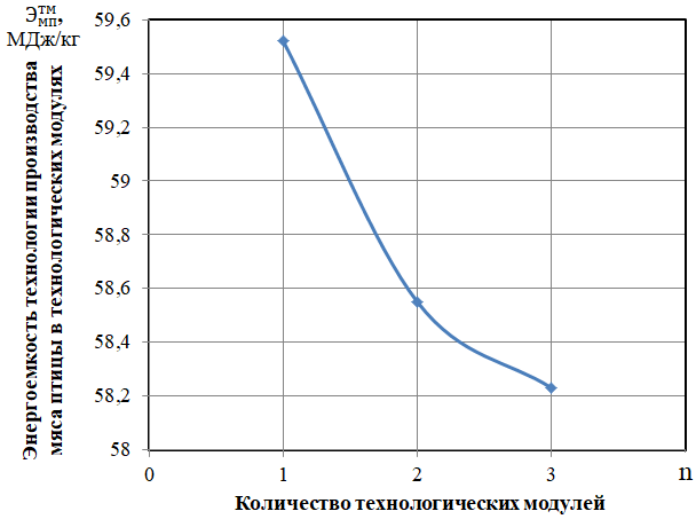


Рис. 3. Зависимость энергоемкости технологии производства мяса птицы в технологических модулях от их количества

Fig. 3. Dependence between the energy intensity of poultry meat production technology in technological modules and their number

Выявлена закономерность изменения энергоемкости технологии производства мяса птицы в технологических модулях, которая описывается следующими эмпирическими зависимостями:

- от количества технологических модулей:

$$Э_{мп}^{тм} = 0{,}325 \cdot n^2 - 1{,}945 \cdot n + 61{,}14. \quad (14)$$

- от поголовья цыплят-бройлеров:

$$Э_{мп}^{тм} = 0{,}00000268 \cdot n_б^2 - 0{,}00559 \cdot n_б + 61{,}140. \quad (15)$$

На рисунке 4 представлена зависимость удельных энергозатрат живого труда при производстве мяса птицы в технологических модулях от количества модулей.

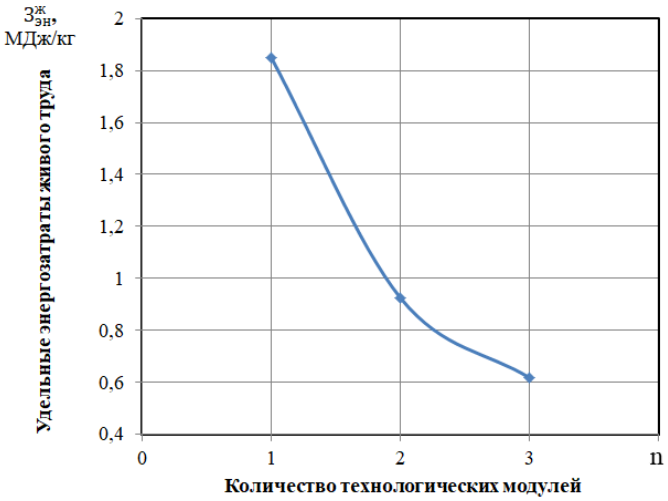


Рис. 4. Зависимость удельных энергозатрат живого труда при производстве мяса птицы в технологических модулях от количества модулей

Fig. 4. Dependence between the specific energy consumption of live labor in poultry meat production in technological modules and their number

Выявлена закономерность изменения удельных энергозатрат живого труда технологии производства мяса птицы в технологических модулях, которая описывается следующими эмпирическими зависимостями:

- от количества технологических модулей:

$$З_{эн}^{ж} = 0{,}3085 \cdot n^2 - 1{,}8505 \cdot n + 3{,}392 \quad (16)$$

- от поголовья цыплят-бройлеров:

$$З_{эн}^{ж} = 0{,}00000254 \cdot n_б^2 - 0{,}0053 \cdot n_б + 3{,}392 \quad (17)$$

На рисунке 5 показана зависимость производительности, приходящейся на 1 час функционирования технологического модуля при производстве мяса птицы от количества модулей.

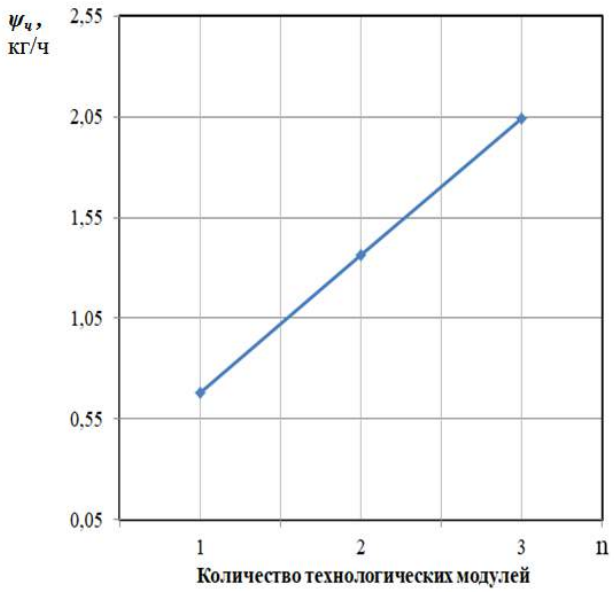


Рис. 5. Зависимость производительности технологического модуля при производстве мяса птицы от количества модулей

Fig. 5. Dependence between the productivity of technological module in poultry meat production on the number of modules

Выявлена закономерность изменения производительности, приходящейся на 1 час функционирования технологического модуля при производстве мяса птицы, которая описывается следующими эмпирическими зависимостями:

- от количества технологических модулей:

$$\psi_ч = -0{,}0005 \cdot n^2 + 0{,}6825 \cdot n - 0{,}001. \quad (18)$$

- от поголовья цыплят-бройлеров:

$$\psi_ч = 0{,}00196 \cdot n_б - 0{,}001. \quad (19)$$

Эмпирические зависимости (14), (16), (18) достоверны при количестве модулей от 1 до 3.

Эмпирические зависимости (15), (17), (19) достоверны в пределах изменения поголовья цыплят-бройлеров от 348 до 1044 голов.

Обсуждение. Анализ структуры энергетических затрат на технологию производства мяса птицы показывает, что наиболее энергоемким является процесс кормления цыплят-бройлеров, что составляет 60,6-62,0 % от совокупных затрат энергии, в зависимости от количества технологических модулей и поголовья бройлеров. Основной причиной этого является сравнительно значительное количество энергии, содержащейся в кормах. По ранжированному ряду на втором месте по энергоемкости находятся затраты электрической энергии на производство продукции – 25,5-26,0 % от совокупных энергетических затрат. На третьем месте по ранжированному ряду находится энергосодержание технологического модуля – 5,91-6,0 % от совокупных затрат энергии. Таким образом, структура энергетических затрат на технологию производства мяса птицы позволяет заключить, что обеспечение энергосбережения возможно при эффективном использовании кормов,

электроэнергии и оптимальном проектировании технологического модуля и других составляющих энергозатрат.

Для осуществления закона перехода количественных изменений (вовлечение больших энергозатрат на производственный процесс) в качественные (извлечение большего количества производимой продукции – мяса птицы) требуется совершенствовать технологию выращивания цыплят-бройлеров. Для этого, в первую очередь, необходимо обеспечить повышение коэффициента полезного действия используемых кормов, и далее других видов энергетических затрат на технологию.

В целом, энергетический анализ и составление структуры энергозатрат позволяет сравнивать технологии выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях в зависимости от их количества с точки зрения расхода энергетических ресурсов, выявить главные резервы экономии энергии в процессе производства мяса птицы. Обоснование структуры энергетических затрат в дальнейшем даст возможность определить энергетическую эффективность технологии выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях с учётом основной и побочной продукции и разработать технико-технологические решения, обеспечивающие повышение качества и снижение себестоимости производства мяса птицы.

Выводы. Разработаны аналитические математические модели, описывающие процессы изменения энергоемкости процесса производства мяса птицы в технологических модулях и её составляющих, выраженных расходом электроэнергии, корма, воды, затратами живого труда и т.д.

На основе полученных опытных данных с использованием разработанных математических моделей была составлена структура энергозатрат на технологию выращивания цыплят-бройлеров в технологических модулях, которая является основой для осуществления оптимизации энергетических ресурсов, идущих на производство мяса птицы, а также выбора рациональной технологии его производства.

Установлено, что при использовании одного технологического модуля затраты электроэнергии составляют 15,195 МДж/кг, затраты энергии, содержащейся в кормах – 36,115 МДж/кг, выраженные расходом воды – 0,001 МДж/кг. При этом энергоемкость технологического модуля и энергетические затраты живого труда соответственно составляют 3,51 и 0,62-1,85 МДж/кг полученной продукции. Установлено, что общая энергоемкость производства 1 кг мяса птицы в технологических модулях колеблется в пределах 58,23-59,52 МДж (13908-14216 ккал). Установлено, что увеличение количества модулей от 1 до 3 обеспечивает повышение производительности за 1 час функционирования модуля в 3 раза. При этом удельная энергоемкость технологии уменьшается на 2,1 % на каждый кг произведенной продукции.

Расчётно-эмпирическим методом для конкретных условий функционирования технологических модулей получены эмпирические зависимости, описывающие закономерность изменения энергоемкости технологии производства мяса птицы, удельных энергозатрат живого труда и производительности от количества технологических модулей. Полученные эмпирические зависимости в дальнейшем могут быть использованы при

обосновании рациональных режимов модулей. функционирования технологических

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шацких Е.В., Волынкин В.В., Попков Н.В. Продуктивные показатели цыплят-бройлеров, выращенных на различном клеточном оборудовании // Аграрный вестник Урала. 2016. № 10 (152). С. 72-77. URL: https://agvu.urgau.ru/images/Agricultural_Journal/2016/10/14.pdf

2. Ноздрин А.Е., Гудыменко В.И. Выращивание цыплят-бройлеров по новой технологии // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 5. С. 60-62. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22499668

3. Гамко Л.Н., Рыбаков Н.П., Груздова Н.В. Выращивание цыплят-бройлеров при напольном и клеточном содержании // Агроконсультант. 2016. № 1 (2016). С. 18-21. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30763087

4. Реутова М.С., Кондратенко Л.Н. Выращивание цыплят бройлеров в домашних условиях // Математическое моделирование и информационные технологии при исследовании явлений и процессов в различных сферах деятельности. Сб. материалов II Межд. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов / Отв. за выпуск Н.В. Третьякова. Краснодар: Новация. 2022. С. 267-272.

5. Астраханцев А.А. Выращивание цыплят-бройлеров при разной величине плотности посадки в клеточных батареях // Актуальные проблемы и перспективы развития ветеринарной и зоотехнической наук. Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с международным участием. Чебоксары: Чувашская ГСХА. 2019. С. 187-192.

6. Ларионов К.А. Сравнение систем содержания цыплят-бройлеров и их влияние на рост и развитие птицы // Научные труды студентов Ижевской ГСХА. 2022. № 1 (14). С. 934–937. URL: http://nts-izhgsha.ru/assets/nauchtrudstud_1-2022.pdf

7. Гудыменко В.И., Ноздрин А.Е. Прогрессивная система выращивания цыплят-бройлеров. Белгород: Политерра. 2015. С. 128-131.

8. Лыскин В.С., Семенченко С.В., Нефедова В.Н. Ресурсосберегающие технологии выращивания цыплят бройлеров // Актуальные направления инновационного развития животноводства и современные технологии производства продуктов питания. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Пос. Персиановский: Донской ГАУ. 2020. С. 64-67.

9. Семенченко С.В., Засемчук И.В. Эффективность клеточного выращивания бройлеров при разной плотности посадки // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (89). С. 315-318. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46363758

10. Сошнев Д. А., Трифанов А. В., Соколов А. М., Плаксин И. Е. Эффективность выращивания бройлеров в технологическом модуле // Journal of Agriculture and Environment. 2022. № 4(24). https://doi.org/10.23649/jae.2022.4.24.06.

11. Сошнев Д. А., Трифанов А. В., Базыкин В. И., Плаксин И. Е. Результаты опытно-производственной проверки работы технологического модуля для выращивания бройлеров // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 3(112). С. 121-129. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-121-129

12. Методика энергетического анализа технологических процессов в

сельскохозяйственном производстве. М.: ВИМ, ЦНИИМЭСХ, ВИЭСХ. 1995. 96 с.

13. Шпаков А.С., Прологова Т.В., Воловик В.Т. Агроэнергетический анализ в специализированных животноводческих хозяйствах. М.: ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». 2021. 96 с. URL: https://new.ras.ru/work/publishing/authors/shpakov-a-s/

14. Базаров Е.И., Широков Ю.А. Агрозооэнергетика. М.: Агропромиздат. 1987 156 с. URL: https://www.studmed.ru/bazarov-ei-shirokov-yua-agrozooenergetika_723221c5d0b.html

15. Мишуров Н.П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока.М.: Росинформагротех. 2010. 152 с.

16. Горбатовский А.В., Горбатовская О.Н., Тимошенко М.В. Биоэнергетическая эффективность объемно-планировочных и технологических решений в молочном скотоводстве: оценка вариантов, перспективные модели // Аграрная экономика. 2022. №(3). С. 74-82. https://doi.org/10.29235/1818-9806-2022-03-74-82

17. Ленкова Т.Н., Егорова Т.А. К вопросу нормирования обменной энергии в комбикормах для птицы // Птицеводство. 2022. №11. С. 44-48. https://doi.org/10.33845/0033-3239-2022-71-11-44-48

18. Валге А.М., Джабборов Н.И., Эвиев В.А. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на STATGRAPHICS и EXCEL (под ред. А.М. Валге). Санкт-Петербург: ИАЭП; Элиста: КалмГУ. 2015. 140 с.

REFERENCES

1. Shatskikh E.V., Volinkin V.V., Popkov N.V. Productivity indicators of broilers reared using different cage equipment. Agrarnyi vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals. 2016; (152): 72-77. (In Russ.) URL: https://agvu.urgau.ru/images/Agricultural_Journal/2016/10/14.pdf

2. Nozdrin A.E., Gudymenko V.I. Growing broiler chickens using new technology. Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2014;5: 60-62 (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22499668

3. Gamko L.N., Rybakov N.P., Gruzdova N.V. Efficiency of chickens-broilers rearing under floor and cage indoor treatment. Agrokonsul"tant = Agroconsultant. 2016;1(2016): 18-21 (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30763087

4. Reutova M.S., Kondratenko L.N. Growing broiler chickens at home. In: Mathematical modeling and information technology in the study of phenomena and processes in various spheres of activity. Proc. II Int. Sci. Prac. Conf. of students, undergraduates and graduate students / N.V. Tretyakova (ed.). Krasnodar: Novatsiya Publ. 2022: 267-272. (In Russ.)

5. Astrakhantsev A.A. Growing broiler chickens at different planting density in cage batteries. In: Actual problems and prospects of development of veterinary and zootechnical sciences. Proc. All-Russia Sci. Prac. Conf. with international participation. Cheboksary: Chuvash State Agricultural Academy. 2019: 187-192 (In Russ.)

6. Larionov K.A. Comparison of broiler chicken housing systems and their influence on growth and development of poultry // Scientific Works of Students of Izhevsk State Agricultural Academy. 2022; 1 (14): 934-937 (In Russ.) URL: http://nts-izhgsha.ru/assets/nauchtrudstud_1-2022.pdf

7. Gudymenko V.I., Nozdrin A.E. Progressive system of growing broiler chickens. Belgorod: Politerra. 2015. С. 128-131. (In Russ.)

8. Lyskin V.S., Semenchenko S.V., Nefedova V.N. Resource-saving technologies for growing broiler chickens // In the collection: Actual directions of innovative development of animal husbandry and modern technologies of food production. Materials of the international scientific-practical conference. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. Persianovsky Settl.: Don State Agrarian University. 2020: 64-67 (In Russ.)

9. Semenchenko S.V., Zasemchuk I.V. Efficiency of broiler cage rearing at different stocking densities // Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2021; 3 (89): 315-318 (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46363758

10. Soshnev D. A., Trifanov A. V., Sokolov A. M., Plaksin I. E. Efficiency of broiler farming in a process module. Journal of Agriculture and Environment. 2022; 4(24): (In Russ.) https://doi.org/10.23649/jae.2022.4.24.06.

11. Soshnev D. A., Trifanov A. V., Bazykin V. I., Plaksin I. E. Results of experimental and production check of the operation of the technological module for growing broilers. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2022; 3(112): 121-129. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-121-129

12. Methodology of energy analysis of technological processes in agricultural production. Moscow: VIM, TSNIIMEXH, VIESH. 1995. 96 p. (In Russ.)

13. Shpakov A.S., Prologova T.V., Volovik V.T. Agroenergetic analysis in specialized livestock farms. Moscow: V.R. Williams VIC. 2021. 96 p. (In Russ.) URL: https://new.ras.ru/work/publishing/authors/shpakov-a-s/

14. Bazarov E.I., Shirokov Y.A. Agrozooenergetics. Moscow: Agropromizdat. 1987 156 p. URL: https://www.studmed.ru/bazarov-ei-shirokov-yua-agrozooenergetika_723221c5d0b.html

15. Mishurov N.P. Bioenergetic assessment and main directions of energy intensity reduction in milk production. Moscow: Rosinformagroteh. 2010. 152 p.

16 Gorbatovsky A.V., Gorbatovskaya O.N., Timoshenko M.V. Bioenergetic efficiency of volume-planning and technological solutions in dairy cattle breeding: evaluation of variants, perspective models. Agrarnaya ekonomika = Agrarian Economics. 2022;(3):74-82. (In Russ.) https://doi.org/10.29235/1818-9806-2022-03-74-82

17. Lenkova, T.N., Egorova T.A. On the determination and correction of dietary levels of metabolizable energy for poultry. Ptitsevodstvo = Poultry Farming. 2022;11: 44-48 (In Russ.) https://doi.org/ 10.33845/0033-3239-2022-71-11-44-48

18. Valge A.M., Dzhabborov N.I., Eviev V.A. Fundamentals of statistical processing of experimental data for research in mechanisation of agricultural production with examples in STATGRAPHICS and EXCEL. Saint Petersburg: IEEP. Elista: Kalmyk Univ. Publ. 2015: 140. (In Russ.)

