АГРОЭКОИНЖЕНЕРИЯ 3 (108)

Прежнее название –ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МЕХАНИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА И ЖИВОТНОВОДСТВА

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-78977 от 14.08.2020

В номере:

- ✓ приведены результаты исследований солнечной электростанции на гетероструктурных фотоэлектрических модулях;
- ✓ рассмотрено использование цифрового подхода и оценка параметров облучательной установки в условиях светокультуры;
- ✓ представлены результаты исследований почвообрабатывающих агрегатов и роторно-центробежного измельчителя;
- ✓ дана оценка биотехнологического потенциала штамма BACILLUS SUBTILIS;
- ✓ рассмотрены биологизированная технология картофеля и оптимизация норм внесения минеральных удобрений под многолетние травы;
- ✓ представлены методы и технологии утилизации органических отходов животноводства;
- ✓ рассмотрены трёхфазная технология выращивания и откорма свиней, микроклимат в коровнике и выращивание аквакультуры;

Главный редактор:
Брюханов А.Ю.чл.-кор. РАН, д-р. техн. наук
Зам.главного редактора:
Максимов Д.А., канд. техн. наук;
Редакционная коллегия:
Попов В.Д., акад. РАН; д-р техн. наук
Вторый В.Ф. д-р техн. наук;
Ракутько С.А.д-р техн.наук;
Джабборов Н.И. д-р техн. наук;
Трифанов А.В. канд. техн. наук,
Гордеев В.В. канд. техн. наук;
Перекопский А.Н., канд. техн. наук;
Каледин Г.В. канд.техн. наук;
Папушин Э.А. канд. техн. наук
Васильев Э.В. канд. техн. наук;
Миронов В.Н. канд.техн. наук.
Смелик В.А., д-р техн.наук
Иностранные члены редакционной коллегии:
Валкама(Костина) Елена,Финляндия
Корнел Салаи, Венгрия
Андрес Аннук, Эстония

Над номером работали:
Плеханова Ю.В. редактор;
Левченко Л.В. перевод;
Научные редакторы номера:
Вторый В.Ф., Ракутько С.А.

Учредитель и издатель:
Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства-филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ"

Адрес редакции:
196625, Санкт-Петербург, Тярлево
Фильтровское шоссе, 3.
Телефон (812) 466-83-08
E-mail: nii@sznii.ru

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).
Полные тексты статей размещены на сайтах электронных библиотек: elibrary.ru; КиберЛенинка; ЭБС «Лань».

Отпечатано в ИАЭП-филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Подписано в печать 12.10.2021
Формат 84×108 $^{1}/_{16}$.
Объем 18,06 печ.л.
Тираж 300 экз

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА……4

Ефимова А.Н., Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Размук В.А. Результаты экспериментальных исследований солнечной электростанции …….....4

ЭНЕРГОЭКОЛОГИЯ СВЕТОКУЛЬТУРЫ……...13

Ракутько Е.Н., Ракутько С.А., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Цифровой двойник растения в светокультуре на примере перца (CAPSICUM ANNUUM L.) в рассадный период…….....13

Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Ракутько С.А.,Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Влияние компоновочных параметров облучательной установки на энергоэкологичность светокультуры……..33

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА…….....51

Минин В.Б., Захаров А.М., Мельников С.П., Васильев М.А. Продуктивность и качество картофеля, возделываемого по биологизированной технологии в условиях Ленинградской области ……51

Валге А.М., Сухопаров А.И., Папушин Э.А. Моделирование оптимальной нормы внесения минеральных удобрений при возделывании многолетних трав …….....66

Джабборов Н.И., Добринов А.В. Оценка эффективности использования почвообрабатывающего агрегата с кольцевыми рабочими органами в борьбе с борщевиком Сосновского …….75

Исупов А.Ю., Иванов И.И., Плотникова Ю.А., Сухопаров А.И. Исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя…….90

Джабборов Н.И., Добринов А.В., Шамонин В.И. Сравнительная оценка качества работы почвообрабатывающих агрегатов……..99

Лаптев Г.Ю., Дуняшев Т.П., Йылдырым Е.А., Ильина Л.А., Тюрина Д.Г., Новикова Н.И., Меликиди В.Х. Биотехнологический потенциал штамма *BACILLUS SUBTILIS* на основе данных полногеномного секвенирования……111