Об авторах	About the authors
Нозим Исмоилович Джабборов д-р техн. наук, профессор; ведущий научный сотрудник, Отдел агроэкологии в растениеводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия. nozimjon-59@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8910-2625	**Nozim I. Dzhabborov**, DSc (Engineering), professor, leading researcher, Department of Agroecology in Plant Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia nozimjon-59@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8910-2625
Дмитрий Александрович Сошнев, ведущий инженер, Отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия. soshnevdima@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7891-8397	**Dmitry A. Soshnev**, leading engineer, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia. soshnevdima@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7891-8397
Алексей Валериевич Трифанов, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия trifanovav@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3503-6148	**Alexey V. Trifanov,** Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor, leading researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia trifanovav@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3503-6148
Заявленный вклад авторов Н.И. Джабборов– научное руководство, формулирование концепции решения, моделирования процесса Д.А. Сошнев – анализ литературных источников, моделирование процесса, расчёт и анализ показателей А.В. Трифанов – постановка задачи, формулировка выводов	**Authors'contribution** N.I. Dzhabborov – scientific guidance, solution concept formulation, process modeling D.A. Soshnev – literature analysis, process modeling, calculation and analysis of indicators A.V. Trifanov – problem statement, formulation of conclusions

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 22.11.2023	**Received:** 22.11.2023
Одобрена после рецензирования: 19.12.2023	**Approved after reviewing:** 19.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Аналитическая статья
УДК 636.4; 502.13 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-113-129

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ НА СВИНОФЕРМАХ

Валентин Игоревич Базыкин✉

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

✉valentin-bazykin@mail.ru

Аннотация. По данным ФАО на животноводство приходится 14,5% антропогенных выбросов климатически активных (парниковых) газов. Отрасль свиноводства является вторым по величине источником выбросов этих газов в секторе животноводства. Цель исследования – изучение факторов, влияющих на уровень выбросов двуокиси углерода (CO_2), метана (CH_4), закиси азота (N_2O) и аммиака (NH_3) животными и навозом в животноводческих помещениях и рассмотрение возможных технико-технологических решений для снижения этого уровня при содержании свиней. Были проанализированы существующие технологические решения и приемы в рассматриваемой области для определения перспективных направлений работ и применен метод поисковых исследований. Выполнен обзор литературных источников, отражающих результаты исследований выбросов парниковых газов на свинофермах. Объем эмиссии газов из свиного навоза имеет тенденцию к росту пропорционально увеличению сроков его накопления в ваннах системы удаления навоза из животноводческих помещений. Уровни эмиссии CO_2, CH_4, N_2O и NH_3, могут изменяться под воздействием нескольких факторов, таких как технология и условия содержания животных, система удаления навоза и состав рациона. Рационально использование разделения навоза на твердую и жидкую фракции, что позволяет снизить

потребность в хранении, затраты на транспортировку, а также повышает агрономическую, энергетическую и экологическую эффективность процессов. Сформулированы рекомендации для разработки прогрессивных технологий очистки отработанного воздуха из животноводческих помещений свиноферм и комплексов. Наиболее эффективным способом удаления аммиака из выбросов является применение химических и биологических скрубберов. Для снижения выбросов климатически активных газов возможно использование подкисления навоза в навозоприемных ваннах внутри помещений для содержания животных.

Ключевые слова: сельское хозяйство, свиноводство, экологическая безопасность, парниковые газы, эмиссия

Для цитирования: Базыкин В.И. Способы снижения выбросов климатически активных газов на свинофермах // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С.113-130 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-113-129

Analytical article
Universal Decimal Code 636.4; 502.13

WAYS TO REDUCE EMISSIONS OF CLIMATE-ACTIVE GASES ON PIG FARMS

Valentin I. Bazykin✉

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia.

✉ valentin-bazykin@mail.ru

Abstract. According to FAO, the livestock production accounts for 14,5% of anthropogenic emissions of greenhouse gases. The pork industry is the second largest source of such emissions in the livestock sector. One study purpose was to review the factors influencing the generation of carbon dioxide (CO2), methane (CH4), nitrous oxide (N2O) and ammonia (NH3) by animals and manure in livestock houses. The second aim was to consider the possible technical and technological solutions to reduce the gas emissions in pig houses. The relevant existing solutions and techniques were analyzed to identify the promising ones. The exploratory research method was applied. The study reviewed the literature sources describing the research results on greenhouse gas emissions from pig farms. The gas emissions from pig manure tend to increase the longer it accumulates in the baths within the manure removal system from livestock houses. Emission levels of CO2, CH4, N2O and NH3 may vary due to several factors such as animal housing practices, manure handling and diet composition. Manure separation into solid and liquid fractions seems rational for use. This practice reduces the need for storage and transportation costs, and increases the agronomic, energy and environmental efficiency of the processes. The study formulated recommendations for the development of advanced technologies for purifying exhaust air from livestock houses on pig farms and complexes. The most effective way to remove ammonia from emissions is the use of chemical and biological scrubbers. The manure acidification in manure receiving baths inside livestock houses may be used to reduce emissions of climate-active gases.

Keywords: agriculture, pig breeding, environmental safety, climate-active gases, emissions.

For citation: Bazykin V.I. Ways to reduce emissions of climate-active gases on pig farms. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 113-130. (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-113-129

Введение. По данным ФАО в глобальном масштабе на животноводство приходится 14,5% антропогенных выбросов климатически активных (парниковых) газов. Свинина является наиболее широко потребляемым мясным продуктом в мире, а свиноводство является вторым источником выбросов парниковых газов в секторе животноводства. К 2030 году мировое потребление продовольствия, в том числе и свинины увеличится почти на 40%. Большая часть этого увеличения потребления придется на развивающиеся страны из-за демографического роста, изменений в пищевых предпочтениях и лучшего доступа к продуктам питания из-за интенсификации животноводческих систем вблизи растущего городского населения.[27]

Выбросы углекислого газа из свинарников образуются из двух источников: дыхание свиней и выделения из навоза. Прямые выбросы углекислого газа от животных и от навоза обычно исключаются из оценки парниковых газов, поскольку предполагается, что они компенсируются потреблением CO_2 за счет фотосинтеза растений, используемых в качестве корма.

Метан образуется в результате анаэробного разложения органических веществ бактериями в пищеварительном тракте свиней и в навозе. Уровень кишечного производства метана, в основном определяется содержанием клетчатки в рационе. Таким образом, повышенный уровень пищевых волокон связан с повышенной выработкой метана.

В свинарниках закись азота образуется только из навоза, накапливаемого в ваннах системы удаления навоза. Её образование в основном происходит во время неполных процессов нитрификации/денитрификации, осуществляемых микроорганизмами, которые обычно превращают аммиак в экологически чистый молекулярный азот (N_2).

Цель исследования – изучение факторов, в значительной степени влияющих на уровень выбросов двуокиси углерода (CO_2), метана (CH_4), закиси азота (N_2O) и аммиака (NH_3) животными и навозом в животноводческих помещениях и рассмотрение возможных технико-технологически решений для снижения выбросов этих газов при содержании свиней.

Материалы и методы. Для определения перспективных направлений разработки технико-технологических решений, обеспечивающих снижение выбросов вредных веществ при содержании свиней были проанализированы существующие технологические решения и приемы в рассматриваемой области и применен метод поисковых исследований.

В соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17*[28] снижение выбросов климатически активных газов на свиноводческих предприятиях в целом можно осуществить следующими способами:

[27] Сборник материалов по климатически оптимизированному сельскому хозяйству. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. 2018. 60 с. URL: https://www.fao.org/3/I7994RU/i7994ru.pdf

[28] Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета РД АПК 1.10.15.02-17* URL: https://docs.cntd.ru/document/495876346

1. При размещении площадок под сооружения по обработке и подготовке к использованию навоза и помёта должны соблюдаться нормируемые зооветеринарные расстояния от зданий и сооружений животноводческих ферм и комплексов, птицеводческих предприятий и расстояния до селитебной (санитарно-защитной) зоны. По периметру площадок сооружений следует предусматривать посадки зеленых насаждений, экранирующие и фильтрующие вредные выбросы.
2. Технологии обработки и использования навоза, помета и сточных вод должны обеспечивать уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет:
- проектирования минимальных площадей открытых накопителей навоза, помета, сточных вод;
- применения биологических, химических, физических и комбинированных методов обработки навоза, помета, сточных вод;
- внесения в навоз, помет и сточные воды различных дезодорирующих добавок (клиноптиломита, гашеной и негашеной извести, железного купороса, персульфата натрия, древесных опилок и др.).
3. При выбросах в атмосферу вентиляционного воздуха, содержащего вредные вещества, следует предусматривать рассеивание пылегазовых смесей, не допуская превышение предельно допустимых концентраций.
4. Для улавливания загрязняющих веществ или полного исключения их выбросов в атмосферный воздух следует предусматривать очистку вентиляционных выбросов с помощью механических или биологических фильтров, облучения ультрафиолетовыми лучами или обработки озоном, адсорбционных или абсорбционных способов и т.п.

В соответствии с РД-АПК 1.10.02.04-12[29], свиноводческие фермы и комплексы должны располагаться преимущественно таким образом, чтобы основное направление ветров было в противоположную от селитебной зоны сторону. При этом во всех случаях и во все периоды года концентрация загрязняющих веществ, выделяемых свиноводческой фермой (комплексом), на границе санитарно-защитной зоны не должна превышать совместно с фоновыми концентрациями значений, равных ПДК, установленных для атмосферного воздуха населенных мест.

На данный момент, в Российской Федерации практически отсутствуют научные исследования по направлению снижения выбросов климатических газов на свиноводческих предприятиях.

На территории РФ действует Федеральный закон №296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»[30] от 02.07.2021 г. С 01.03.2023 вступила в силу «Методика количественного определения объема выбросов парниковых газов», утвержденная приказом №371 Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27.05.2022 г.[31]

В Федеральном законе №296 от 02.07.2021 парниковыми (климатически активными) считаются газы «поглощающие и переизлучающие инфракрасное излучение».

[29] Методические рекомендации по технологическому проектированию свиноводческих ферм и комплексов РД-АПК 1.10.02.04-12. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200097957

[30] Федеральный закон №296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». URL: https://docs.cntd.ru/document/607142402

[31] Приказ № 371 Министерства природных ресурсов и экологии РФ «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». URL: https://docs.cntd.ru/document/350962750

Основными парниковыми (климатически активными) газами являются:

- углекислый газ CO_2;
- закись азота N_2O;
- метан CH_4;
- серы гексафторид SF_6;
- галогенорганические соединения.

Наиболее распространенными загрязняющими веществами, образующимися на свинофермах, являются газообразные соединения, такие как аммиак (NH_3), углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O) [1]. Объем выделения этих газов зависит от множества факторов: технология содержания животных, размер изолированных секций, количество поголовья в секции, система приточно-вытяжной вентиляции и т. д. В таблице 1 представлен диапазон выделения указанных веществ на свинофермах [2], а также их ПДК в соответствии с РД-АПК 1.10.02.04-12 и СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»[32].

Таблица 1. Диапазон выделения и ПДК вредных веществ в помещениях для содержания свиней

Table 1. Emission range and maximum permissible concentrations of harmful substances in pig houses

Наименование вещества	Диапазон выделения мг/м^3	ПДК в соотв. с РД-АПК 1.10.02.04-12, мг/м^3	ПДК в соотв. с СанПиН 1.2.3685-21, мг/м^3
Аммиак (NH_3)	1,43-62,2	20	20
Углерода диоксид (CO_2)	1848-9242	3697	9000
Метан (NH_4)	4,71-424	Не нормируется	7000
Азота диоксид (N_2O)	0,5-2,32	Не нормируется	2

Из представленной таблицы видно, что наибольшую опасность в животноводческих помещениях составляет аммиак и диоксид углерода. В свою очередь метан не нормируется РД-АПК 1.10.02.04-12 и не был включен в перечень маркерных загрязняющих веществ при актуализации справочника ИТС 41-2023 «Интенсивное разведение свиней»[33].

Загрязнение климатически активными газами, создаваемое свинофермами, может образовываться в результате жизнедеятельности животных и при обработке и хранении навоза на свиноферме. Выбросы климатически активных газов приводят ко многим экологическим проблемам, влияя на атмосферу, окрестности и здоровье персонала свинофермы.

Результаты. Аммиак и закись азота выбрасываются на всех этапах обращения с навозом, в то время как CO_2 образуется как при дыхании животных, так и при хранении навоза, а образование CH_4 происходит как в процессе пищеварения животных, так и от обращения с навозом. Выбрасываемый в атмосферу NH_3 вызывает обогащение питательными веществами и подкисление почвы и воды. Однако, NH_3 не считается климатически активным газом в отличие от некоторых

[32] СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115

[33] Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 41-2023 «Интенсивное разведение свиней». URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2094&etkstructure_id=1872

других загрязнителей, таких как CO_2, CH_4 и N_2O.

Очевидно, что загрязненный воздух свиноферм необходимо очищать, а системы вентиляции, используемые в настоящее время в свинарниках, не избавляют воздух одновременно от пыли, аммиака и запахов. Однако технологии очистки воздуха не должны способствовать образованию вторичных газовых примесей, которые могут оказывать более сильное воздействие на окружающую среду, чем исходные выбросы [2]. Биологическая очистка аммиака может способствовать образованию вторичных соединений, таких как N_2O. Поскольку закись азота имеет значительный удельный вес в эквиваленте среди климатически активных газов (1 грамм N_2O эквивалентен 298 граммам CO_2), то целесообразно производить очистку воздуха от аммиака.

Необходимо точно оценить потенциальное образование N_2O системами очистки воздуха. Таким образом возможно определить влияние систем очистки воздуха на общие выбросы парниковых газов на свинофермах.

Аммиак может нанести вред окружающей среде, поскольку он сопряжен с риском эвтрофикации и подкисления, что приводит к утрате биоразнообразия [3]. Около 94% выбросов аммиака происходит в результате сельскохозяйственной деятельности, поэтому необходимо внедрять технологии с низким уровнем выбросов аммиака [4].

Одним из способов снижения выбросов аммиака в животноводческих помещениях может быть реализация технико-технологического решения, снижающего микробиологическое разложение навоза, накапливающегося в навозоприемных ваннах в анаэробных условиях с помощью его подкисления раствором серной кислоты. Вентиляционные выбросы из навозоприемных ванн в данном случае предусмотрено очищать с помощью специального оборудования, в котором применяются растворы серной кислоты и щелочного раствора гипохлорида натрия [5]. На рисунке 1 представлен график, описывающий объем выделения аммиака из навоза с подкислением и без подкисления [5].

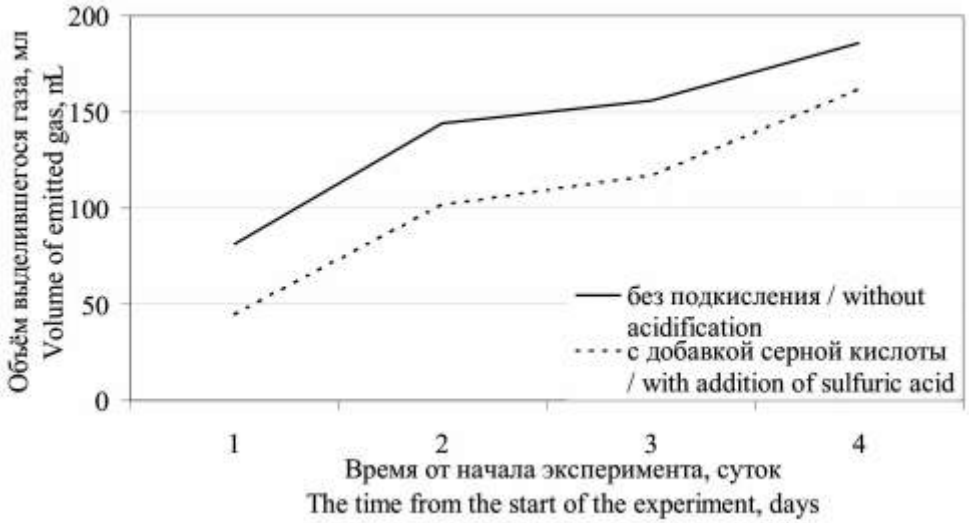


Рис. 1. Объём выделения газа из свиного навоза
Fig. 1. The amount of released gas from pig manure

Наибольший эффект от подкисления навоза достигается в течение трех суток, после чего эффективность подкисления начинает снижаться. Применение данного технологического решения позволит снизить количество выбросов из животноводческих помещений и улучшить экологическую обстановку на прилегающей к ним территории [5].

Исследованиями отечественных ученых установлено, что объем эмиссии газов из свиного навоза имеет тенденцию к росту пропорционально увеличению сроков его хранения, особенно в отапливаемых животноводческих помещениях. В помещениях с температурой воздуха 25˚С количество выделяющихся газов из навоза на четвертые сутки его хранения увеличивается на 230% [5]. При подкислении свиного навоза до 4,5 pH выделение аммиака из навоза снижается на 80-90%. В процессе хранения подкисленного навоза эмиссия газов из него увеличивается, однако остается на значительно более низком уровне относительно не подкисленного навоза [5].

Для реализации данного технологического решения необходима организация раздельной вентиляции в зоне обитания животных и из навозоприемных ванн. Из зоны обитания животных загрязненный воздух удаляет штатная система приточно-вытяжной вентиляции. Наиболее загрязненный воздух из навозоприемных ванн удаляется через вентиляционный канал в верхней части ванн и направляется на очистку химическим методом. Навоз в ваннах подкисляется раствором серной кислоты до показателя кислотности в 4,5-5 pH. 30% раствор серной кислоты подается из отдельного блока дозирования. Сущность процесса заключается в следующем: воздух проходя по газоходу, имеющему два участка, орошается растворами 2-3% серной кислоты и щелочного гипохлорида натрия из форсунок тонкого распыла. После орошения капли растворов собираются в сетчатых рукавах и сливаются в приемный навозосборник по дренажу. Очищенный воздух выбрасывается вентилятором на высоту 20 метров и рассеивается в атмосфере [5].

На свинокомлексе замкнутого цикла на 2500 основных свиноматок ООО «Грайворонский свинокомплекс» (Белгородская область) были проведены исследования и промышленные испытания микробиологических препаратов с целью изучения их влияния на титр группы бактерий кишечной палочки (ГКБП). Результаты исследований показали, что после обработки ванн навозоудаления препаратами концентрация аммиака в помещениях для содержания животных снизилась в 1,2-2,0 раза в зависимости от группы содержащихся животных [6].

По другим данным, препараты, подавляющие аммонификацию навоза, по результатам проведенного учеными исследования, позволяют сократить в три раза объем бесподстилочного навоза и затраты на его удаление, транспортировку и внесение в почву. При обработке препаратом станков для содержания свиней и щелевых полов улучшилось санитарное состояние производственных помещений, а концентрация аммиака в них снизилась с 0,029 мг/л до 0,01-0,015 мг/л. Улучшение показателей микроклимата в производственных помещениях позволило повысить продуктивность свиней на 10-15% и улучшить сохранность поголовья [7].

Анализ зарубежных исследований показал, что снижение выбросов аммиака из животноводческих помещений может быть достигнуто путем применения скрубберов воздуха, которые удаляют аммиак из выходящего вентиляционного воздуха

путем абсорбции водой с последующей химической и/или биологической конверсией и удалением конечных продуктов [8].

Для снижения выбросов NH_3 на свинофермах широко применяются различные решения для очистки воздуха: химические скрубберы, биоскрубберы и биофильтры.

В химическом скруббере (рис. 2) кислота (обычно серная кислота H_2SO_4) добавляется к промывочной воде для удаления аммиака из газового потока, после чего аммиак вступает в реакцию с образованием сульфата аммония $(NH_4)_2SO_4$. Подкисленная вода распыляется на верхнюю часть насадочного слоя, а отработанный воздух вводится либо снизу (режим противотока), либо горизонтально (режим поперечного тока), либо вверх, в зависимости от типа скруббера (горизонтальный или вертикальный). В качестве насадочного слоя могут применяться кольца Палля, шары и другие изделия из пластмассы и резины.

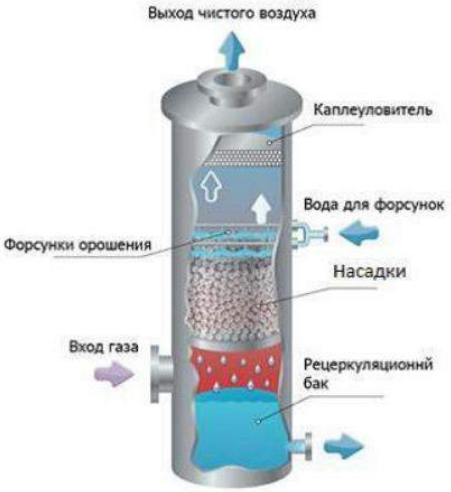


Рис. 2. Принципиальная схема химического скруббера
Fig. 2. Schematic diagram of a chemical scrubber

Часть промывочной воды рециркулирует снизу вверх колонны, тогда как другая часть сбрасывается и заменяется свежей промывочной жидкостью во избежание накопления $(NH_4)_2SO_4$. В процессе работы химические скрубберы не способствуют образованию закиси азота [9, 10].

В биофильтрах и биокапельных фильтрах, также называемых биоскрубберами, микроорганизмы фиксируются в подложке или на упаковочном материале. Очищаемый газовый поток вводят через уплотненный слой, и загрязняющие вещества переходят из газовой фазы в жидкую, а затем в биопленку, где они разлагаются микроорганизмами [11]. Аэробная нитрификация является естественным путем для автотрофных нитрифицирующих бактерий окислять NH_3 в NO_2, а затем в NO_3. Нитрификация в основном осуществляется видами Nitrosomonas и *Nitrobacter*, соответственно. Однако уплотнение среды с течением времени и/или неравномерное распределение влаги в среде приводят к образованию застойных зон, обедненных кислородом. В таких анаэробных условиях NO_3 может денитрифицироваться в N_2. По сути, закись азота является основным побочным продуктом процессов нитрификации/денитрификации сложными микробными сообществами в ответ на

колебания концентраций кислорода и закиси азота [12].

Косвенные выбросы в виде NO_x и аммиака образуются в результате потерь летучего азота. Часть выделяемого органического азота, которая минерализуется до аммонийного азота в процессе сбора и хранения навоза, зависит в основном от времени и в меньшей степени – от температуры [12]. Схематичное изображение образования N_2O в процессах нитрификации/денитрификации представлено на рисунке 3 [8].

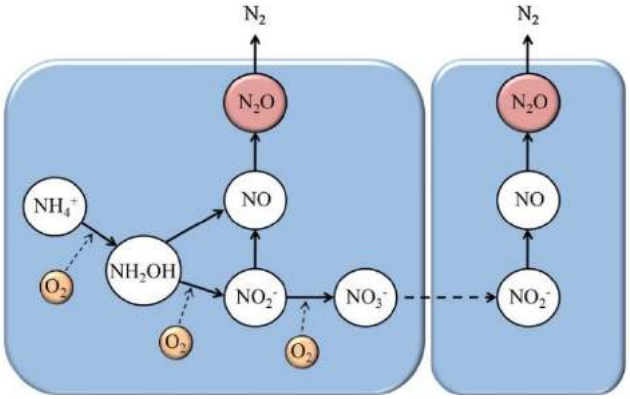


Рис. 3. Схематичное изображение образования N_2O в процессах нитрификации/денитрификации

Fig. 3. Schematic presentation of N_2O production in nitrification/denitrification processes

Работа биоскруббера аналогична работе химического скруббера, за исключением того, что промывочной жидкостью является вода, а аммиак удаляется биомассой, закрепленной на упаковочном материале. Поскольку высокие концентрации азота в циркулирующей жидкости могут ингибировать процесс нитрификации и ограничивать производительность биоскруббера, для удаления накопленных нитритов и нитратов из биоскруббера требуется регулярный сброс воды [13].

В некоторых научных работах сообщалось об увеличении концентрации закиси азота на выходе из биоскруббера от 200% до 400% [14, 15]. К полученным данным следует относиться с осторожностью, поскольку образование закиси азота может быть связано либо с поступлением аммиака, либо с его удалением биоскруббером. В биоскрубберах образование закиси азота может происходить как за счет процессов нитрификации, так и денитрификации. Дополнительная стадия обработки денитрификацией, используемая для уменьшения количества сбрасываемой воды, значительно увеличивает количество образованной закиси азота [16].

Что касается возможного удаления метана, результаты исследований из литературных источников указывают на то, что обработка биоскруббером не влияет на CH_4 из-за низкой растворимости метана в воде [17].

В биофильтрации участвуют микроорганизмы, иммобилизованные в виде биопленки на органическом материале, таком как торф, почва, компост или древесная щепа. При этом могут протекать те же биологические процессы, что и в биологических скрубберах. Однако продолжительность пребывания газа в пустом слое значительно выше в процессе биофильтрации, чем при работе биоскруббера [18-21].

В биофильтре ядром процесса является укрывной материал, который должен обеспечивать благоприятную среду с точки зрения влажности, температуры, pH, питательных веществ и снабжения кислородом. Для эффективности необходимо обеспечить оптимальное содержание влаги в фильтрующем слое. Считается, что диапазон 40–65% подходит для сред, обычно используемых в сельском хозяйстве [22]. При низком уровне влажности сообщается о значительном снижении эффективности удаления аммиака, в то время как избыточная влажность может привести к образованию анаэробных зон, способствующих денитрификации и образованию закиси азота [23].

В результате изучения процесса биофильтрации аммиака компостными биофильтрами было установлено, что содержание влаги около 48–52% подходит для поддержания высокого уровня удаления аммиака и низкого уровня образования закиси азота [24, 25].

Выбросы закиси азота при биофильтрации аммиака зависят от атмосферных и сезонных колебаний температуры воздуха. При этом зимние выбросы в два раза превышают летние [26]. Таким образом, можно утверждать, что биофильтрация не подходит для очистки выбросов на свинофермах от аммиака [27].

Дополнительные факторы, влияющие на образование климатически активных газов.

Выбросы климатически активных газов из свинарников зависят в том числе от типа пола, обращения с навозом и питания свиней. Параметры микроклимата в животноводческих помещениях также влияют на уровень выбросов.

Выбросы газов положительно связаны с температурой и интенсивностью вентиляции. Как правило, газообразные выбросы из свинарников имеют суточный характер вследствие комплексного воздействия температуры, скорости вентиляции и активности животных. Самые высокие уровни выбросов обычно наблюдаются во время кормления [28]. У свиней на откорме, которых кормят вволю, первый пик выбросов приходится на утро, а второй происходит во второй половине дня.

Устройство системы приточно-вытяжной вентиляции в животноводческих помещениях также способствует модуляции уровней выбросов. Приточные или вытяжные вентиляторы, расположенные вблизи поверхности пола, увеличивают уровень выбросов из-за большего потока воздуха на границе раздела [29].

Зарубежными учеными предложена высокая периодичность удаления навоза в качестве метода уменьшения выбросов в животноводческих помещениях. Еженедельное удаление навоза из ванн снижает уровень метана и закиси азота примерно на 10% по сравнению с традиционной периодичностью удаления [30]. Отмечается, что при удалении навоза из ванн три раза в неделю вместо одного, выбросы метана сокращались на 16%, а выбросы закиси азота оставались незначительными [31].

Обсуждение. В результате применения биосркубберов, годовой объем сбрасываемой воды в 10 раз выше, чем для химического скруббера, что, безусловно, является главным недостатком этой технологии. Если не брать во внимание стоимость отведения воды, затраты (инвестиционные и эксплуатационные расходы) биоскруббера с удалением 70% аммиака равны затратам кислотного скруббера с удалением 95% аммиака.

Тем не менее, промышленные скрубберы нуждаются в большем контроле для

достижения требуемой эффективности удаления аммиака. Кроме того, необходимо избегать образования вторичных соединений, таких как закись азота. Также следует отметить, что эти технологии не могут быть использованы для одновременного удаления аммиака, метана и закиси азота в связи с тем, что метан и закись азота малорастворимы в воде или кислых жидкостях. На сегодняшний день технология с применением скрубберов для очистки выбросов довольно дорога из-за высоких капиталовложений и эксплуатационных расходов (затраты на энергию, использование химикатов и фильтров, техническое обслуживание). Но в целом, оба технологических решения достаточно эффективны и широко применяются на практике.

При применении биофильтров эффективность удаления аммиака колеблется от 15% до 72%, что указывает на то, что биофильтрация не подходит для непосредственной обработки выбросов на свинофермах. Кроме того, было зарегистрировано образование закиси азота в процессе биофильтрации аммиака.

Экологически эффективными являются решения, которые сокращают выбросы климатически активных газов из навоза, сохраняют его энергетическую и агрономическую ценность и способствуют поглощению питательных веществ на следующих этапах. Среди многочисленных доступных методов анаэробное сбраживание навозных стоков с получением биогаза, богатого углекислым газом и метаном, дает возможность значительного сокращения выбросов парниковых газов за счет снижения выделения газов из навоза, производства возобновляемой энергии (электроэнергии и тепла) и замены потребления ископаемого топлива [32].

На образование выбросов в животноводческих помещениях также оказывают влияние рационы кормления свиней. Для снижения выбросов загрязняющих газов необходимо найти баланс между содержанием сырого протеина и клетчатки в рационе. На территории России данный метод практически не актуален в связи с тем, что у нас применяются стандартизированные рецептуры кормов.

Выводы. Были проанализированы результаты исследований, представленные в литературных источниках, выбросов парниковых газов в животноводческих помещениях. Углекислый газ является основным источником этих выбросов, составляя около 81%. Этот газ обычно не включают в расчет общих выбросов климатически активных газов, поскольку предполагается, что CO2, выделяемый домашним скотом, компенсируется в процессе фотосинтеза растениями, используемыми в качестве корма.

Уровни выбросов CO_2, CH_4, N_2O и NH_3, могут изменяться под воздействием нескольких факторов, таких как технология и условия содержания животных, периодичность удаления навоза из ванн и состав рациона.

Независимо от типа пола в помещениях для содержания свиней, частое удаление навоза снижает на 10-16% выбросы климатически активных газов в животноводческих помещениях, особенно метана, образование которого значительно увеличивается с течением времени и при высокой температуре окружающей среды. Для дальнейшего снижения выбросов от навоза, удаленного из свинарников рационально использовать разделение навоза на твердую и жидкую фракции, что позволит снизить потребность в хранении, затраты на транспортировку, а также повысить агрономическую,

энергетическую и экологическую эффективность процессов.

Сформулированы рекомендации для разработки прогрессивных технологий очистки отработанного воздуха свиноводческих предприятий.

Для снижения выбросов климатически активных газов, возможно использование подкисления навоза до 4,5 pH в навозоприемных ваннах внутри животноводческих помещений. При этом выделение аммиака из навоза снижается на 80-90%.

Надлежащая организация управления, учитывающая физиологические потребности животных и способствующая реализации их генетического потенциала, окажет положительное влияние на производительность и косвенно на интенсивность выбросов климатически активных газов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пилип Л.В. Метод очистки воздуха от запахообразующих веществ свинокомплексов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 4 (101). С. 137-146. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10221

2. Hamon L., Andrès Y., Dumont E. Aerial pollutants in swine buildings: a review of their characterization and methods to reduce them // Environmental Science and Technology. 2012. Vol. 46 (22). P. 12287-12301, https://doi.org/10.1021/es3025758

3. Melse R.W., Ogink N.W.M., Rulkens W.H. Overview of European and Netherlands' regulations on airborne emissions from intensive livestock production with a focus on the application of air scrubbers // Biosystems Engineering. 2009. Vol. 104 (3). P. 289-298, https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2009.07.009

4. Oenema O., Velthof G., Klimont Z., Winiwarter W. Emissions from agriculture and their control potentials TSAP Report 3 Version 2.1. (Amann M. ed.), IIASA; Service Contract on Monitoring and Assessment of Sectorial Implementation Actions. 2012. 45 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/281596136_

5. Терентьев Ю.Н., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Пилип Л.В. Снижение эмиссии запахообразующих веществ в условиях промышленных свиноводческих предприятий // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 113-120. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-113-120

6. Сидякин А.И., Тихонов В.В., Федин А.А. Использование микробных композиций "НПО БИОТЕХСОЮЗ" для ускоренной переработки навозных стоков свиноводческих комплексов в безопасные удобрения. В сб.: Отходы, причины их образования и перспективы использования: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. Л. С. Новопольцева; под ред. И. С. Белюченко. Краснодар: КубГАУ. 2019. С. 544-549. URL: http://www.ecokavkaz.ru/media/docs/conf/conf2019.pdf

7. Тарасов С.И. Эффективный способ снижения содержания аммиака в свинарниках // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 2 (34). С. 106-113. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38470681

8. Dumont É. Impact of the treatment of NH_3 emissions from pig farms on greenhouse gas emissions. Quantitative assessment from the literature data // New Biotechnology. 2018. Vol. 46. P. 31-37. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.06.001
9. Van der Heyden C., Brusselman E., Volcke E.I.P., Demeyer P. Continuous measurements of ammonia, nitrous oxide and methane from air scrubbers at pig housing // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 181. P. 163-171. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.006
10. Hahne J., Vorlop K.-D. Treatment of waste gas from piggeries with nitrogen recovery // Landbauforsch Völkenrode. 2001. Vol. 51(3). P. 121-130. URL: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/zi028322.pdf
11. Andres Y., Dumont E., Cloirec P.L., Ramirez-Lopez E. Wood bark as packing material in a biofilter used for air treatment // Environmental Technology. 2006. Vol. 27. P. 1297-1301. https://doi.org/10.1080/09593332708618747
12. Романовская А.А., Нахутин А.И., Гинзбург В.А., Грбар В.А., Имшенник Е.В., Карабань Р.Т., Коротков В.Н., Вертянкина В.Ю., Григурина Т.В., Говор И.Л., Литвинчук Г.Г., Лытов В.М., Полумиева П.Д., Попов Н.В., Трунов А.А., Прохорова Л.А. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 - 2020 гг. М.: ФГБУ «ИГКЭ». 2022. 468 с. URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf
13. Melse R.W., Ogink N.W.M. Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: review of on-farm research in the Netherlands // Transactions of ASAE. 2005. Vol. 48. P. 2303-2313. https://doi.org/10.13031/2013.20094
14. Mosquera J., Hol J.M.G., Melse R.W., Winkel A., Nijeboer G.M., Ploegaert J.P.M. et al. Fijnstofemissie uit stallen: luchtwassers = Dust emission from animal houses: air scrubbing techniques. Rapport 295. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research. 2011. 55 p. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93562472
15. Loyon L., Dupard P., Saint Cast P., Guiziou F.. Assessment of NH_3 reduction and N_2O production during treatment of exhausted air from fattening pigs building by a commercial scrubber // Agricultural Sciences. 2016. Vol.7 P. 693-709. https://doi.org/10.4236/as.2016.710065
16. Melse R.W., Mosquera J. Nitrous oxide (N_2O) emissions from biotrickling filters used for ammonia removal at livestock facilities // Water Science and Technology. 2014. Vol. 69 (5). P. 994-1003. https://doi.org/10.2166/wst.2013.826
17. Liu F., Fiencke C., Guo J., Rieth R., Cuhls C., Dong R. et al. Bioscrubber treatment of exhaust air from intensive pig production: Case study in northern Germany at mild climate condition // Engineering in Life Sciences. 2017. Vol.17. P. 458-466. https://doi.org/10.1002/elsc.201600169
18. Van der Heyden C., Demeyer P., Volcke E.I.P. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives // Biosystems Engineering. 2015. Vol.134. P. 74-93. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.002
19. Bollon J., Filali A., Fayolle Y., Guerin S., Rocher V., Gillot S.. N_2O emissions from full-scale nitrifying biofilters // Water Research. 2016. Vol. 102. P. 41-51. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.091
20. Maia G.D.N., Day V.G.B., Gates R.S., Taraba J.L. Ammonia biofiltration and nitrous oxide generation during the start-up of gas-phase compost biofilters // Atmospheric Environment. 2012. Vol. 46. P. 659-664. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.019

21. Yang L., Wang X., Funk T.L. Strong influence of medium pH condition on gas-phase biofilter ammonia removal, nitrous oxide generation and microbial communities // Bioresourse Technology. 2014. Vol.152. P. 74-79. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.116
22. Chen L., Hoff S. Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters // Applied Engineering in Agriculture. 2009. Vol. 25(5). P. 751-766. https://doi.org/10.13031/2013.28854
23. Nicolai R.E., Janni K.A. Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors // Water Science and Technology. 2001. Vol. 44 (9). P. 261-267. https://doi.org/10.2166/wst.2001.0554
24. Maia G.D.N., Day V.G.B., Gates R.S., Taraba J.L., Coyne M.S. Moisture effects on greenhouse gases generation in nitrifying gas-phase compost biofilters // Water Research. 2012. Vol. 46 (9). P. 3023-3031. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.007
25. Yang L., Kent A.D., Wang X., Funk T.L., Gates R.S., Zhang Y. Moisture effects on gas-phase biofilter ammonia removal efficiency, nitrous oxide generation, and microbial communities // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 271. P. 292-301. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.058
26. Frutos O.D., Quijano G., Pérez R., Muñoz R. Simultaneous biological nitrous oxide abatement and wastewater treatment in a denitrifying off-gas bioscrubber // Chemical Engineering Journal. 2016. Vol. 288. P. 28-37. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.088
27. Girard M., Ramirez A.A., Buelna G., Heitz M. Biofiltration of methane at low concentrations representative of the piggery industry – Influence of the methane and nitrogen concentrations // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol. 168 (1). P. 151-158. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.12.054
28. Moehn S., Bertolo R., Pencharz P., Ball R. Pattern of carbon dioxide production and retention is similar in adult pigs when fed hourly, but not when fed a single meal // BMC Physiology. 2004. Vol. 4, 11. https://doi.org/10.1186/1472-6793-4-11
29. Hayes E.T., Curran T.P., Dodd V.A. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland // Bioresource Technology. 2006. Vol. 97 (7). P. 940-948. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.023
30. Osada T., Rom H.B., Dahl P. Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection // Transactions of the ASAE. 1998. Vol. 41 (4). P. 1109-1114. https://doi.org/10.13031/2013.17256
31. Lavoie J., Beaudet Y., Létourneau C., Godbout S., Lemay S., Belzile M., Lachance I., Pouliot F. Evaluation de la qualité de l'air dans les porcheries équipées d'un système de séparation liquide-solide des déjections. Report R-460. Montréal, QC, Canada: IRSST. 2006. 43 p. URL: https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-460.pdf
32. Kaparaju P., Rintala J. Mitigation of greenhouse gas emissions by adopting anaerobic digestion technology on dairy: sow and pig farms in Finland // Renewable Energy, 2011. Vol. 36 (1). P. 31-41. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.05.016

REFERENCES

1. Pilip L.V. Method of air cleaning from odor-forming substances originating from pig complexes. Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop

and livestock production. 2019;4(101):137-146. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10221
2. Hamon L., Andrès Y., Dumont E. Aerial pollutants in swine buildings: a review of their characterization and methods to reduce them. Environmental Science and Technology. 2012; 46 (22):12287-12301 (In Eng.) https://doi.org/10.1021/es3025758
3. Melse R.W., Ogink N.W.M., Rulkens W.H. Overview of European and Netherlands' regulations on airborne emissions from intensive livestock production with a focus on the application of air scrubbers. Biosystems Engineering. 2009; 104 (3): 289-298, (In Eng.) https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2009.07.009
4. Oenema O., Velthof G., Klimont Z., Winiwarter W. Emissions from agriculture and their control potentials TSAP Report 3 Version 2.1. (Amann M. ed.), IIASA; Service Contract on Monitoring and Assessment of Sectorial Implementation Actions. 2012. 45 p. (In Eng.) URL: https://www.researchgate.net/publication/281596136_
5. Terentyev Y.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Y., Pilip L.V. Reducing the emission of odorous substances in industrial pig breeding enterprises. Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology. 2019;(2):113-120. (In Russ.) https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-113-120
6. Sidyakin A.I., Tikhonov V.V., Fedin A.A. Use of microbial compositions of the research and production association "BIOTECHSOYUZ" for accelerated processing of manure waste flows of pig-breeding complexes into harmless fertilizers. In: Waste, reasons for its formation and prospects for utilisation. Proc. of Int. Sci. Ecol. Conf. (L.S. Novopoltseva, compiler; I.S. Belyuchenko, ed.). 2019:544-549. (In Russ.) URL: http://www.ecokavkaz.ru/media/docs/conf/conf2019.pdf
7. Tarasov S.I. The effective way of the ammonia content in pigsties reducing. Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva = Bulletin of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization. 2019;2(34):106-113. (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38470681
8. Dumont É. Impact of the treatment of NH_3 emissions from pig farms on greenhouse gas emissions. Quantitative assessment from the literature data. New Biotechnology. 2018; 46: 31-37. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.06.001
9. Van der Heyden C., Brusselman E., Volcke E.I.P., Demeyer P. Continuous measurements of ammonia, nitrous oxide and methane from air scrubbers at pig housing. Journal of Environmental Management. 2016; 181: 163-171. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.006
10. Hahne J., Vorlop K.-D. Treatment of waste gas from piggeries with nitrogen recovery. Landbauforsch Völkenrode. 2001; 51(3): 121-130 (In Germ.) URL: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/zi028322.pdf
11. Andres Y., Dumont E., Cloirec P.L., Ramirez-Lopez E. Wood bark as packing material in a biofilter used for air treatment. Environmental Technology. 2006; 27: 1297-1301. (In Eng.) https://doi.org/10.1080/09593332708618747
12. Romanovskaya A.A., Nakhutin A.I., Ginzburg V.A., Grbar V.A., Imshennik E.V., Karaban R.T., Korotkov V.N., Vertyankina V.Yu., Grigurina T. .V., Govor I.L., Litvinchuk G.G., Lytov V.M., Polumieva P.D., Popov N.V., Trunov A.A., Prokhorova L.A. The national report on the inventory of the anthropogenic emissions and sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the years 1990-2020. Moscow: Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. 2022. 468 p. (In Russ.) URL: http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf