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА……117

Уваров Р.А., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Технологии утилизациинавоза в регионе Балтийского моря: анализ и наметившиеся тенденции……..117

Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Уваров Р.А. Методы экологически безопасного использования навоза и помета фермерскими хозяйствами в Ленинградской области……128

Базыкин В.И., Трифанов А.В. Оценка новой трехфазной технологии выращивания и откорма свиней…….140

Вторый В.Ф., Вторый С.В., Ильин Р.М. Исследование параметров микроклимата коровника переносным измерительным комплексом……..154

Тихонов Е.А., Трифанов А.В., Базыкин В.И. Влияние типа корма и качества воды на рост и выживаемость креветок *MACROBRACHIUM ROSENBERGII* в установках замкнутого водоснабжения……..164

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 631.9 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-4-12**

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А.Н. Ефимова; Е.В.Тимофеев канд. техн. наук; А.Ф. Эрк канд. техн. наук; В.А. Размук

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

В последнее время солнечная энергетика все более широко внедряется в сельское хозяйство. Это связано с необходимостью использовать новые генерирующие источники электроснабжения в распределенных сетях. Однако широкому применению фотовольтаических систем мешает высокая первоначальная стоимость установок и низкий коэффициент их использования. Целью исследования является определение эффективности применения солнечной электростанции и подтверждение ее характеристик в условиях Северо-Западной зоны России. Были проведены исследования разработанной и изготовленной экспериментальной автономной солнечной электростанции, состоящей из трех гетероструктурных фотоэлектрических модулей мощностью по 315 Вт каждый производства компании «Хевел» (Россия), аккумуляторной батареи, инвертора и контроллера заряда. Исследования проводились методом «пассивного эксперимента», данные опытов обработаны методом статистического анализа. Получены результаты эксплуатации электростанции в естественных условиях при различных величинах инсоляции и температурном диапазоне окружающего воздуха. Коэффициент полезного действия составил порядка 22%. Наиболее интересным представляется использование комбинированных электростанций для электроснабжения удаленных потребителей небольшой мощности (до 50-70 кВт) в фермерских хозяйствах. Это мелкотоварные производства – свинарники на 10-30 голов, крольчатники, помещения для содержания птицы, овец, коз и т.п. Перспективно также использование солнечной энергии для электроснабжения жилых домов.

Ключевые слова: солнечная энергия, фотоэлектрический модуль, потребитель электрической энергии, коэффициент полезного действия.

Для цитирования: Ефимова А.Н., Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Размук В.А. Результаты экспериментальных исследований солнечной электростанции // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. № 3 (108). С. 4-13

RESULTS OF THE EXPERIMENTAL STUDY OF A SOLAR POWER PLANT

A. N. Efimova; E.V. Timofeev, Cand. Sc. (Engineering); A.F. Erk, Cand. Sc. (Engineering); V.A. Razmuk;

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

Recently, solar energy has found expanding agricultural applications due to the pressing need for new power generating sources in distributed networks. However, the high acquisition costs of photovoltaic systems and the low utilisation rate hinder their widespread introduction. The study purpose was to estimate the efficiency of a solar power plant and to verify its specifications under climatic conditions of the North-West of Russia. The study tested a specially designed and manufactured autonomous solar power plant. The installation consisted of six hetero-structural photovoltaic modules with the capacity of 315 W each (Hevel Energy Group, Russia), a storage battery, an inverter, and a charge controller. The study used the "passive experiment" method and statistical data analysis. The results were obtained for the natural conditions under different insolation and ambient air temperature. The solar plant demonstrated around 22% efficiency. The combined small-size (up to 50-70 kW) electrical power stations were found most promising for electricity supply of the facilities in the remote private farms – pig houses for 10 to 30 head, houses for rabbits, poultry, sheep, and goats as well as residential houses.

Keywords: solar energy, photovoltaic module, electricity consumer, efficiency coefficient

For citation: Efimova A.N., Timofeev E.V., Erk A.F., Razmuk V.A. Results of the experimental study of a solar power plant. *AgroEkoInzheneriya.* 2021. No. 3(108): 4-13 (In Russian)

Введение

Среди возобновляемых источников энергии солнечная энергия имеет наибольший потенциал использования. В результате обзора литературных источников выявили, что солнечную энергию целесообразно получать и в климатических условиях Северо-Запада Российской Федерации [1, 2]. Традиционно считается, что использовать энергию солнца в этой зоне оптимально в летний период для подогрева воздуха при сушке сена, зерна, семян, подогрева воды на технологические нужды животноводческих ферм, подогрева воды для поения животных и т.п. [3, 4]. Использовать энергию солнца для получения электрической энергии считалось экономически не выгодно [5]. Однако, солнечная энергия используется для получения электрической энергии в странах с такими же климатическими условиями, в том числе у фермеров [6, 7, 8]. Кроме того, в последнее время на рынке появляется большое разнообразие технических средств для фотовольтаики, стоимость которых постоянно снижается [9, 10]. Актуальным представляется использование комбинированных электростанций для электроснабжения удаленных потребителей небольшой мощности (до 50-70кВт) в фермерских хозяйствах. Это мелкотоварное производство: свинарники на 10-30 голов, крольчатники, помещения для содержания птицы, овец, коз и т.п. [11]. Перспективно также использование солнечной энергии для электроснабжения жилых домов [12].

Материалы и методы

В ИАЭП были проведены исследования солнечных модулей в реальных условиях эксплуатации в режиме «пассивных экспериментальных исследований» с июня по октябрь 2020 года и на основе полученных данных определена эффективность их работы.

Целью проведенных исследований являлось определение оптимальных параметров и режимов работы солнечного модуля (наибольшее КПД). Для этого производились измерения режимов работы солнечного модуля установки (величины напряжения и тока) при

воздействии солнечной радиации в пасмурные и ясные дни.

Задачами проведённых исследований, являлось изучение изменения величин напряжения и тока солнечных модулей в реальных условиях эксплуатации и определение эффективности их работы.

В качестве объекта исследований принята фотоэлектрическая установка на основе трех гетероструктурных фотоэлектрических модулей HVL-315/HJT, инвертора Multihlus 24/1200/25 и контроллера Smart Solar представленных на рисунке 1.

Установка состоит из фотоэлектрических панелей (ФЭП), и потребителей электрической энергии (масляный радиатор). Фотоэлектрическая панель установлена на деревянном настиле на высоте 10,5м с углом наклона к горизонту 67°, ориентация ЮГ. Преобразование энергии в ФЭП основано на фотовольтаическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Следовательно, на выводах панели, возникает разность потенциалов, а при наличии нагрузки начинает протекать электрический ток.

При испытаниях фотоэлектрической установки замерам подлежали следующие факторы:

- интегральная величина солнечной радиации S, $Вт/м^2$;
- температура окружающего воздуха $t_{ВОЗ(n)}$, ^{O}C;

Напряжение:

- на фотоэлектрической панели $U_{ПАН(n)}$, B;
- у потребителя (нагрузка) $U_{НАГР(n)}$, B;

Электрический ток (в цепи):

- фотоэлектрическая панель - потребитель (нагрузка) $I_{(К-Н)}$, A;

Параметры влажности, скорости и направления ветра, атмосферное давление не учитывались ввиду крайне незначительного влияния на параметры солнечного модуля.

Уровень солнечной радиации измерялся с помощью пиранометра TES1333R. Точность которой составила 5 %. Измерения величин напряжения и электрического тока, на всех участках электрической цепи, проводили с помощью информационного дисплея котроллера «Color Control GX Relail». Датчики напряжения установлены на выводах ФЭП, и на контактах присоединения к потребителям точность измерения напряжения и тока равна соответственно 0,8 и 1 %. Датчики электрического тока установлены непосредственно в электрическую цепь на участках: ФЭП. была подключена постоянная нагрузка 800 Вт.

Рис. 1. Экспериментальная установка исследования гетероструктурного фотоэлектрического модуля

При естественной величине солнечной радиации фиксировали с периодичностью 30 минут в течении светового дня следующие основные факторы: величину потока солнечной радиации (S), напряжение($U_{ПАН(n)}$) и ток ($I_{(К-Н)}$) в цепи ФЭП – потребитель (нагрузка). КПД фотоэлектрической панели определяли как отношение максимальной снимаемой мощности к мощности падающего солнечного потока:

$$\eta = \frac{I_{(ФП-К)} \cdot U_{ПАН}}{S} \times 100 \quad \% \qquad (1)$$

Информация с датчиков напряжения и электрического тока поступали непрерывно на «Color Control GX Relail», где происходило ее архивирование в электронном виде с привязкой по времени.