13. Melse R.W., Ogink N.W.M. Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: review of on-farm research in the Netherlands. Transactions of ASAE. 2005; 48: 2303-2313. (In Eng.) https://doi.org/10.13031/2013.20094
14. Mosquera J., Hol J.M.G., Melse R.W., Winkel A., Nijeboer G.M., Ploegaert J.P.M. et al. Fijnstofemissie uit stallen: luchtwassers = Dust emission from animal houses: air scrubbing techniques. Rapport 295. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research. 2011. 55 p. (in Dutch) https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93562472
15. Loyon L., Dupard P., Saint Cast P., Guiziou F.. Assessment of NH_3 reduction and N_2O production during treatment of exhausted air from fattening pigs building by a commercial scrubber. Agricultural Sciences. 2016;7: 693-709. (In Eng.) https://doi.org/10.4236/as.2016.710065
16. Melse R.W., Mosquera J. Nitrous oxide (N_2O) emissions from biotrickling filters used for ammonia removal at livestock facilities. Water Science and Technology. 2014; 69 (5): 994-1003. (In Eng.) https://doi.org/10.2166/wst.2013.826
17. Liu F., Fiencke C., Guo J., Rieth R., Cuhls C., Dong R. et al. Bioscrubber treatment of exhaust air from intensive pig production: Case study in northern Germany at mild climate condition. Engineering in Life Sciences. 2017;17: 458-466. (In Eng.) https://doi.org/10.1002/elsc.201600169
18. Van der Heyden C., Demeyer P., Volcke E.I.P. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives. Biosystems Engineering. 2015; 134: 74-93. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.002
19. Bollon J., Filali A., Fayolle Y., Guerin S., Rocher V., Gillot S.. N_2O emissions from full-scale nitrifying biofilters. Water Research. 2016; 102: 41-51. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.091
20. Maia G.D.N., Day V.G.B., Gates R.S., Taraba J.L. Ammonia biofiltration and nitrous oxide generation during the start-up of gas-phase compost biofilters. Atmospheric Environment. 2012; 46: 659-664. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.019
21. Yang L., Wang X., Funk T.L. Strong influence of medium pH condition on gas-phase biofilter ammonia removal, nitrous oxide generation and microbial communities. Bioresourse Technology. 2014;152: 74-79. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.116
22. Chen L., Hoff S. Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters. Applied Engineering in Agriculture. 2009; 25(5): 751-766. (In Eng.) https://doi.org/10.13031/2013.28854
23. Nicolai R.E., Janni K.A. Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors. Water Science and Technology. 2001; 44 (9): 261-267. (In Eng.) https://doi.org/10.2166/wst.2001.0554
24. Maia G.D.N., Day V.G.B., Gates R.S., Taraba J.L., Coyne M.S. Moisture effects on greenhouse gases generation in nitrifying gas-phase compost biofilters. Water Research. 2012; 46 (9): 3023-3031. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.007
25. Yang L., Kent A.D., Wang X., Funk T.L., Gates R.S., Zhang Y. Moisture effects on gas-phase biofilter ammonia removal efficiency, nitrous oxide generation, and microbial communities. Journal of Hazardous Materials. 2014; 271: 292-301. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.058
26. Frutos O.D., Quijano G., Pérez R., Muñoz R. Simultaneous biological nitrous oxide abatement and wastewater treatment in a denitrifying off-gas bioscrubber. Chemical Engineering Journal. 2016; 288: 28-37. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.088

27. Girard M., Ramirez A.A., Buelna G., Heitz M. Biofiltration of methane at low concentrations representative of the piggery industry – Influence of the methane and nitrogen concentrations. Chemical Engineering Journal. 2011; 168 (1): 151-158. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.12.054
28. Moehn S., Bertolo R., Pencharz P., Ball R. Pattern of carbon dioxide production and retention is similar in adult pigs when fed hourly, but not when fed a single meal. BMC Physiology. 2004; 4, 11. (In Eng.) https://doi.org/10.1186/1472-6793-4-11
29. Hayes E.T., Curran T.P., Dodd V.A. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland. Bioresource Technology. 2006; 97 (7): 940-948. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.023
30. Osada T., Rom H.B., Dahl P. Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection. Transactions of the ASAE. 1998; 41 (4): 1109-1114. (In Eng.) https://doi.org/10.13031/2013.17256
31. Lavoie J., Beaudet Y., Létourneau C., Godbout S., Lemay S., Belzile M., Lachance I., Pouliot F. Evaluation de la qualité de l'air dans les porcheries équipées d'un système de séparation liquide-solide des déjections. Report R-460. Montréal, QC, Canada: IRSST. 2006. 43 p. (In French) URL: https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-460.pdf
32. Kaparaju P., Rintala J. Mitigation of greenhouse gas emissions by adopting anaerobic digestion technology on dairy: sow and pig farms in Finland. Renewable Energy. 2011; 36 (1): 31-41. (In Eng.) https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.05.016

Об авторах	**About the authors**
Валентин Игоревич Базыкин, научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия. valentin-bazykin@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6417-6433	**Valentin I. Bazykin**, researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia valentin-bazykin@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6417-6433
Заявленный вклад авторов В.И. Базыкин – создание рукописи	**Authors'contribution** V.I. Bazykin – crafting the manuscript
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	Author have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 10.11.2023	**Received:** 10.11.2023
Одобрена после рецензирования: 19.12.2023	**Approved after reviewing:** 19.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 636.5.033 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-130-141

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ МЕТАНА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПИЩЕВЫХ КУРИНЫХ ЯИЦ И МЯСА ЦЫПЛЯТ-БРОЙЛЕРОВ

Илья Евгеньевич Плаксин[1]✉, Алексей Валериевич Трифанов[2]

[1,2]Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

✉ilyaplaxin@gmail.com

Аннотация. В структуре потребления мяса на душу населения в год, мясо птицы находится на первом месте с показателем 34,9 кг, из которых более 94% приходится на цыплят-бройлеров. Производство пищевых яиц также в основном представлено куриными яйцами, доля которых от общего производства составляет 96%, или 44,3 млрд. штук в натуральном выражении. Большая часть мяса цыплят-бройлеров и пищевых куриных яиц производится на крупных птицеводческих предприятиях, доля которых составляет 92,8% и 81,8% соответственно. Ввиду высокой интенсивности производства, лучших санитарно-гигиенических условий содержания, а также низких производственных издержек, обусловленных высокой степенью автоматизации и роботизации производственных процессов, доля крупнотоварных птицеводческих предприятий будет увеличиваться. Хозяйства данной категории предусматривают содержание большого поголовья птиц на ограниченной территории, что приводит к интенсивному загрязнению атмосферного воздуха, поверхностных и грунтовых вод. Одним из основных загрязнителей, попадающих в атмосферу в результате жизнедеятельности птиц, являются выбросы метана. Исследования были нацелены на разработку методики определения количества выбросов метана при производстве мяса цыплят-бройлеров и пищевых куриных яиц. Для определения общего количества выбросов метана данный показатель устанавливался для каждой половозрастной группы птиц, задействованной в производственном процессе. Выбросы метана определяли исходя из статистических данных по общему производству рассматриваемых видов продукции. В результате исследований была предложена методика расчета выбросов метана при производстве пищевых куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров, а также получены значения выбросов метана при данных видов продукции, соответственно, составившие 7,691 и 17,29 Гга/год. Определена доля суммарных выбросов метана при производстве куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров в общем объеме выбросов метана от животноводческой отрасли, составившая 0,64%.

Ключевые слова: сельское хозяйство, животноводство, птицеводство, птицеводческие комплексы, загрязнение воздуха, метан

Для цитирования: Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Методика определения выбросов метана при производстве пищевых куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С.130-141 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-130-141

Research article
Universal Decimal Code 636.5.033

ESTIMATION PROCEDURE OF METHANE EMISSIONS IN PRODUCTION OF CHICKEN EGGS AND BROILER CHICKEN MEAT

Ilya E. Plaksin[1]✉, Alexey V. Trifanov[2]

[1,2]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia.

✉ilyaplaxin@gmail.com

Abstract. In per capita meat consumption per year structure, the poultry meat is in the first place with an indicator of 34.9 kilograms, of which above 94% account for broiler chickens. Chicken eggs also represent the edible eggs production. Their share of total production is 96% or 44.3 billion pieces in natural units. Most broiler chicken meat and edible chicken eggs are produced at large poultry enterprises, the share of which is 92.8% and 81.8%. This share is expected only increase owing to high production intensity, better sanitary and hygienic conditions, and low production costs due to the high degree of automation and robotization of production processes. These enterprises tend to house a big number of poultry on a limited area causing intense pollution of atmospheric air, surface and ground water. Methane emissions are among the main atmospheric pollutants resulting from the life activity of poultry (enteral fermentation, in particular). The research aimed to develop a method for determining the amount of methane emissions in the production of broiler chicken meat and edible chicken eggs. To estimate the total amount of methane emissions, they were calculated for each gender and age group of poultry involved in the production process by the statistical data on the total production of the considered types of products. The research resulted in a calculation method for methane emissions. The values obtained amounted to 7.691 Gg/year in edible chicken eggs production and 17.29 Gg/year in broiler chicken meat production. The share of total methane emissions during the production of these products in the total volume of methane emissions from the livestock industry was determined to be 0.64%.

Key words: agriculture, animal husbandry, poultry farming, poultry complexes, air pollution, methane.

For citation: Plaksin I.E., Trifanov A.V. Estimation procedure of methane emissions in production of chicken eggs and broiler chicken meat. AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 130-141. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-130-141

Введение. Птицеводство – отрасль животноводства, занимающаяся разведением и использованием различных видов сельскохозяйственной птицы для производства яиц, мяса, пуха и пера. Птицеводство является ведущим поставщиком полноценного животного белка в рационе питания людей. В структуре потребления мяса на душу населения в год, мясо птицы находится на первом месте с показателем 34,9 кг, далее следует свинина – 29,8 кг, на третьем месте говядина – 12,3 кг, потребление баранины составляет 1,4 кг, а потребление

других видов мяса не превышает 0,5 кг. Потребление пищевых яиц ежегодно растет: в 2022 году данный показатель составил 308 штук на человека в год. Высокий спрос потребительского рынка на птицеводческую продукция объясняется ее биологической полноценностью, вкусовыми качествами и низкой стоимостью. В структуре производства мяса птицы лидирующие позиции занимает мясо цыплят-бройлеров, доля которого составляет 94 % или 6616,3 тыс. тонн в натуральном выражении. Производство мяса цыплят бройлеров по категориям хозяйств распределено следующим образом: сельскохозяйственные организации – 92,8 %, крестьянско-фермерские хозяйства и индивидуальные предприниматели – 1,1 % и хозяйства населения (личные подсобные хозяйства) – 6,1 % [1]. Производство пищевых яиц в основном представлено куриными яйцами, доля которых от общего производства составляет 96 % или 44,3 млрд. штук. По категориям хозяйств производство куриных яиц распределено следующим образом: 81,8 % – крупные сельскохозяйственные организации, 1,3 % – крестьянско-фермерские хозяйства и индивидуальные предприниматели, 16,9 % – хозяйства населения (личные подсобные хозяйства)[34].

По дальнейшим прогнозам, доля крупных птицеводческих предприятий будет увеличиваться ввиду высокой интенсивности производства, лучших санитарно-гигиенических условий содержания, а также низких производственных издержек, обусловленных высокой степенью автоматизации и роботизации производственных процессов [2-5]. Однако, производство продукции на крупных птицеводческих комплексах предусматривает содержание большого поголовья птиц на ограниченной территории, что влечет за собой интенсивное загрязнение атмосферного воздуха, поверхностных и грунтовых вод [6,7]. Одним из основных загрязнителей, попадающих в атмосферу в результате жизнедеятельности птиц (в частности, энтеральной ферментации), являются выбросы климатически активных газов, в том числе метана.

Целью исследований являлась разработка методики определения количества выбросов метана при производстве мяса цыплят-бройлеров и пищевых куриных яиц

Материалы и методы исследований. Для разработки методики определения количества выбросов метана от энтеральной ферментации при производстве мяса цыплят-бройлеров и пищевых куриных яиц, учитывающей количество птиц каждой половозрастной группы, а также показатели среднесуточного потребляемого ими корма за производственный цикл был применен метод поисковых исследований, позволяющий проанализировать нормативные и экспериментальные данные, полученные ранее, а также сформулировать концепцию разрабатываемой методики.

Для непосредственного определения количества выбросов метана от энтеральной ферментации при производстве мяса цыплят-бройлеров и пищевых куриных яиц применялся расчетный метод, учитывающий статистические значения производственного объема данной продукции.

[34] Маркетинговые исследования. Рынок яиц и меланжа за 2018-2022 гг. [Электронный ресурс] http://ikc.belapk.ru/upload/iblock/f7f/f7fd7d9f29df088dc231a614d4049ed2.pdf?ysclid=lmoq11sjww738497570 (дата обращения 03.11.2023 г.)

Результаты и обсуждение. Для определения общего количества выбросов метана необходимо определение данного показателя для каждой половозрастной группы птиц, задействованной в производственном процессе. Определение выбросов метана при производстве куриных пищевых яиц производилось исходя из статистических данных по общему производству данного вида продукции в Российской Федерации[35,36].

Исходя из статистических данных по общему количеству пищевых куриных яиц, составляющему 44,3 млрд. штук, определим необходимое поголовье каждой половозрастной группы птиц, задействованной в производственном процессе.

Определение поголовья промышленного стада кур-несушек для производства заданного количества яиц осуществляется по выражению:

$$N_{п.с.} = \frac{v_{п.я.}}{j},$$

где: $N_{п.с.}$ – поголовье промышленного стада кур-несушек, (гол.), $v_{п.я.}$ – объем производства куриный пищевых яиц в год, (шт.), j – яйценоскость (шт/гол/г.), которую принимаем за 313 штук на голову в год.

Для пополнения промышленного стада кур-несушек вследствие падежа и выбраковки необходимо определить количество суточных цыплят по выражению:

$$N_ц = N_{п.с.} \cdot k_{в.п.} \cdot k_{в.п.},$$

где: $N_ц$ – количество цыплят для пополнения промышленного стада, (гол.), $k_{в.п.}$ – коэффициент вывода петушков (принимается равным 2); $k_{в.п.}$– коэффициент выбраковки и падежа (принимается равным 1,3).

Зная необходимое количество суточный цыплят, было определено количество яиц необходимых для их выведения с учетом коэффициентов оплодотворенности и вывода молодняка:

$$N_я = \frac{k_{в.м.} \cdot N_ц}{k_o},$$

где: $N_я$– количество яиц для получения стада суточных цыплят, (шт.), k_o – коэффициент оплодотворенности (принимается равным 0,95), $k_{в.м.}$– коэффициент вывода молодняка (принимается равным 0,8).

Зная общее количество яиц, была определена суточная потребность в яйце с учетом срока хранения яиц не более десяти дней и коэффициента пригодности яиц для инкубации, равного 0,85:

$$J_c = \frac{k_п \cdot N_я}{t_x},$$

где: $k_п$– коэффициент пригодности яиц для инкубации; t_x– срок хранения яиц, дни.

Исходя из полученных данных по суточной потребности в яйце определялось поголовье кур-несушек родительского стада с учетом значения средней яйценоскости:

$$N_{к.н.} = \frac{365 \cdot J_c}{j},$$

где: $N_{к.н.}$– количество кур несушек родительского стада, (гол); J_c– суточная потребность в яйце, (шт.).

---

[35] Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. О развитии отрасли птицеводства. [Электронный ресурс] https://mcx.gov.ru/upload/iblock/f25/f25e95d9016fc8d3f303f756b61ce0f0.pdf?ysclid=lmoq3mczu323553405 (дата обращения 03.11.2023 г.)

[36] Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Состояние птицеводства в Российской Федерации [Электронный ресурс] https://mcx.gov.ru/upload/iblock/9e1/yg1qims4317n0h9l96yrqoz42fwelh0t.pptx?ysclid=lmoq7qi2s4807138336 (дата обращения 03.11.2023 г.)

Также определялось необходимое поголовье петухов ($N_{к.п.}$) исходя из соотношения петухов к курам-несушкам, равного 1/10:

$$N_{к.п.} = \frac{N_{к.н.}}{10}$$

Полученные в результате расчётов значения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Поголовье различных половозрастных групп при производстве куриных яиц
Table 1. The stock of various gender and age groups in the chicken eggs production

Наименование половозрастной группы	Промышленное стадо кур-несушек	Суточные цыплята	Родительское стадо кур-несушек	Родительское стадо петухов
Поголовье, (гол)	141533546	367987220	66427628	6642762

Для определения выбросов метана при производстве заданного количества куриных яиц необходимо определить коэффициенты выброса метана для каждой половозрастной группы птиц, задействованной при производстве продукции по выражению:

$$EF = \frac{E_{об.} \cdot m_{сред.сут.кор.} \left(\frac{Y_м}{100} \cdot T_ц\right)}{55{,}65}, \qquad (1)$$

где: EF – коэффициент выброса метана, (кгCH_4/гол*год); $E_{об.}$ – обменная энергия, (МДж/кг); $m_{сред.сут.кор.}$ – среднесуточное потребление корма животным в определенной половозрастной группе, (кг); $T_ц$ – время нахождения животного в определенном периоде производственного цикла, (сут.); $Y_м$ – коэффициент преобразования метана, процентная доля валовой энергии, преобразованная в метан; 55,65 (МДж/кг CH_4) – коэффициент энергосодержания метана.

Согласно ГОСТ 18221-2018 «Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы», показатели обменной энергии каждой возрастной группы птиц приведены в таблице 2[37]. На основе анализа нормативных данных, а также данных проведенных ранее исследований были определены показатели среднесуточного потребления корма каждой возрастной группой птиц, приведённые в таблице 2 [8]. По выражению (1) используя показатели обменной энергии и среднесуточного потребления корма определены значения коэффициентов выброса метана от каждой половозрастной группы птиц задействованных при производстве куриных яиц (Таблица 2).

[37] ГОСТ 18221—2018 Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы [Электронный ресурс] https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293735/4293735613.pdf?ysclid=lr685b3yd8116743621 (дата обращения 03.11.2023 г.)

Таблица 2. Обменная энергия, среднесуточное потребление корма и коэффициент выброса метана при энтеральной ферментации различных половозрастных групп птиц
Table 2. Metabolic energy, average daily feed consumption and methane emission coefficient during enteral fermentation of various gender and age groups of poultry

Показатели	Половозрастная группа					
	Цыплята от 1 до 7 дней	Молодняк кур от 1 до 7 недель	Молодняк кур от 7 до 13 недель	Молодняк кур от 13 до 17 недель	Куры несушки от 20 до 47 недель	Куры несушки старше 47 недель
Обменная энергия, (МДж/кг)	12,14	12,14	11,3	10,88	11,3	10,88
Среднесуточное потребление корма, (кг)	0,023	0,048	0,075	0,086	0,110	0,125
Коэффициент выброса метана	0,0002	0,0026	0,0038	0,0028	0,025	0,0051

Количество выбросов метана каждой возрастной группой птиц определяется выражением:

$$N_{в.м.} = 10^{-6} \cdot EF \cdot N_{п.в.г.}, \quad (2)$$

где: $N_{в.м.}$ – количество выбросов метана каждой возрастной группой птиц при производстве пищевых куриных яиц, (г/сутки); $N_{п.в.г.}$– поголовье каждой возрастной группы птиц, (гол.).

Для определения поголовья каждой возрастной группы птиц, соответствующей значению коэффициента выброса метана, необходимо учитывать нормативы падежа птиц различного возраста при производстве куриных яиц: молодняк промышленного стада в возрасте 1-7 дней – 5 %; ремонтный молодняк: в возрасте 1-7 недель – 3,5 %, в возрасте 7-13 недель – 3 %, в возрасте 13-17 недель – 3 %, в возрасте старше 17 недель – 5 %, куры взрослые: промышленного стада – 5 %, родительского стада – 5 %.

Запишем выражения для определения поголовья молодняка промышленного стада:

$$N_{ц.с.} = \frac{N_ц}{k_{в.п.}} \quad (3)$$

$$N_{ц.1-7\ нед.} = N_{ц.с.} \cdot (100 - k_{п.1-7\ нед}) \quad (4)$$

$$N_{ц.7-13\ нед.} = N_{ц.1-7\ нед.} \cdot (100 - k_{п.7-13\ нед}) \quad (5)$$

$$N_{ц.13-17\ нед.} = N_{ц.7-13\ нед.} \cdot (100 - k_{п.13-17\ нед}), \quad (6)$$

где: $N_{ц.с.}$, $N_{ц.1-7\ нед.}$, $N_{ц.7-13\ нед.}$, $N_{ц.13-17\ нед.}$ – поголовье различных половозрастных групп молодняка промышленного стада птицы при производстве куриных яиц, (гол); $k_{п.1-7\ нед}$, $k_{п.7-13\ нед}$, $k_{п.13-17\ нед}$ – коэффициент падежа различных половозрастных групп промышленного стада птицы при производстве куриных яиц.

Общее поголовье взрослых кур-несушек промышленного и родительского стада, а также петухов определяется по выражениям:

$$N_{н.п.р.п.} = N_{п.с.} + N_{к.н.} + N_{к.п.} \quad (7)$$

$$N_{н.п.р.п.20-47\ нед.} = N_{н.п.р.п.} \cdot (100 - k_{п.20-47\ нед}) \quad (8)$$

$$N_{н.п.р.п.>47\ нед.} = N_{н.п.р.п.20-47\ нед.} \cdot (100 - k_{п.>47\ нед}), \quad (9)$$

где: $N_{н.п.р.п.}$, $N_{н.п.р.п.20-47\ нед.}$, $N_{н.п.р.п.>47\ нед.}$ – поголовье различных половозрастных групп взрослых птиц при производстве куриных яиц, (гол); $k_{п.20-47\ нед}$, $k_{п.>47\ нед}$ – коэффициент падежа различных половозрастных групп взрослых птиц при производстве куриных яиц

Используя выражения (3-9) и нормативные показатели падежа и расчетные значения поголовья различных половозрастных групп птиц, определено поголовье каждой половозрастной группы птиц, задействованных при производстве куриных яиц (Таблица 3). Подставив значения, приведенные в таблице 3 в выражении (2) был определен выброс метана каждой половозрастной группой птиц при производстве куриных яиц (Таблица 3).

Таблица 3. Поголовье различных половозрастных групп птиц и выбросы метана от энтеральной ферментации.

Table 3. The stock of different gender and age groups of poultrys and methane emissions from enteral fermentation

Половозрастная группа	Количество, гол.	Выбросы метана, гГ/год
Суточные цыплята	183993610	0,037
Цыплята в возрасте от 1 до 7 недель	177553834	0,461
Цыплята в возрасте от 7 до 13 недель	172227219	0,655
Цыплята в возрасте от 13 до 17 недель	167060402	0,468
Куры-несушки промышленного, родительского стада и петухов в возрасте от 20 до 47 недель	203873739	5,09
Куры-несушки промышленного, родительского стада и петухи в возрасте старше 47 недель	193680052	0,98

Определение выбросов метана при производстве мяса цыплят-бройлеров производилось исходя из статистических данных по общему производству данного вида продукции в Российской Федерации [38,39].

Определение значения коэффициента выброса метана для каждой возрастной группы цыплят-бройлеров проводилось аналогично определению данного показателя при производстве куриных яиц по выражению (1).

Согласно статистическим данным по поголовью цыплят-бройлеров, снимаемых на убой ($N_{ц.б.с.у.}$), составляющему 2450148,245 тыс. гол. в год, и согласно нормативного падежа бройлеров при напольном и клеточном содержании, составляющем 5 %, выражение для определения количества

[38] Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. О развитии отрасли птицеводства. [Электронный ресурс] https://mcx.gov.ru/upload/iblock/f25/f25e95d9016fc8d3f303f756b61ce0f0.pdf?ysclid=lmoq3mczu323553405 (дата обращения 03.11.2023 г.)

[39] Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Состояние птицеводства в Российской Федерации [Электронный ресурс]

цыплят при постановке на откорм имеет вид:

$$N_{ц.б.п.о.} = \frac{N_{ц.б.с.у.}}{0,95},$$

откуда:

$$N_{ц.б.п.о.} = 2572655,657 \text{ тыс. гол.}$$

Исходя из полученных значений коэффициента выброса метана по выражению (2) определено значение выбросов метана для каждой возрастной группы цыплят-бройлеров и общее количество выброса метана от каждой возрастной группы цыплят-бройлеров, приведены в таблице 4.

Таблица 4. Обменная энергия, среднесуточное потребление корма и коэффициент выброса метана при энтеральной ферментации различных половозрастных групп птиц при выращивании цыплят-бройлеров

Table 4. Metabolic energy, average daily feed consumption and methane emission coefficient during enteral fermentation of various gender and age groups of poultry in broiler chickens rearing

Показатель	Половозрастная группа	
	Цыплята бройлеры от 1 до 4 недель	Цыплята бройлеры старше 4 недель
Среднесуточное потребление корма, (кг)	0,0783	0,192
Обменная энергия, (МДж/кг)	12,98	13,19
Коэффициент выброса метана от энтеральной ферментации	0,0031	0,0038
Количество метана от энтеральной ферментации, гГ/год	7,98	9,31

Определение общего выброса метана, получаемого в процессе производства птицеводческий продукции, такой как мясо цыплят-бройлеров и столовых яиц запишем как:

$$N_{oCH_4} = 10^{-6} \cdot (\sum_{1 \le i \le 6} EF_i \cdot N_i + \sum_{7 \le i \le 8} EF_i \cdot N_i), \quad (10)$$

где:

$EF_1 \cdot N_1$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте от 1 до 7дней, при производстве яиц;

$EF_2 \cdot N_2$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте от 1 до 7 недель, при производстве яиц;

$EF_3 \cdot N_3$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте от 7до 13 недель, при производстве яиц;

$EF_4 \cdot N_4$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте от 13 до 17 недель, при производстве яиц;

$EF_5 \cdot N_5$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте от 20 до 47 недель, при производстве яиц;

$EF_6 \cdot N_6$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте старше 47 недель, при производстве яиц;

$EF_7 \cdot N_7$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте от 1 до 4 недель, при выращивании цыплят-бройлеров;

$EF_8 \cdot N_8$ – произведение коэффициента выброса метана на количество цыплят, в возрасте старше 4 недель, при выращивании цыплят-бройлеров.

Путем подставления необходимых значений в выражение (10) был получен общий выброс метана при производстве куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров, составивший 24,981 гГ/год.

Обсуждение. Представленная методика позволяет определить, как фактический объем выбросов метана птицеводческими предприятиями, основываясь на данных по объему производимой ими продукции, так и спрогнозировать динамику данных выбросов при изменении производственного объема.

Согласно проведенным ранее исследованиям, суммарный объем выбросов метана в России составляет 14 млн. тонн, из которых 5,74 млн. тонн приходится на сельское хозяйство, где основным производителем метана (более 3,9 млн. тонн) является животноводческий сектор [8-10].

Проведенный расчет выбросов метана птицеводческими предприятиями показал, что суммарное значение выбросов от энтеральной ферментации при производстве пищевых куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров не превышает 0,025 млн. тонн или 0,64% от общих выбросов животноводческого сектора.

Выводы. В результате проведения исследований была разработана методика расчета выбросов метана при производстве пищевых куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров.

Определено количество птиц в каждой половозрастной группе, задействованной при производстве куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров. Определены коэффициенты выбросов CH_4 от энтеральной ферментации для каждой категории птицы. Коэффициенты выбросов CH_4 при производстве яйца составли: цыплята от 1 до 7 дней – 0,0002 кг CH_4/гол×год, молодняк кур от 1 до 7 недель – 0,0026 кг CH_4/гол×год, молодняк кур от 7 до 13 недель – 0,0038 кг CH_4 /гол×год, молодняк кур от 13 до 17 недель – 0,0028 кг CH_4/гол×год, куры несушки от 20 до 47 недель – 0,025 кг CH_4/гол×год, куры-несушки старше 47 недель – 0,0051 кг CH_4/гол×год. Коэффициенты выбросов CH_4 при производстве мяса птицы составили: цыплята-бройлеры от 1 до 4 недель – 0,0031 кг CH_4/гол×год, цыплята-бройлеры старше 4 недель – 0,0038 кг CH_4/гол×год.

Выбросы метана от энтеральной ферментации при производстве куриных яиц и мяса цыплят бройлеров в 2020 году составляли, соответственно, 7,691 и 17,29 гГ.

Суммарные выбросы метана от энтеральной ферментации при производстве куриных яиц и мяса цыплят-бройлеров в общем объеме метана от животноводческой отрасли составляли в 2020 году 0,64 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фисинин В. И. Уровень динамики развития мясного и яичного птицеводства России. Результаты работы отрасли в 2022 году // Птицеводство. 2023. № 4. С. 4-8. URL: https://www.poultrypress.ru/gallery/23.4_4-8.pdf

2. Авельцов Д.Ю. Рынок мяса и мясной продуктивности: состояние и перспективы в России и мире // Птица и птицепродукты. 2022. №1. С. 19-20. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48010853
3. Бобылева Г.А., Гущин В.В. Результаты работы птицеводов в 2021 году определяют задачи на будущие //Птица и птицепродукты. 2022. №1. С. 4-7. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48010850
4. Ройтер Л.М., Еремеева Н.А., Павлова И.М. Рыночный потенциал мяса птицы // Экономика сельского хозяйства России. 2020. №3. С. 69-79. https://doi.org/10.32651/203-69
5. Барчо М.Х. Технико-технологическая модернизация как фактор развития отечественного мясного птицеводства // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2019. №4(49). С. 81-85. https://doi.org/10.33938/194-81
6. Бочкарева И. И., Майманова Е. А. Птицефабрика как источник загрязнения окружающей среды // Сб. материалов Межд. науч. конф. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2019». 2019. Т. 4. №. 2. С. 106-111. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-2-106-111
7. Пилип Л. В. Проблемы утилизации отходов животноводческих комплексов // Вестник Вятского ГАТУ. 2022. №. 2 (12). С. 1. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48772593
8. Шанина Ел. Вл., Шанина Ек.Вл. Выбросы парниковых газов от животноводства // Научно-практические аспекты развития АПК: Материалы национальной научной конференции, (Красноярск, 18 ноября 2022 г.) / отв. за вып. А.В. Коломейцев. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет. 2023. С. 35-37 URL: http://www.kgau.ru/new/all/science/04/content3/70.pdf
9. Ушкалов В. Ю. Влияние сельского хозяйства на озоновый слой земли // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XIII международной научно-практической конференции молодых ученых (Красноярск, 08-09 апреля 2020 г.) / отв. за вып. В.Л. Бопп, А.В. Коломейцев. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет. 2020. Часть II. С. 100-102 URL: http://www.kgau.ru/new/all/science/04/content3/25.pdf
10. Петрунина И.В., Горбунова Н.А. Системные меры по снижению выбросов парниковых газов в животноводческих хозяйствах. Обзор // Пищевые системы. 2022. №5(3). С. 202-211. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211

REFERENCES

1. Fisinin V. I. Dynamics of development of the markets of poultry meat and eggs in Russian Federation and the results of the branch activity in 2022. Ptitsevodstvo = Poultry Farming. 2023;4: 4-8 (In Russ.) URL: https://www.poultrypress.ru/gallery/23.4_4-8.pdf
2. Aveltsov D.Yu. Meat and meat products market: condition and prospects in Russia and world. Ptitsa i ptitseprodukty = Poultry and poultry products. 2022;1:19-20 (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48010853
3. Bobyleva G.A., Goushchin V.V. Poultry breeder work results in 2021 determine the prospects of it further development. Ptitsa i ptitseprodukty = Poultry and poultry products. 2022;1: 4-7. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48010850
4. Roiter L. M., Eremeeva N. A., Pavlova I. M. Market potential of poultry meat. Ekonomika sel'skogo khozyaistva Rossii = Economics of Agriculture of Russia. 2020;3:69-79 (In Russ.) https://doi.org/10.32651/203-69

5. Barcho M. Kh. Technical and technological modernization as a factor of development of domestic meat poultry farming. Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyaistve = Economy, Labor, Management in Agriculture. 2019;4(49): 81-85 (In Russ.) https://doi.org/10.33938/194-81
6. Bochkareva I. I., Maymanova E. A. Poultry farm as a source of environmental pollution. In: Proc. Int. Sci. Conf. Interexpo Geo-Siberia. 2019; 4(2):106-111. (In Russ.) https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-4-2-106-111.
7. Pilip L. V. The problems of utilizing the waste of livestock complexes. Vestnik Vyatskogo GATU = Bulletin of Vyatka State Technical University. 2022;2 (12): 1. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48772593
8. Shanina El. Vl., Shanina Ek.Vl. Greenhouse gas emissions from livestock. In: Scientific and practical aspects of agroindustrial complex development: Proc. Nat. Sci. Conf. (Krasnoyarsk, November 18, 2022) / A.V. Kolomeitsev (ed.) Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. 2023; 35-37 (In Russ.) URL: http://www.kgau.ru/new/all/science/04/content3/70.pdf
9. Ushkalov V. Yu. Impact of agriculture on the Earth's ozone layer. In: Innovative trends in the development of Russian science: Proc. XIII Int. Sci. Prac. Conf. of Young Scientists (Krasnoyarsk, April 08-09, 2020) / V.L. Bopp, A.V. Kolomeitsev (eds). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. 2020; 2:100-102 (In Russ.) URL: http://www.kgau.ru/new/all/science/04/content3/25.pdf
10. Petrunina I. V., Gorbunova N. A. Systemic measures on reduction of greenhouse gas emissions in animal husbandry enterprises. A review // Pishchevye sistemy = Food Systems. 2022;5(3):202-211 (In Russ.) https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211

Об авторах	**About the authors**
Илья Евгеньевич Плаксин, канд. техн. наук, научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия; ilyaplaxin @gmail.com https://orcid.org/0000-0002-3695-0820	**Ilya E. Plaksin,** Cand. Sc. (Engineering), researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia ilyaplaxin @gmail.com https://orcid.org/0000-0002-3695-0820
Алексей Валериевич Трифанов, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Фильтровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия; trifanovav@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3503-6148	**Alexey V. Trifanov,** Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor, leading researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia, trifanovav@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3503-6148
Заявленный вклад авторов	**Authors’contribution**

И.Е. Плаксин – теоретические предпосылки, создание черновика рукописи, А.В. Трифанов – создание окончательной версии (доработка) рукописи, администрирование данных	I.E. Plaksin – theoretical background, drafting the manuscript, A.V.Trifanov – revision and finalizing the manuscript, data administration
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 15.12.2023	**Received:** 15.12.2023
Одобрена после рецензирования: 25.12.2023	**Approved after reviewing:** 25.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 631.22 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-141-151

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАСХОД ВОДЫ ПРИ УБОРКЕ ДОИЛЬНОГО ЗАЛА

Татьяна Юрьевна Миронова [1]✉, Вячеслав Николаевич Миронов[2]

[1, 2] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

[1] mironova-tat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6959-049X
[2] mironov-vyacheslav@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5393-1146

Аннотация. Доля ручного труда в выполнении технологических операций при производстве молока достаточно велика, что приводит к влиянию человеческого фактора на выполнение процессов и расход ресурсов. Цель исследований – сравнительная оценка значимости человеческого фактора и уровня загрязненности поверхностей для расхода воды при уборке доильного зала. Оценку проводили по значимости коэффициентов при регрессионном анализе. Человеческий фактор представляли через работающую смену. Общее количество смен – три. Уровень загрязнённости в доильном зале выражали через количество коров, прошедших через единицу площади. Удельная площадь на одну голову при утреннем доении составила около 0,8 м^2/гол., при дневном – 1 м^2/гол., при вечернем – 0,9 м^2/гол. Количественный замер расхода воды проводили каждый час в автоматическом режиме при помощи четырех электронных расходомеров Пульсар М ДУ-15 (Россия).

Учитывалась вода, затрачиваемая на мытьё пола и загрязнённых навозом поверхностей в доильном зале с установкой типа «Параллель 2×20», а также преддоильной площадки, скотопрогонов и санитарной зоны. Массив данных за 31 день мониторнга структурирован по расходу воды за каждую смену; обобщенные значения представлены в виде средних значений по каждому из дней недели. Построена модель, описывающая расход воды на уборку доильного зала в зависимости от влияния работающей смены и удельной площади на одну корову. Полученные коэффициенты переменных свидетельствуют о том, что на расход воды в доильном зале работающая смена оказывает незначительное влияние по сравнению с удельной площадью на корову. Среднесуточный расход воды на корову за доение составил 8 л и различался между сменами в пределах 2,5 %. Решение оптимизационной задачи из условия минимального удельного расхода воды на голову в сутки показало, что оптимальная удельная площадь доильного зала составляет 0,925 м^2 на голову.

Ключевые слова: доильный зал, расход воды, человеческий фактор, загрязнённость поверхности

Для цитирования: Миронова Т.Ю., Миронов В.Н. Оценка факторов, влияющих на расход воды при уборке доильного зала // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4 (117) С. 141-151 https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-141-151

Research article
Universal Decimal Code 631.22

ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING WATER CONSUMPTION DURING MILKING PARLOR CLEANING

Tatiana Yu. Mironova[1]✉, Viacheslav N.Mironov[2]

[1, 2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

[1] mironova-tat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6959-049X
[2] mironov-vyacheslav@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5393-1146

Abstract. The share of manual labour in technological operations of milk production is quite big. This means the human factor affects the execution of processes and consumption of resources. The study aimed to estimate the importance of human factor and surface dirtiness degree for water consumption during the milking parlour cleaning. Estimation was done by significance of coefficients in regression analysis. The human factor was represented by working shifts, with their total number being three. The dirtiness degree in the milking parlor was expressed by the number of cows passing through a unit area. The specific area during the morning milking was about 0.8 m^2/head, during the daytime milking – 1 m^2/head, and during the evening milking – 0.9 m^2/head. Four electronic flow meters Pulsar M DU-15 (Russia) measured the water consumption every hour in an automatic mode. The study considered the water spent on washing the floor and surfaces soiled with manure in Parallel 2×20 milking parlor, in the pre-milking area, passages for cows, and sanitary area. The data array obtained for 31 monitoring day was structured by water consumption per each shift. The generalized values were presented as averages per each weekday. The study

created a model describing the water consumption for cleaning the milking parlor as a function of the effect of a working shift and specific area per cow. The obtained coefficients of variables indicated that the working shift had an insignificant effect on water consumption in the milking parlor compared to the specific area per cow. The average daily water consumption per cow per milking was 8 liters and differed between shifts within 2.5%. Solving the optimization problem based on the condition of minimum specific water consumption per head per day showed that the optimal specific area of the milking parlor was 0.925 m^2/head.