Архивирование процессов в электронном виде дает возможность построить графики изменения исследуемых величин, увязанные по времени.

Обработка результатов исследований производилась на ПК с использованием программы EXCEL, способ обработки данных – корреляционно регрессивный анализ. На основе анализа данных определялось максимальное значение коэффициента полезного действия стационарных фотоэлектрических систем в зависимости от реальных внешних факторов.

Результаты и обсуждение

В результате эксперимента, получены зависимости коэффициента полезного действия (КПД) ФЭП от изменяемых внешних условий.

$$\eta = f(I_{(ФП-Н)}, U_{ПАН,} S)$$

Для примера в таблице 1 представлена выдержка из журнала исследований с 15 по 17 сентября 2020г.

Таблица

Журнал исследований

Дата	Время	Солнечная радиация	Напряжение на ФЭП	Сила тока цепи ФЭП	Мощность ФЭП	Напряжение на аккумуляторе	Сила тока цепи аккумулятора	Коэффициент преобразования солнечной энергии
дд.мм.гг	час	$Вт/м^2$	*В*	*А*	*Вт*	*В*	*А*	%
15.09.20	9:30	47,5	37,4	1,4	50	23,7	2	21,57
15.09.20	10:00	53	37,25	1,8	66	23,2	2,8	24,76
15.09.20	10:30	700	36,56	7,8	278	24,24	11,2	7,97
15.09.20	11:00	820	35,28	14,7	519	25,01	20,4	12,38
15.09.20	11:30	910	34,04	23,3	796	24,1	32,1	17,06
15.09.20	12:00	970	33,95	24,5	820	23,69	33,9	16,78
15.09.20	13:30	1027	32,98	25,9	841	25,2	32,8	16,28
15.09.20	14:00	1025	33,06	25	823	24,69	32,5	15,78
15.09.20	14:30	925	33,15	23,9	789	24,01	32,2	16,76

15.09.20	15:00	930	33,36	22,7	760	23,38	31,6	15,93
15.09.20	15:30	823	33,06	21,2	703	23,03	30	16,67
15.09.20	16:00	51	33,35	1,8	61	24,08	2,4	23,03
16.09.20	9:00	63,9	36,56	2,2	82	26,3	2,9	24,63
16.09.20	9:30	66,7	35,86	1,8	67	25,82	2,5	18,94
16.09.20	10:00	167,6	36,56	4,5	166	26,86	6	19,21
16.09.20	10:30	200,5	35	5,4	189	25,73	7,2	18,45
16.09.20	11:00	108,5	34,9	3,7	128	23,09	5,3	23,29
16.09.20	11:30	74,4	35,85	2,4	85	21,9	3,6	22,63
16.09.20	12:00	105,6	35,73	2,5	88	22,12	3,9	16,55
16.09.20	13:00	206,5	36,74	6,3	217	25,61	8,1	21,94
16.09.20	13:30	27,4	39,35	0,4	17	27,01	0,6	11,24
16.09.20	14:00	854	35,33	21,7	770	23,5	32	17,57
16.09.20	14:30	112,5	35,84	3,7	128	24,5	5	23,07
16.09.20	15:00	61,7	33,45	1,9	64	24,59	2,5	20,16
16.09.20	15:30	140	35,04	4,2	146	25,25	5,6	20,57
16.09.20	16:00	39,4	35,35	1	35	25,28	1,3	17,56
17.09.20	10:00	81,8	38,07	2,2	91	24,65	3,5	20,04
17.09.20	10:30	141	36,81	3,2	116	25,1	4,4	16,35
17.09.20	11:00	30,7	35,29	1	35	25,75	1,3	22,50
17.09.20	11:30	475	34,36	17,8	641	26,43	2,61	25,20
17.09.20	12:00	174,8	37,3	4,8	176	23,3	7,4	20,04
17.09.20	13:00	211,7	37	7,5	270	24,9	10,3	25,65
17.09.20	13:30	93,4	37,26	2,7	98	25,31	3,7	21,08
17.09.20	14:00	110,4	37,7	2,6	102	25,63	4	17,37
17.09.20	14:30	79,1	37,06	2,2	84	26,38	3	20,17
17.09.20	15:00	34,4	35,29	0,9	34	22,89	1,4	18,07
17.09.20	15:30	60,3	36,37	1,6	62	23,42	2,6	18,89
17.09.20	16:00	38,2	35,22	1,5	42	23,47	1,6	27,06

Для анализа полученных данных построены графики изменения мощности гетероструктурных солнечных модулей и инсоляции солнца, вольтамперная характеристика, а также графики изменения силы тока и напряжения солнечных модулей в течение светового дня, которые представлены на рисунках 2 и 3.

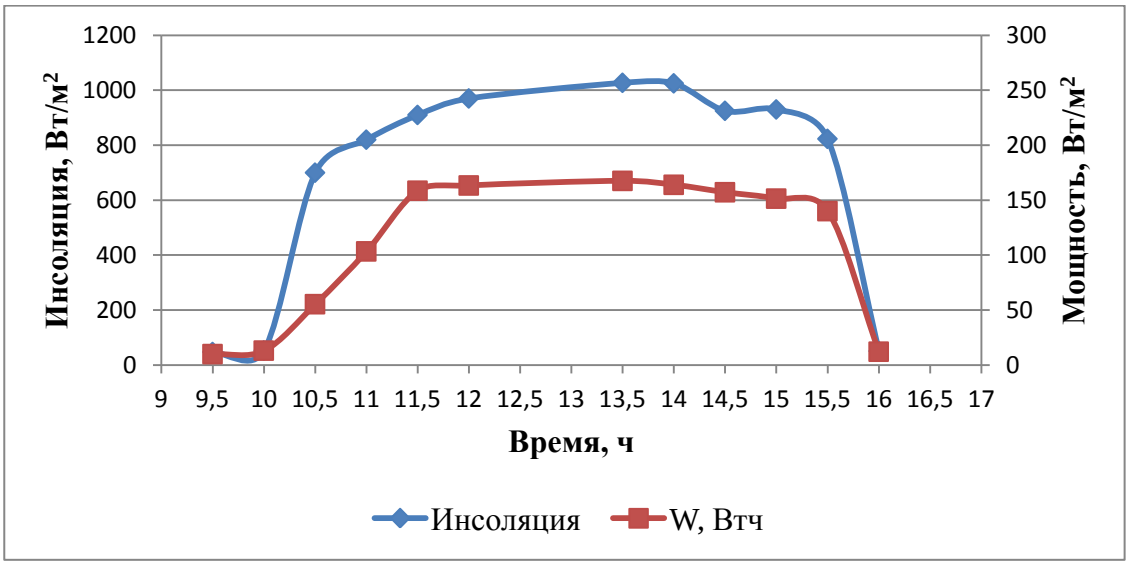


Рис. 2. Динамика изменения мощности гетероструктурных солнечных модулей и инсоляции солнца