Key words: milking parlour, water consumption, human factor, surface soiling degree

For citation: Mironova T.Yu., Mironov V.N. Assessment of factors affecting water consumption during milking parlor cleaning. AgroEcoEngineering. 2023;4(117): 141-151. (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-141-151

Введение. По данным исследований [1] на уборку и эксплуатацию доильного зала приходится около 14 % воды, используемой на ферме. Расход воды в некоторых технологических операциях, например, промывке доильного оборудования и танков для охлаждения молока, автоматизирован и контролируется компьютером. Доля ручного труда в выполнении технологических операций при производстве молока достаточно велика, что ведет к влиянию человеческого фактора на выполнение процессов, в том числе связанных с доением и уборкой доильного зала, и может отражаться на качестве исполняемых работ и расходе ресурсов на их выполнение.

Влияние человеческого фактора на расход воды при производстве молока возможно уменьшить за счёт автоматизации отдельных технологических процессов. Однако на фермах КРС не все операции возможно автоматизировать или сделать это довольно трудно. В этих случаях особого внимания требует рациональная организация производства, обеспечивающая экономное использование водных ресурсов. Также возможно принять организационные меры, связанные со снижением человеческого фактора на расход воды и направленные на повышение культуры производства и своевременное устранение утечек.

Качество работы персонала, наряду с технико-технологическими факторами, оказывает влияние на количество воды, затрачиваемой на мытьё пола [2]. Ранее проведенные исследования [3] показали, что разница расхода воды на уборку доильного зала под влиянием человеческого фактора, а именно, между подобранными бригадами, работающими в разные смены, может достигать 13 %. Эти данные не дают понимания, насколько человеческий фактор значителен в сравнении с другими факторами, влияющими на расход воды в доильном зале. Хотя человеческий фактор не предполагает количественного измерения, оценить его значимость в общем объеме расхода воды в сравнении с другими факторами, например, уровнем загрязненности поверхностей, требующих мытья, можно по значимости коэффициентов при регрессионном анализе. Эмпирические результаты полезны для понимания расхода водных ресурсов и потенциальных последствий, а именно объемов образующихся стоков, а также для разработки научно-обоснованных способов их сокращения.

Уровень загрязнений в доильном зале зависит от поголовья дойного стада. По разным оценкам количество

экскрементов, оставляемых коровами в доильном зале, составляет 1,6-3 %[40] от среднесуточного количества [4]. Чем больше коров пройдет через доильный зал, тем больше останется экскрементов, которые необходимо смыть при его уборке. Следовательно, уровень загрязненности в доильном зале можно выразить как количество коров, прошедших через единицу площади, т.е. удельную площадь на одну голову.

Подробный анализ водопользования на фермах КРС по данным отечественных и зарубежных исследований представлен в [5]. Данные по расходу воды на фермах в отечественных исследованиях ограничиваются мониторингом водопотребления животными [6-8]. В зарубежных исследованиях приводятся данные по расходу воды как в целом по ферме [9, 10], так и по основным технологическим операциям [1, 11, 12], в большинстве случаев представленных поением животных, расходом воды в доильном зале и на охлаждение молока. Наиболее детальный расход воды в доильном зале представлен в исследованиях [11, 12] и включает расход воды на промывку доильного оборудования, резервуаров-охладителей молока, уборку помещения и очистку вымени коров перед доением; при этом оценок влияния отдельных факторов на расход воды при выполнении этих операций не представлено.

Цель исследований – сравнительная оценка значимости человеческого фактора и уровня загрязненности поверхностей для расхода воды при уборке доильного зала.

Материалы и методы. Исследования проводили в 2021 г. на молочно-товарной ферме с общим поголовьем дойного стада 663 коровы, где доение осуществлялось в доильном зале на установке типа «Параллель 2×20» общей площадью 522 м^2, включая преддоильную площадку, санитарную зону и скотопрогоны. Доение основного стада трёхкратное, новотельных коров первые 7 дней доят 1 раз в сутки, коров перед запуском – 2 раза. Таким образом, через доильный зал за каждое доение проходит разное количество коров. Удельная площадь на голову при утреннем доении составляет около 0,8 м^2/гол., при дневном – 1 м^2/гол., при вечернем – 0,9 м^2/гол.

Исследовали влияние человеческого фактора и уровня загрязнённости на расход воды в доильном зале. Человеческий фактор представляли через работающую смену, общее количество которых три. В каждую смену работает по две бригады: одна – операторы машинного доения, работающие в доильной яме, другая организует движение коров на дойку. Каждая бригада в конце смены моет свою рабочую зону. В доильной яме для мытья используются шланги D 20 мм и пистолеты – шланги со специальными насадками для подмыва вымени. Для уборки доильного зала, преддоильной площадки, скотопрогонов и санитарной зоны используют шланги D 20 мм и высоконапорные установки Karcher HD 6/15. Для уменьшения количества загрязнений на преддоильной площадке после каждой группы животных счищают экскременты лопатой в навозный канал. Исследования проводили с использованием статистических методов планирования эксперимента. Применено планирование двухфакторного эксперимента по трехуровневому плану второго порядка Бокса-Бенкина [13]. Для

[40] РД-АПК 1.10.15.02-17*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. М.: Росинформагротех, 2021. 172 с.

получения достоверных математических моделей в опытах использовалась рандомизированная матрица. Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни факторов и интервалы варьирования

Table 1. Factor levels and variation ranges

Факторы	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
			–1	0	+1
Удельная площадь на голову, м^2	X_1	0,1	0,8	0,9	1
Номер смены	X_2	1	3	2	1

Количественное измерение расхода воды осуществлялось за каждый час в автоматическом режиме при помощи электронных расходомеров Пульсар М ДУ-15 (Россия), установленных в четырёх точках, перед узлами подключения используемого оборудования. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений – 2-5 %.

В зависимости от дня недели средний суточный расход воды в доильном зале может изменяться до 18 % [14]. Это связано с тем, что несколько раз в неделю в доильном зале проводят обработку копыт и есть санитарные дни, когда проводится более тщательная уборка, что сопровождается большим расходом воды. С целью исключения влияния дня недели, как фактора, была проведена выборка из массива данных расхода воды по каждому сочетанию факторов для каждого дня недели в одинаковых количествах повторностей.

Количественное обоснование поголовья дойного стада по критерию минимального расхода воды в доильном зале проводили исходя из решения оптимизационной задачи, в которой определяли оптимальное значение удельной площади доильного зала на голову. Для получения математической модели, построения диаграмм и решения оптимизационной задачи использовано приложение Statgraphics Plus [15]. Достоверность полученной модели определяли по уровню значимости критерия Фишера – p, который должен быть меньше, чем 0,05.

В обработку вошли данные за 31 день мониторинга, проведенного в ноябре-декабре. Исследования были частью мониторинга фактически расходуемой в доильном зале воды, поступающей впоследствии в систему навозоудаления. Методика мониторинга и общие результаты, включающие распределение расхода воды по часам суток и дням недели, подробно изложены в [14].

Результаты. За время проведения исследований среднесуточный расход воды в доильном зале составил 14,3±1,6 м^3/сут. Основная часть – 9,2±1,1 м^3/сут. расходовалась бригадой, работающей в доильной яме, на смыв экскрементов в доильных постах при смене животных, мытьё стен и пола доильной ямы, наружной части доильных аппаратов, смыв экскрементов с подхвостового защитного лотка доильной установки после доения каждой группы животных. Для уборки после окончания доения преддоильной площадки, доильного зала, скотопрогонов и санитарной зоны расходовалось 5,1±1,1 м^3/сут., из них около 30 % приходилось на расход воды из высоконапорных установок.

Для оценки влияния человеческого фактора и уровня загрязнённости на расход воды в доильном зале были получены значения расхода воды на одну

корову за доение для каждого сочетания факторов (таблица 2).

Таблица 2. Результаты эксперимента

Table 2. Experiment results

Номер опыта	Факторы в кодированном виде		Расход воды на корову за доение, Q, л/гол.
	Удельная площадь на голову, X_1	Номер смены, X_2	
1	0	+1	6,2
2	+1	0	7,4
3	0	0	6,6
4	-1	-1	9,9
5	-1	0	9,6
6	+1	+1	7,9
7	-1	+1	9,8
8	+1	-1	7,5
9	0	-1	6,8

Среднесуточный расход воды на корову за доение составил около 8 л; наименьший расход наблюдался у смены №2 – 7,9 л/гол., у других смен он отличался в пределах 0,2 л/гол., т.е. 2,5%.

В ходе множественного регрессионного анализа влияния исследуемых факторов на расход воды в доильном зале была получена математическая модель (1) в кодированном виде и построена трехмерная поверхность отклика и контуры её сечений (рис. 1).

$$Q = 6{,}432 - 1{,}079 \cdot X_1 - 0{,}043 \cdot X_2 + 2{,}129 \cdot X_1^2 - 0{,}138 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0{,}158 \cdot X_2^2; \quad (1)$$

$$R^2 = 0{,}983;$$

где Q – удельный расход воды в доильном зале за разовое доение, л/гол.;

X_1 – кодированное значение удельной площади доильного зала на голову;

X_2 – кодированное значение номера работающей смены;

R^2 – коэффициент детерминации.

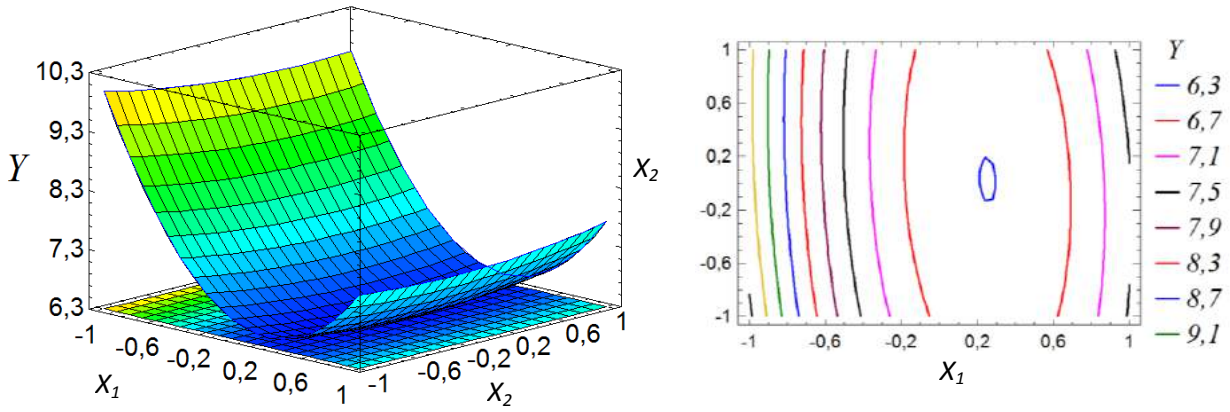


Рис. 1. Поверхность отклика и контур её сечения, показывающие влияние номера работающей смены (человеческого фактора) и удельной площади

Fig.1. Response surface and the contour of its section, showing the influence of the number of working shifts (human factor) and specific area

Коэффициент множественной корреляции математической модели близок к единице, что говорит о её высокой воспроизводимости. Достоверность всей модели по уровню значимости критерия Фишера составляет 0,0072, что существенно меньше 0,05, и указывает на её адекватность. Полученные коэффициенты переменных свидетельствуют о том, что на расход воды в доильном зале работающая смена оказывает незначительное влияние по сравнению с удельной площадью на голову.

Обсуждение. Из полученных данных видно, что расход воды, в зависимости от смены, изменяется незначительно и свидетельствует о схожести работы смен. Оба фактора оказывают нелинейное влияние, при этом подтверждается наибольшее влияние фактора удельной площади на голову X_1. При наименьшей удельной площади на голову расход воды в доильном зале имеет максимальное значение. При увеличении удельной площади на голову расход воды уменьшается до экстремума, а затем снова немного увеличивается. Это может объясняться тем, что при большом количестве дойных коров, пол и другие поверхности сильнее загрязнены, а также тем, что более длительное время доения способствует застыванию загрязнений, в частности навоза, поэтому требуется значительное количество воды для размачивания и смыва их с поверхностей. При слишком маленьком поголовье дойного стада становится нерациональным расход воды на мытьё части поверхностей, которые запачканы не сильно, но всё равно необходимо мыть.

Для рассматриваемого доильного зала, решение оптимизационной задачи из условия минимального удельного расхода воды на голову в сутки показало, что оптимальная удельная площадь в кодированном виде – 0,252 и составляет 0,925 м^2 площади доильного зала на голову, что соответствует 562 головам за доение для общей площади доильного зала.

Выводы. Мониторинг расхода воды, затрачиваемой на уборку доильного зала с установкой типа «Параллель 2х20», показал, что основное количество воды расходуется в доильной яме и составляет около 64 %. Для уборки преддоильной площадки, доильного зала, скотопрогонов и санитарной зоны расходовалось 36% и составляло 5,1±1,1 м^3/сут., из них около 30% приходилось на расход воды из высоконапорных установок. Среднесуточный расход воды на корову за доение составил около 8 л, наименьший расход наблюдался у смены №2 – 7,9 л/гол., у других он отличался в пределах 2,5 %. На расход воды в доильном зале работающая смена (человеческий фактор) оказывает незначительное влияние по сравнению с удельной площадью на голову, от которой зависит уровень загрязнённости поверхности. Конечно, количественная оценка человеческого фактора лишь частично отражает объективные данные расхода воды при выполнении рассматриваемого технологического процесса. Необходим качественный анализ влияния сущности выполняемых процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Le Riche E.L., VanderZaag A.C., Burtt S., Lapen D.R., Gordon R. Water use and conservation on a free-stall dairy farm // Water. 2017. Vol. 9 (12), 977. https://doi.org/10.3390/w9120977

2. Гордеев В.В., Миронова Т.Ю., Миронов В.Н. Методика определения количества навозосодержащих стоков доильных залов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 97. С. 241-250. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10112

3. Гордеев В.В., Миронова Т.Ю., Гордеева Т.И., Ильин Р.М., Миронов В.Н. Расход водных ресурсов для уборки доильного зала типа «Параллель» // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 4 (109). С. 117-125. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-117-124

4. Damasceno F.A., Monge J.L., Nascimento J.A.C., Andrade R.R., Barbari M., Saraz J.A.O., Ferraz G.A.S. Estimate of manure present in compost dairy barn systems for sizing of manure storage // Agronomy Research. 2020. Vol. 18. Special Issue 2. P. 1213-1219. https://doi.org/ 10.15159/AR.20.105

5. Ковалев С.В., Гордеев В.В., Миронова Т.Ю. Анализ водопользования на фермах КРС // АгроЭкоИнженерия. 2023. №2 (115). С. 108-123. https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-108-122

6. Гордеев В.В., Хазанов В.Е., Вторый С.В., Ильин Р.М. Анализ организации водообеспечения коров летом при беспривязном содержании // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. №3(100). С.146-153. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10197

7. Вторый В.Ф. Вторый С.В., Ильин Р.М. Оценка влияния основных факторов на водопотребление дойных коров // АгроЭкоИнженерия. 2021. №2 (107). С.106-115. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46302062

8. Шматко Н.Н., Музыка А.А, Кирикович С.А., Москалев А.А., Тимошенко М.В. Водообеспечение коров на селекционно-племенной молочной ферме // Зоотехническая наука Беларуси. 2016. Т.51 №2. С. 325-333. URL: https://zootech.belal.by/jour/article/view/1186

9. Robinson A.D., Gordon R.J., Vanderzaag A.C., Rennie T.J., Osborne V.R. Usage and attitudes of water conservation on Ontario dairy farms // The Professional Animal Scientist. 2016. Vol. 32 (2). P. 236-242. https://doi.org/10.15232/pas.2015-01468

10. Al-Bahouh M., Osborne V., Wright T., Dixon M., Gordon R. Blue and grey water footprints of dairy farms in Kuwait // Journal of Water Resource and Protection. 2020. Vol. 12 (7). P. 618-635. https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.127038

11. Hodúr C., Nagypal V., Fazekas Á., Mikó E. Blue and gray water footprint of some Hungarian milking parlors // Water Practice and Technology. 2022. Vol. 17 (7). P. 1378-1389. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.073

12. Krauß M., Drastig K., Prochnow A., Rose-Meierhöfer S., Kraatz S. Drinking and cleaning water use in a dairy cow barn // Water. 2016. Vol. 8 (7), 302. https://doi.org/10.3390/w8070302

13. Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Исследование сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. М.: Колос. 1994. 169 с.

14. Gordeev V., Mironova T., Gordeeva T., Ilin R., Mironov V. Monitoring of water amount going to manure removal system from milking parlour // Engineering for Rural Development. Proc.

20th Int. Sci. Conf. (Jelgava, 26.-28.05.2021). 2021. Vol. 20. P. 725-730. https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF158

15. Валге А.М., Джабборов Н.И., Эвиев В.А. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на Statgraphics и Excel. Санкт-Петербург - Элиста, 2015. 140 с.

REFERENCES

1. Le Riche E.L., VanderZaag A.C., Burtt S., Lapen D.R., Gordon R. Water use and conservation on a free-stall dairy farm. Water. 2017; 9 (12), 977. (In Eng.) https://doi.org/10.3390/w9120977

2. Gordeev V.V., Mironova T.Yu., Mironov V.N. Method to determine the amount of manure-bearing wastewater from milking parlours. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2018;97:241-250. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10112

3. Gordeev V.V., Mironova T.Yu., Gordeeva T.I., Ilyn R.A., Mironov V.N. Consumption of water resources for cleaning “Parallel” milking parlour. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2021; 4(109):117-125. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-4109-117-124

4. Damasceno F.A., Monge J.L., Nascimento J.A.C., Andrade R.R., Barbari M., Saraz J.A.O., Ferraz G.A.S. Estimate of manure present in compost dairy barn systems for sizing of manure storage. Agronomy Research. 2020; 18 (2): 1213-1219. (In Eng.) https://doi.org/ 10.15159/AR.20.105

5. Kovalev S.V., Gordeev V.V., Mironova T.Yu. Analysis of water use on cattle farms. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2023; 2(115): 108-123. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-2115-108-122

6. Gordeev V.V., Khazanov V.E., Vtoryi S.V., Ilyn R.A. Organization of summer water supply of cows under the loose housing system. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2019. №3(100). С.146-153. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10197

7. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V., Ilyn R.A. Assessment of main factors effect on water consumption of milking cows. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2021;2 (107):106-115. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=46302062

8. Shmatko N.N., Muzyka A.A., Kirikovich S.A., Moskalev A.A., Timoshenko M.V. Water supply for cows at breeding dairy farm. Zootekhnicheskaya nauka Belarusi = Zootechnical Science of Belarus. 2016;51(2):325-333. (In Russ.) URL: https://zootech.belal.by/jour/article/view/1186

9. Robinson A.D., Gordon R.J., Vanderzaag A.C., Rennie T.J., Osborne V.R. Usage and attitudes of water conservation on Ontario dairy farms. The Professional Animal Scientist. 2016; 32 (2): 236-242. (In Eng.) https://doi.org/10.15232/pas.2015-01468

10. Al-Bahouh M., Osborne V., Wright T., Dixon M., Gordon R. Blue and grey water footprints of dairy farms in Kuwait. Journal of Water Resource and Protection. 2020; 12 (7): 618-635. (In Eng.) https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.127038

11. Hodúr C., Nagypal V., Fazekas Á., Mikó E. Blue and gray water footprint of some Hungarian milking parlors. Water Practice and Technology. 2022; 17 (7): 1378-1389. (In Eng.) https://doi.org/10.2166/wpt.2022.073

12. Krauß M., Drastig K., Prochnow A., Rose-Meierhöfer S., Kraatz S. Drinking and cleaning water use in a dairy cow barn. Water. 2016; 8 (7), 302. (In Eng.) https://doi.org/10.3390/w8070302

13. Khailis G.A., Kovalev M.M. Research of agricultural machinery and processing of experimental data. Moscow: Kolos Publ. 1994. 169 p. (In Russ.)

14. Gordeev V., Mironova T., Gordeeva T., Ilin R., Mironov V. Monitoring of water amount going to manure removal system from milking parlour. In: Engineering for Rural Development. Proc. 20th Int. Sci. Conf. (Jelgava, 26.-28.05.2021). 2021; 20: 725-730. (In Eng.) https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF158

15. Valge A.M., Dzhabborov N.I., Eviev V.A. Fundamentals of statistical processing of experimental data for research in mechanisation of agricultural production with examples in STATGRAPHICS and EXCEL. Saint Petersburg; Elista: Kalmyk Univ. Publ., 2015: 140. (In Russ.)

Об авторах	**About the authors**
Миронова Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, научный сотрудник Отдела агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3) mironova-tat@mail.ru, 8(812)466 28 78 ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6959-049X	**Tatiana Yu. Mironova,** Cand. Sc. (Engineering), research associate, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia mironova-tat@mail.ru, 8(812)466 28 78 ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6959-049X
Миронов Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, учёный секретарь, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196634, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3) mironov-vyacheslav@yandex.ru, 8(812)466 28 78 ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5393-1146	**Viacheslav N. Mironov,** Cand. Sc. (Engineering), Academic Secretary, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia mironov-vyacheslav@yandex.ru, 8(812)466 28 78 ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5393-1146
Заявленный вклад авторов	**Authors' contribution**

Все авторы статьи принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и поиске литературы.	All authors of this paper have directly participated in the study planning and execution, and literature survey.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interest.
Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант	All authors have read and approved the final version of the manuscript submitted.
Статья поступила в редакцию: 03.12.2023	**Received:** 03.12.2023
Одобрена после рецензирования: 22.12.2023	**Approved after reviewing:** 22.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023

Научная статья
УДК 636/639 DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-151-163

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В АПК ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Алексей Васильевич Маклахов[1]✉, Геннадий Александрович Симонов[2], Вячеслав Викторович Приятелев[1], Екатерина Алексеевна Марценюк[3]

[1]Вологодский государственный университет, Вологда, Россия
[2]Вологодский научный центр РАН, СЗНИИМЛПХ, Вологда, Россия
[3]Комитет по экономической политике и стратегическому планированию г. Санкт-Петербурга, Россия

[1]leon1906@yanx.ru
[2]gennadiy0007@mail.ru, https://orcid.org/0000–0003–4559-233X
[3]maklahowa.k@yandex.ru

Аннотация. Изучены показатели производства сельскохозяйственной продукции в АПК Вологодской области за ряд лет. Установлено, что Вологодский регион в Российской Федерации по производству молока занимает 4-е место, а по валовому надою – 11-е. В 2022 г. производство молока в АПК области достигло уровня 607,7 тыс. тонн, что больше 2021 г. на 18,7 тыс. т или 3,2 %. Это самый высокий показатель за 29 лет по производству молока в

области. В настоящее время область перекрывает собственную потребность в молоке в 2 раза, в яйце – в 1,7 раза, в картофеле – в 2 раза. Дальнейшее развитие агропромышленного комплекса следует осуществлять за счёт оптимизации издержек производства, внедрения передовых технологий в производство, рационального использования трудовых ресурсов. Всё это позволит производить больше сельскохозяйственной продукции в Вологодской области с наименьшими затратами.

Ключевые слова: Вологодский регион, АПК, растениеводство, животноводство, развитие производства, поголовье, продукция, экономика.

Для цитирования: Маклахов А.В., Симонов Г.А., Приятелев В.В., Марценюк Е.А. Перспективы развития производства сельскохозяйственной продукции в АПК Вологодской области // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 151-163 https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-151-163

Research article
Universal Decimal Code 636/639

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF THE VOLOGDA REGION

Alexey V. Maklakhov[1]✉, Gennady A. Simonov[2], Vyacheslav V. Prijatelev[1], Ekaterina A. Martsenyuk[3]

[1]Vologda State University, Vologda, Russia;
[2]Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, A.S. Emelyanov North-West Research Institute of Dairy and Meadow Pasture Farming, Vologda, Russia;
[3]Committee for Economic Policy and Strategic Planning of St. Petersburg, Russia

[1]leon1906@yanx.ru
[2]gennadiy0007@mail.ru, https://orcid.org/0000–0003–4559-233X
[3]maklahowa.k@yandex.ru

Abstract. The study considered the indicators of agricultural production in the agro-industrial complex of the Vologda Region for several years. The region was established to rank 4th in the milk production and 11th in the gross milk yield in the Russian Federation. The regional agro-industrial complex produced 607.7 thousand tons of milk in 2022. This was an increase of 18.7 thousand tons or 3.2% compared to 2021. This is the highest level in 29 years for milk production in the region. Currently, the region meets its own demand for milk by 2 times, eggs – 1.7 times, and potatoes – 2 times. To improve the agro-industrial complex, we should reduce production costs, use advanced technologies, and optimize labor resources. These changes will help produce more food in Vologda Region at a lower cost.

Keywords: Vologda Region, agro-industrial complex, crop production, animal husbandry, production development, animal stock, products, economy.

For citation: Maklakhov A.V., Simonov G.A., Prijatelev V.V., Martsenyuk E.A. Prospects for the development of agricultural production in the agro-industrial complex of the Vologda Region // AgroEcoEngineering. 2023; 4(117): 151-163 (In Russ.) https://doi.org/ 10.24412/2713-2641-2023-4117-151-163

Введение. В настоящее время агропромышленный комплекс является одной из динамично развивающихся отраслей в экономике Вологодской области [1-5].

Объём производства продукции сельского хозяйства всеми категориями сельскохозяйственных товаропроизводителей области за 2022 год составил 50,6 млрд рублей (растениеводство – 15,9 млрд рублей, животноводство – 34,7 млрд рублей), индекс производства к 2021 году (в сопоставимых ценах) – 104,8%, (растениеводство – 114,8%, животноводство – 100,6%).

В структуре производства продукции сельского хозяйства 68,5% занимает животноводство (преимущественно, молочное скотоводство) и 31,5% растениеводство (основная доля продукции – корма для животноводства), в значительной мере зависящее от природно-климатических условий.

Основными производителями в регионе являются сельскохозяйственные организации, на их долю приходится 79% объема сельскохозяйственного производства. Сельскохозяйственные организации области являются основными производителями молока (95% от общего объёма производства), яиц (98%), мяса (86%) и зерна (97%). Производство картофеля и овощей сосредоточено в личных подсобных хозяйствах населения (60% и 63,5% соответственно)[41,42].

Увеличение производства продукции обеспечивается за счёт роста качественных показателей – урожайности сельскохозяйственных культур и продуктивности скота, при сохранении посевных площадей и поголовья скота и птицы.

Следует отметить, что на производство сельскохозяйственной продукции в регионе оказывают большое влияния такие факторы как, например, размер населенных пунктов, демография населения, комфортность проживания в сельской местности и другие [6-8].

Целью исследований был анализ производства сельскохозяйственной продукции за ряд лет в Вологодской области.

В задачи исследований входило:

– определить производство растениеводческой и животноводческой продукции в АПК;
– установить занимаемое место Вологодского региона по производству сельхозпродукции в РФ;
– наметить перспективы развития АПК региона на ближайшие годы.

На основании полученных в исследованиях данных дать более объективную оценку развития производства сельскохозяйственной продукции в Вологодской области.

Материалы и методы. Статистические данные АПК Вологодской области за ряд лет. Обработку данных в эксперименте проводили при помощи компьютера. Для расчета полученного материала использовали общепринятые методики, применяемые в экономике.

Результаты исследований. Вологодский регион занимает

[41] Официальный портал правительства Вологодской области [Электронный ресурс]. URL:https://vologda-oblast.ru/o_regione/statistika/ (дата обращения 10.04.2023 г.)

[42] Вологдастат: Официальная статистика. [Электронный ресурс]: URL: vologdastat.gks.ru/(дата обращения 10.04.2023 г.)

лидирующие позиции среди субъектов Российской Федерации:

- по производству продукции сельхозорганизациями в расчёте на 1 жителя:
- 4-е место по производству молока;
- 11- е место по валовому надою молока в сельхозорганизациях;
- по надою молока на 1 корову в сельхозорганизациях и по производству яиц – 15 место[43].

За 2022 год в хозяйствах всех категорий области произведено:

- зерна – 178,5 тыс. т (+61,0%, 2021 год – 108,8 тыс. т);
- картофеля – 183,9 тыс. т (+5,3%, 2021 год – 174,7 тыс. т);
- овощей – 52,1 тыс. т (+3,6%, 2021 год – 50,3 тыс. т);
- молока – 607,5 тыс. т (+3,2%, 2021 год – 588,8 тыс. т);
- яиц – 636,3 млн шт. (- 0,8% к 2021 году, 2021 год – 641,4 млн штук)[44].

Следует отметить, что от качества используемых кормов в животноводстве зависит качество получаемой продукции от скота. Правильно сбалансированные рационы животных и птицы благоприятно влияют на их рост и развитие [9, 10], воспроизводительную способность [11-14], продуктивность и качество получаемой продукции [15-22], что необходимо учитывать при составлении рационов скота и птицы для эффективного ведения отрасли животноводства.

В целях обеспечения животноводства кормами в зимне-стойловый период 2022-2023 годов сельхозорганизациями и крестьянскими (фермерскими) хозяйствами заготовлено силоса 1455 тыс. т (на 243 тыс. т больше уровня 2021 года), сена, соломы – 96,9 тыс. т, сенажа (включая зерносенаж) – 75,8 тыс. т. На 1 условную голову крупного рогатого скота заготовлено по 24,5 ц ЭКЕ.

Драйвером развития сельского хозяйства региона при активной поддержке Правительства области является молочное скотоводство.

Для развития производства молока предоставляются субсидии на поддержку собственного производства молока, племенного животноводства, строительство, реконструкцию и модернизацию производственных объектов АПК, приобретение оборудования.

За последние годы в молочном скотоводстве происходит интенсификация производства: строятся новые фермы, модернизируется имеющееся оборудование, внедряются новые технологии содержания и доения скота, что, в конечном итоге, приводит к увеличению производства продукции, улучшению ее качества, сокращению трудовых затрат, повышению эффективности сельскохозяйственного производства.

Объёмы производства молока на протяжении последних лет постоянно увеличиваются.

В 2014 г. произведено 444,6 тыс. тонн (+3,3% к 2013 году). В 2021 г. валовой надой составил уже 607,5 тыс. т (рекорд за 29 лет, за 1994-2022 гг.) с поголовьем коров 75,0 тыс. голов. Сегодняшние объёмы производства молока равны тем, что Вологодская область получала в середине 90-х годов прошлого века.

Справочно. В 1993 г. производство составляло 616,1 тыс. т с поголовьем

[43] Официальный портал правительства Вологодской области [Электронный ресурс]. URL: https://vologda-oblast.ru/o_regione/statistika/ (дата обращения 10.04.2023 г.)

[44] Вологдастат: Официальная статистика. [Электронный ресурс]: URL: vologdastat.gks.ru/ (датаобращения 10.04.2023 г.)

коров 230,4 тыс. голов; в 1994 г. – 541,0 тыс. т с поголовьем коров 213,5 тыс. голов.

Максимальное производство молока было отмечено в СССР в 1977 г., и составляло 791,2 тыс. т с поголовьем коров 292,7 тыс. голов. Продуктивность коров в сельскохозяйственных организациях в годы Советского Союза не достигала 3 тыс. кг на 1 голову.

Вологодская область стала первой в России по использованию роботов в доении коров (2007 г., колхоз «Племзавод Родина» Вологодского округа). По состоянию на 1 января 2023 года в области работали 88 станций добровольного доения коров (роботы) различных модификаций и 39 современных доильных залов (2011 г. – 14 роботов и 32 доильных зала). На данном оборудовании при беспривязной технологии содержания скота обслуживается более 25 тыс. голов коров, что составляет 35% от общего поголовья коров в области. В 2022 г. введены в эксплуатацию 8 роботов-дояров (СХПК колхоз «Новленский» Вологодского округа, ООО «Заря» Чагодощенского округа и СПК (колхоз) «Коминтерн-2» Кирилловского района).

В регионе активно ведется племенная работа – по состоянию на 1 января 2023 года 35 сельскохозяйственных организаций области имели 40 статусов племенных заводов и репродукторов по разведению крупного рогатого скота молочного направления продуктивности. В октябре 2022 года впервые статус племенного репродуктора по разведению крупного рогатого скота голштинской породы получил СПК «Русь» Шекснинского района.

Внедрение современных технологий содержания и кормления коров и ведение на высоком уровне селекционно-племенной работы со стадом позволили впервые в истории региона достичь продуктивности коров в сельхозорганизациях 8345 кг на 1 корову (+4,1% к 2021 г., на 10,4% выше среднего показателя продуктивности по Российской Федерации).

Наибольшая продуктивность на 1 корову достигнута в хозяйствах Междуреченского – 10692 кг молока (+28,4% к 2021 г.), Грязовецкого – 10238 кг (+3,1%) и Великоустюгского – 9223 кг (+2,1%) округов области.

По состоянию на 1 января 2023 года поголовье крупного рогатого скота в хозяйствах всех категорий составило 163,0 тыс. голов (+0,1% к 1 января 2022 года), в том числе коров – 75,0 тыс. голов (-0,5%), поголовье свиней – 44,7 тыс. голов (- 7,6% к 1 января 2022 года), поголовье птицы – 3535 тыс. голов (- 3,6%).

Следует отметить, что развитие мясного животноводства сегодня наиболее сложно решаемая задача на территории области. За 2022 г. в хозяйствах всех категорий произведено скота и птицы на убой (в живом весе) 47,9 тыс. т (- 2,8% к 2021 г.).

Снижение производства скота и птицы на убой (в живом весе) произошло за счёт уменьшения производства мяса крупного рогатого скота (произведено 20,2 тыс. т, что на 5,6% меньше, чем в 2021 г.) и мяса свиней (произведено 8,6 тыс. т, 0,6% к 2021 году) при росте производства мяса птицы (произведено 18,7 тыс. т, +3,4% к 2021 г.).

Снижение производства мяса КРС и мяса свиней (в живом весе) произошло за счёт уменьшения производства в хозяйствах населения и крестьянских (фермерских) хозяйствах. В сельхозорганизациях (на долю которых приходится 79% произведенного мяса КРС и 90% мяса свиней) производство увеличилось (+ 0,8% и + 6,6%,

соответственно).

В 2022 г. завершена реализация следующих наиболее крупных инвестиционных проектов в отрасли сельского хозяйства:

– СПК колхоз «Нижне-Кулое» (Верховажский округ) завершил реализацию первой очереди инвестиционного проекта по строительству животноводческого комплекса на 685 голов крупного рогатого скота (коровник на 300 голов с доильным залом, оборудованным доильной установкой «Елочка»);
– ООО «Северодвинец» (Великоустюгский округ) завершило реализацию первой очереди инвестиционного проекта по строительству животноводческого комплекса на 1195 голов крупного рогатого скота (600 скотомест);
– СПК (колхоз) «Коминтерн-2» (Кирилловский район) завершил реализацию инвестиционного проекта по строительству нового роботизированного комплекса на 240 голов дойного стада, 1-я и 2-я очереди (дворы №1, №2 с беспривязным содержанием коров на 120 скотомест каждый, доение коров предусмотрено роботами Lely A5);
– ООО «Монза» (Междуреченский округ) завершило реализацию инвестиционного проекта по строительству коровника с привязным содержанием крупного рогатого скота [23];
– АО Племзавод «Заря» (Грязовецкий округ) завершило реализацию инвестиционного проекта по строительству кормоцеха с пунктом приема и пунктом хранения, что позволяет замкнуть полный цикл от зерносушильного комплекса до направления продукции в места хранения.

За 2022 г. рыбодобывающими организациями региона на водоемах области выловлено 1276 т рыбы, что составляет 92% к уровню 2021 г.

Объём производства товарной рыбы за 2022 г. составил 1047 т (102%, или +19 т, к уровню 2021 года). Объём выращивания форели составил 674 т, клариевого сома – 9 т, осетра – 356 т, сиговых видов рыб (чир, муксун, нельма) – 6 т, карпа – 2 т.

Получено пищевой чёрной икры 18,08 т (95,0% к 2021 г.). Производство рыбопосадочного материала составило 28 т, из них осетровых видов рыб – 5 т, радужной форели – 23 т.

Предприятиями пищевой и перерабатывающей промышленности за 2022 г. выпущено пищевой продукции на сумму 70,0 млрд рублей, индекс производства продукции к 2021 г. – 97,9% (в сопоставимых ценах), в том числе:

– производство молочной продукции – 38,6 млрд рублей (индекс производства к 2021 г. – 93,5% в сопоставимых ценах).

Уменьшились объемы производства молока жидкого обработанного на 11,5% (произведено 135,1 тыс. т), сметаны – на 5,9% (произведено 14,1 тыс. т), сыров – на 16,8% (произведено 2,8 тыс. т), продуктов кисломолочных (кроме сметаны) – на 15,4% (произведено 35,6 тыс. т), творога – на 7,5% (произведено 11,3 тыс. т), мороженого – на 12,6%. В то же время увеличилось производство молока и сливок сухих сублимированных на 39,3% (произведено 9,3 тыс. т), масла сливочного – на 20,4% (произведено 11,3 тыс. т), продуктов молочных сгущенных – в 2,0 раза.

Снижение объёмов производства цельномолочной продукции в 2022 г.

относительно предыдущего года обусловлено тем, что в показатели производства за 2021 г. включены объёмы молочной продукции АО «Вологодский Молочный АПК», которое не осуществляет производственную деятельность с июля 2021 года. Решением Арбитражного суда Вологодской области от 2 июня 2022 года АО «Вологодский молочный АПК» признано банкротом. В отношении общества открыта процедура конкурсного производства.

ООО «Вологодское мороженое» снизило объемы выпуска продукции на 12,6% в связи с сокращением отгрузок продукции на экспорт. За 2022 г. по сравнению с 2021 г. объём экспорта мороженого в натуральном выражении снизился на 63,2%.

Кроме того, в 2022 г. в весенне-летний период на фоне санкций предприятия пищевой промышленности региона, особенно переработчики молока, столкнулись с проблемой поставок упаковки. Фиксировалось сокращение ассортимента на 20-30%, увеличение доли продукции длительного хранения: за 2022 г. молочные предприятия увеличили выпуск сухого молока и сливок на 39,3%, масла сливочного – на 20,4%, продуктов молочных сгущенных – в 2,0 раза. Однако перераспределение молока-сырья в пользу молокоёмких продуктов длительного хранения не обеспечило выход на уровень объёма переработки молока-сырья 2021 г., сокращение выпуска цельномолочной продукции негативно повлияло на общеотраслевые показатели. С осени 2022 года ситуация с упаковкой стабилизировалась, в ассортиментную линейку возвращены привычные позиции молочной продукции.

– переработка и консервирование мяса и мясной пищевой продукции - 8,3 млрд рублей (индекс производства к 2021 году - 93,7% в сопоставимых ценах).

Уменьшилось производство по следующим товарным группам: мясо крупного рогатого скота (говядина и телятина) парное, остывшее или охлажденное, в том числе для детского питания – на 5,2% (произведено 1,5 тыс. т), свинина, кроме субпродуктов – на 13,7% (произведено 6,1 тыс. т), изделия колбасные – на 15,9% (произведено 9,9 тыс. т). Вместе с тем наблюдается увеличение производства консервов мясных (мясосодержащих) на 18,9% (произведено 1,2 млн усл. банок), мяса и субпродуктов пищевых домашней птицы – на 2,2%, полуфабрикатов мясных, мясосодержащих – на 3,1% (произведено 11,1 тыс. т).

За последние годы в структуре производства мясной продукции произошли существенные изменения, что обусловлено изменением структуры питания и снижением покупательской способности населения.

Потребление колбасных изделий в Вологодской области и Российской Федерации в целом с каждым годом сокращается. Основным фактором является повышенный интерес населения к здоровому образу жизни и, соответственно, здоровому питанию (замена калорийной продукции на более полезные для здоровья продукты). Вместе с тем, в регионе отмечается рост объёмов производства консервной продукции и мясных полуфабрикатов.

После введения в 2021 г. новых требований к детскому и школьному питанию – СанПиНом 2.3/2.4.3590-20 исключены из рациона колбасные изделия и сосиски, в регионе снизились объёмы производства под данный сегмент.

Следует отметить, что в 2022 г. прекратило деятельность ООО «Вологодский колбасный завод»,

входившее в пятерку лидеров по производству мясной продукции в регионе (доля переработки в структуре областных показателей составляла порядка 10-12%).

Немаловажным фактором, сдерживающим увеличение объёмов производства мясной продукции, является серьезная зависимость от ввозного сырья. Кроме того, местные предприятия на полках федеральных сетей вынуждены конкурировать с крупными российскими агрохолдингами, включающими площадки по собственному производству мясного сырья и его переработке, применяющими демпинг цен на готовую продукцию.

– производство хлебобулочных и мучных кондитерских изделий – 9,6 млрд рублей (индекс производства к 2021 году – 97,5% в сопоставимых ценах).

Уменьшилось производство хлебобулочных изделий недлительного хранения на 5,5% (произведено 54,1 тыс. т), что связано с ростом конкуренции на потребительском рынке, где каждая крупная торговая сеть имеет собственную пекарню; изделий хлебобулочных длительного хранения – на 13,1% (произведено 3,3 тыс. т). Вместе с тем наблюдается увеличение производства печенья и пряников, вафель, тортов и пирожных длительного хранения на 5,8% (произведено 41,3 тыс. т);

– переработка и консервирование фруктов и овощей -– 1,33 млрд рублей (индекс производства к 2021 году – 81,0% в сопоставимых ценах);
– производство прочих пищевых продуктов (шоколад и кондитерские сахаристые изделия, продукция для детского питания на зерновой основе) – 9,9 млрд рублей (индекс производства к 2021 году – 108,1% в сопоставимых ценах). Производство шоколада и кондитерских сахаристых изделий увеличилось на 22,4% (произведено 13,0 тыс. т), продукции молочной для детского питания – на 21,0%.

За 2022 г. выпущено напитков на сумму 6,8 млрд рублей, индекс производства к 2021 г. – 105,5% (в сопоставимых ценах).

В регионе активно развивается система добровольной сертификации пищевых продуктов и одноименный бренд – «Настоящий Вологодский продукт». По состоянию на 1 января 2023 года пользователями товарного знака являлись 80 организаций (+2 ед. к 2021 году), которые маркировали этим товарным знаком 4702 наименования продукции (+70 ед. к 2021 году. В 2011 году – 17 организаций- пользователей товарного знака и 400 наименований продукции, маркируемых товарным знаком.

В рамках проекта «Магазин «Настоящий Вологодский продукт» действовали 248 магазинов и тонаров, в том числе 220 магазинов –- на территории Вологодской области, 10 магазинов – в Архангельской области, 10 магазинов – в Санкт-Петербурге, 7 магазинов – в Ленинградской области, 1 магазин – в Республике Карелия.

На перспективу Вологодская область ставит перед собой следующие задачи:

– оптимизировать издержки производства, сократив использование всевозможных неорганических добавок, стимуляторов, с целью повышения качества сельскохозяйственной продукции;
– обеспечить потребность региона собственной сельскохозяйственной продукцией в полном объеме, производимой на территории;
– увеличить поставки сельскохозяйственной продукцией за пределы региона.

Существующий уровень сельхозпроизводства в области позволит на 100% обеспечить население области основными видами продовольственных ресурсов, характерными для нашей климатической зоны: область перекрывает собственную потребность в молоке в 2 раза, в яйце – в 1,7 раза, в картофеле – в 2 раза.

Выводы. Полученные в результате проведённого анализа данные показали, что Вологодский регион по производству продуктов питания развивается успешно. Так, в Российской Федерации по производству молока он занимает 4-е место, по валовому надою – 11-е место. В 2022 г производство молока в АПК области достигло уровня 607,7 тыс. т, что больше на 18,7 тыс. т или 3,2 % чем в 2021 г. Это самый высокий показатель производства молока в регионе за 29 лет. Дальнейшее развития агропромышленного комплекса следует осуществлять за счёт оптимизации издержек производства, внедрения передовых технологий в производство, рационального использования трудовых ресурсов. Всё это позволит производить больше сельскохозяйственной продукции в Вологодской области с наименьшими затратами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маклахов А.В., Живетин В.В., Задумкин К.А., Симонов Г.А. Состояние и перспективы развития льняного комплекса Вологодской области // Горное сельское хозяйство. 2018. № 2. С. 18-22. https: doi.org/10.25691/GSH.2018.2.003

2. Маклахов А.В. Маклахов А.В., Живетин В.В., Симонов Г.А. Некоторые аспекты модернизации экономики Нечерноземья (на примере Вологодской области) // Проблемы развития территории. 2020. № 2 (106). С. 81-94. https: doi.org/10.15838/ptd.2020.2.106.6

3. Маклахов А.В., Симонов Г.А., Живетин В.В. Инновация экономики Нечерноземной зоны России. На примере Вологодской области // Горное сельское хозяйство. 2020. № 2. С. 7-15. https: doi.org/10.25691/GSH.2020.2.001

4. Маклахов А.В., Симонов Г.А., Жестянников С.Г., Приятелев В.В. и др. Научные и практические аспекты развития АПК Вологодской области. Вологда. 2022.

5. Симонов Г.А., Гуревич В., Симонов А.Г. Демографические и производственные показатели в сельском хозяйстве // Экономист. 2013. № 4. С. 85-87. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35612138

6. Симонов Г.А. Симонов А.Г., Половникова Д. Комплексный подход к расселению и определению числа и размера населенных пунктов // Экономист. 2014. № 5. С. 90-95.

7. Симонов Г.А., Симонов А.Г., Половникова Д.А. Как эффективно рассчитать экономику населённого пункта на перспективу // Горное сельское хозяйство. 2018. № 1. С. 23-31. https://doi.org/10.25691/GSH.2018.1.006.

8. Маклахов А.В., Углин В.К., Никифоров В.Е, Тяпугин Е.А., Коновалова Н.Ю., Бургомистрова О.Н., Вахрушева В.В. Инновационные решения технологических процессов в животноводстве. Практическое пособие. Вологда-Молочное: СЗНИИМЛПХ-ВГМХА. 2016. С. 168.

9. Симонов Г.А., Гайирбегов Д.Ш., Федин А.С. Влияние препарата крезооферан на энергию роста ремонтного молодняка кур-несушек // Эффективное животноводство. 2013. № 5 (91). С. 22-23. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21621918.

10. Simonov G.A., Zoteev V.S., Sadykov M.M., Aligazieva P.A., Alikhanov M.P. Efficiency of growing crossbreed bull-calves of the mountain cattle with Russian polled breed // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 176, 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017602004
11. Varakin A. T., Kulik D. K., Salomatin V. V., Zoteev V. S., Simonov G. A. Hematological parameters of boars-producers at use of a natural mineral additive in a diet // International Journal of Innovative Technologies and Research Engineering. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 3837-3841 https: doi.org/10.35940/ijitee.A4884.119119
12. Зотеев В.С., Манджиев Д.Б., Гайирбегов Д.Ш., Симонов Г.А. Оптимизация уровня меди в рационе холостых овцематок // Овцы, козы, шерстяное дело. 2018. № 2. С. 31-34.
13. Мунгин В.В., Гайирбегов Д.Ш., Федин А.С. и др. Повышение яйценоскости и качества яиц перепёлок // Птицеводство. 2016. № 7. С. 31-34.
14. Симонов Г.А., Кузнецов В.М., Зотеев В.С. и др. Эффективное кормление высокопродуктивных молочных коров на разных физиологических стадиях // Эффективное животноводство. 2018. № 1 (140). С.28-29. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32472232
15. Гайирбегов Д.Ш., Магомедов М.Ш., Симонов Г.А., Манджиев Д.Б., Садыков М. М. Химический состав и энергетическая ценность мяса бычков в зависимости от типа кормления // Проблемы развития АПК региона. 2017. Т. 29. № 1(29). С. 71-74.
16. Епифанов В.Г. Зотеев В.С., Симонов Г.А., Заикин А.Е. Влияние кормовой добавки «Белкофф-М» на молочную продуктивность голштинизированных первотёлок // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 2 (34). С. 93-98
17. Зотеев В.С., Симонов Г.А., Магомедов М.Ш., Алигазиева П.А. Комплексная минеральная добавка в рационе лактирующих коров в летний период // Проблемы развития АПК региона. 2014. № 2 (18). С. 58-61.
18. Кутузова А.А., Зотов А.А., Тебердиев Д.М. Практическое руководство по ресурсосберегающим технологиям и приемам улучшения сенокосов и пастбищ в Волго-Вятском регионе. М.: Россельхозакадемия. 2014. 75 с.
19. Симонов Г.А., Магомедов М.Ш. Кормление КРС полнорационной смесью эффективнее // Комбикорма. 2013. № 10. С. 63-64.
20. Симонов Г., Гайирбегов Д., Федин А., Абрамов С. Ферросил повышает продуктивность кур-несушек // Комбикорма. 2015. № 4. С. 62. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/4_15/04_2015_62.pdf
21. Тяпугин Е.А., Симонов Г.А., Магомедов М.Ш., Алигазиква П.А. Качество молока коров при различных технологиях доения // Проблемы развития АПК региона. 2015. Т. 23. № 3(23). С. 75-78. URL: https://apk05.ru/documents/apk2015/apk_3_2015.pdf
22. Федин А., Гайирбегов Д., Симонов Г. Качество яиц кур при различных дозах БАД в комбикормах // Птицеводство. 2011. № 8. С. 26-27.
23. Маклахов А.В., Симонов Г.А., Марценюк Е.А. Современное состояние и пути развития АПК Вологодской области // Горное сельское хозяйство. 2021. №2. С. 11-17. https: doi.org/10.25691/GSH.2021.2.014

REFERENCES

1. Maklakhov V.A., Zhivetin V.V., Zadumkin K.A., Simonov G.A. The state and prospects of development of the linen complex of the Vologda Region. Gornoe sel'skoe khozyaistvo = Mountain agriculture. 2018;2:18-22. (In Russ.) https: doi.org/10.25691/GSH.2018.2.003
2. Maklakhov A.V., Zhivetin V.V., Simonov G.A. Some aspects of economic modernization in the Nonblack Soil Zone (case study of the Vologda Oblast). Problemy razvitiya territorii = Problems of Territory's Development. 2020;2 (106): 81-94. (In Russ.) https: doi.org/10.15838/ptd.2020.2.106.6
3. Maklakhov V.A., Simonov G.A., Zhivetin V.V. Innovation of the economy of the Non-Chernozem zone of Russia. On the example of the Vologda Region. Gornoe sel'skoe khozyaistvo = Mountain agriculture. 2020; 2:7-16. (In Russ.) https: doi.org/10.25691/GSH.2020.2.001
4. Maklakhov A.V., Simonov G.A., Zhestyannikov S.G., Prijatelev V.V. et al. Scientific and practical aspects of the development of agro-industrial complex of the Vologda Oblast. Vologda. 2022.
5. Simonov G.A., Gurevich V., Simonov A.G. Demographic and production indicators in agriculture. Ekonomist = Economist. 2013;4: 85-87. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35612138
6. Simonov G.A. Simonov A.G., Polovnikova D. An integrated approach to resettlement and determination of the number and size of settlements. Economist = Economist. 2014; 5: 90-95. (In Russ.)
7. Simonov G.A., Simonov A.G., Polovnikova D.A. How to calculate the economy of a settlement for the future effectively. Gornoe sel'skoe khozyaistvo = Mountain agriculture. 2018; 1: 23-31. (In Russ.) https://doi.org/10.25691/GSH.2018.1.006
8. Maklakhov A.V., Uglin V.K., Nikiforov V.E., Tyapugin E.A., Konovalova N.Yu., Burgomistrova O.N., Vakhrusheva V.V. Innovative solutions of technological processes in animal husbandry. Practical guide. Vologda-Molochnoye: SZNIIMLPKh-VGMKhA. 2016:168. (In Russ.)
9. Simonov G.A., Gayirbegov D.Sh., Fedin A.S. Effect of the krezooferan preparation on the growth energy of repair young laying hens. Effektivnoe zhivotnovodstvo = Effective Animal Husbandry. 2013; 5 (91): 22-23. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21621918
10. Simonov G.A., Zoteev V.S., Sadykov M.M., Aligazieva P.A., Alikhanov M.P. Efficiency of growing crossbreed bull-calves of the mountain cattle with Russian polled breed // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 176, 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017602004
11. Varakin A. T., Kulik D. K., Salomatin V. V., Zoteev V. S., Simonov G. A. Hematological parameters of boars-producers at use of a natural mineral additive in a diet // International Journal of Innovative Technologies and Research Engineering. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 3837-3841 https: doi.org/10.35940/ijitee.A4884.119119.
12. Zoteev V.S., Gaiirbegov D.Sh., Simonov G.A. Optimization of the level of copper in the diet of ewes idle. Ovtsy, kozy, sherstyanoe delo = Sheep, goats, wool business. 2018;2:31-34. (In Russ.)
13. Mungin V.V., Gaiirbegov D.Sh., Fedin A.S. et al. The improvement of the intensity of lay and egg quality in Japanese quails. Ptitsevodstvo = Poultry Farming. 2016; 7: 31-34. (In Russ.)
14. Simonov G.A., Kuznetsov V.M., Zoteev V.S. and others. Effective feeding of highly productive dairy cows at different physiological stages. Effektivnoe zhivotnovodstvo = Effective animal husbandry. 2018; 1 (140): 28-29. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32472232
15. Gayirbegov D. Sh., Magomedov M. Sh., Simonov G.A., Manzhiev D.B., Sadykov M.M. Chemical composition and energy value of meat of bull-calves depending on feeding types.

Problemy razvitiya APK regiona = Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex. 2017;1(29): 71-74. (In Russ.)
16. Epifanov V.G., Zoteev V.S., Simonov G.A., Zaikin A.E. Effect of feed additive "Belkoff-M" on milk productivity of Holsteinized first-calf heifers. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education 2014;2 (34): 93-98. (In Russ.)
17. Zoteev V.S., Simonov G.A., Magomedov M.Sh., Aligazieva P.A. Complex mineral supplement in the diet of lactating cows in the summer period Problemy razvitiya APK regiona = Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex. 2014;2 (18): 58-61. (In Russ.)
18. Kutuzova A.A., Zotov A.A., Teberdiev D.M. A practical guide to resource-saving technologies and techniques for improving hayfields and pastures in the Volga-Vyatka Region. Moscow: Russian Agricultural Academy. 2014. 75 p. (In Russ.)
19. Simonov G.A., Magomedov M.Sh. Feeding cattle with a complete mixture is more effective. Kombikorma = Compound Feeds. 2013; 10: 63-64. (In Russ.)
20. Simonov G., Gayirbegov D., Fedin A., Abramov S. Ferrosil increases the productivity of laying hens. Kombikorma = Compound Feeds. 2015; 4: 62. (In Russ.) URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/4_15/04_2015_62.pdf
21. Tyapughin E.A., Simonov G.A., Magomedov M.Sh., Aligazieva P.A. Influence of milking technologies on dairy cow milk quality. Problemy razvitiya APK regiona = Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex. 2015; 23 (3-23): 75-78. (In Russ.) URL: https://apk05.ru/documents/apk2015/apk_3_2015.pdf
22. Fedin A., Gayirbegov D., Simonov G. The quality of chicken eggs at various doses of dietary supplements in mixed feed. Ptitsevodstvo = Poultry Farming. 2011; 8: 26-27 (In Russ.)
23. Maklakhov A.V., Simonov G.A., Martsenyuk E.A. The current state and ways of development of the agro-industrial complex of the Vologda Region. Gornoe sel'skoe khozyaistvo = Mountain agriculture. 2021; 2: 11-17. (In Russ.) https: doi.org/10.25691/GSH.2021.2.014

Об авторах	**About the authors**
Алексей Васильевич Маклахов, д-р экон. наук, профессор кафедры инновационного менеджмента и управления проектами, советник ректора, Вологодский государственный университет, ул. Ленина, д. 15, г. Вологда, 160000, Россия; leon1906@yanx.ru	**Alexey V. Maklakhov**, DSc (Economy), Professor of the Department of Innovation Management and Project Management, Advisor to the Rector, Vologda State University, Lenin Street, 15, Vologda, 160000 Russia; leon1906@yanx.ru
Геннадий Александрович Симонов, д-р с-х наук, главный научный сотрудник, Вологодский научный центр РАН, СЗНИИМЛПХ, ул. Ленина, 14, г. Вологда, с. Молочное, 160555, Россия. gennadiy0007@mail.ru; https://orcid.org/0000–0003–4559-233X	**Gennady A. Simonov**, DSc (Agriculture), chief scientific officer, Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, SZNIIMLPH, Lenin Str., 14, Vologda, Molochnoye village, 160555, Russia; gennadiy0007@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4559-233X
Вячеслав Викторович Приятелев, канд. ист. наук, доцент, ректор,	**Vyacheslav V. Prijatelev**, Cand. Sc. (History), Associate Professor,

Вологодский государственный университет, ул. Ленина, д. 15, г. Вологда, 160000, Россия; leon1906@yanx.ru	Rector, Vologda State University, Lenin Str., 15, Vologda, 160000, Russia; leon1906@yanx.ru
Екатерина Алексеевна Марценюк, начальник отдела Управления анализа и прогнозирования социально-экономического развития, Комитет по экономической политике и стратегическому планированию г. Санкт-Петербурга, ул. Новгородская. д. 20, Санкт-Петербург, 191144, Россия. maklahowa.k@yandex.ru	**Ekaterina A. Martsenyuk**, Head of the Department of Analysis and Forecasting of Socio-Economic Development, Committee on Economic Policy and Strategic Planning of St. Petersburg, Novgorodskaya Street, 20, St. Petersburg, 191144, Россия; maklahowa.k@yandex.ru

Заявленный вклад авторов Г.А. Симонов – сбор, анализ и обобщение литературных данных, создание черновика рукописи. А.В. Маклахов – руководство исследованием, концептуализация, редактирование. В.В. Приятелев, Е.А. Марценюк – формальный анализ, оформление окончательного варианта рукописи.	**Authors' contribution** G.A. Simonov – literature data compiling, analysis, and summarizing; drafting the manuscript. A.V. Maklakhov – research concept and guidance, editing the manuscript. V.V. Prijatelev, E.A. Martsenyuk – formal analysis, shaping the final version of the manuscript
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	**Conflict of interests** The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 03.12.2023	**Received:** 03.12.2023
Одобрена после рецензирования: 25.12.2023	**Approved after reviewing:** 25.12.2023
Принята к публикации: 26.12.2023	**Accepted for publication:** 26.12.2023