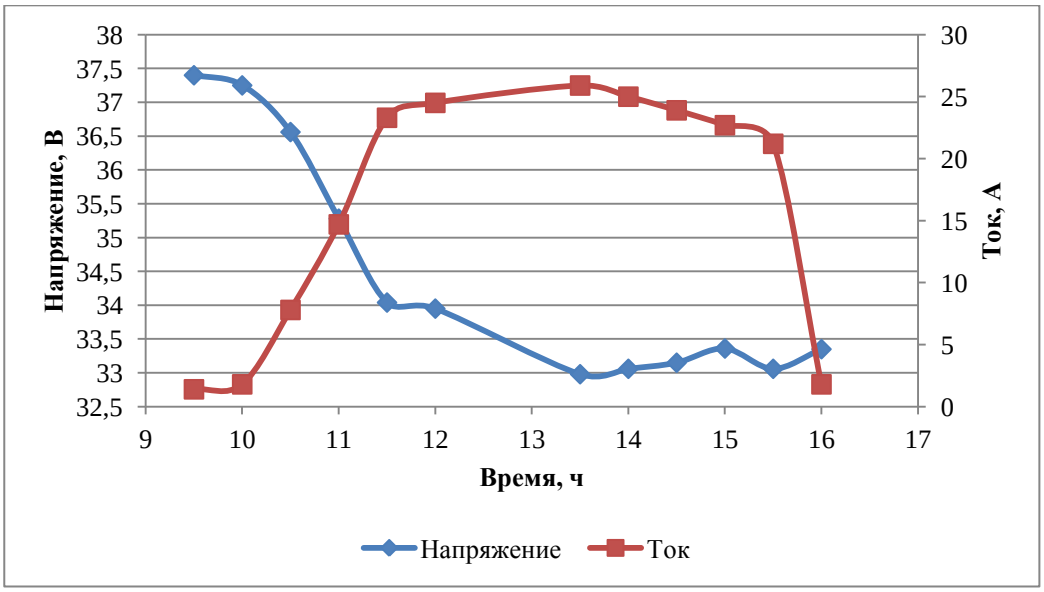


Рис. 3. Динамика изменения силы тока и напряжения солнечных модулей

Из полученных графиков видно прямую зависимость мощности от инсоляции, что характеризует нормальный режим работы фотоэлектрической станции. При этом график изменения силы тока и напряжения солнечных панелей показывает характер работы, когда номинальная мощность панели определяется при напряжении в пределах 30 – 40В и силе тока в пределах 15 – 25А.

Для выявления зависимости солнечной инсоляции и КПД панели средствами анализа MS Excel был произведён регрессионный анализ данных с уровнем надежности 95%.

Динамика изменение КПД в зависимости от инсоляции представлена на рисунке 4.

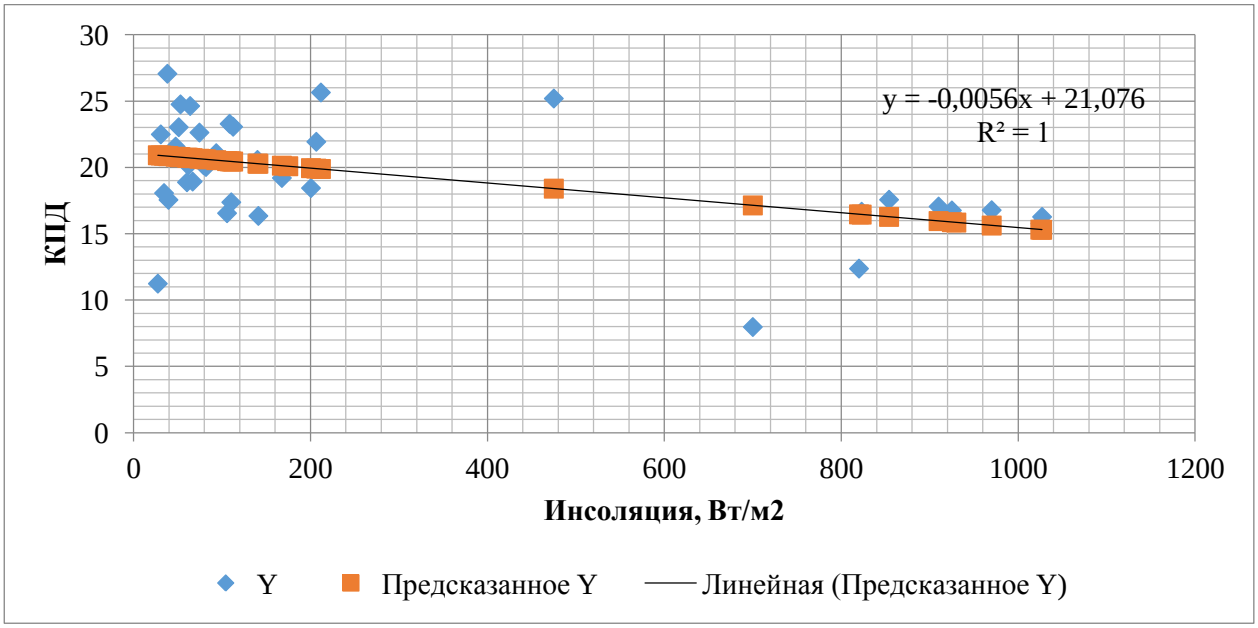


Рис. 4. Зависимость КПД от инсоляции солнечных гетеро структурных модулей

Наибольшее значение КПД исследуемые панели получают при низких значениях инсоляции до 200 Вт/м^2, при таких условиях КПД доходит до 27%. При более высоких значениях инсоляции КПД снижается до 18-19%. Это объясняется тем, что часть энергии преобразуется в тепловую. Среднее же значение по результатам анализа равно 21,07%.

Исходя из полученных значений мощности, определен коэффициент полезного действия для солнечных панелей, как отношение вырабатываемой к номинальной мощности. Проведенные исследования показали, что коэффициент преобразования для исследуемых модулей был определен на уровне 22% для условий Северо-Запада РФ.

Выводы

Исходя из полученных значений мощности, определен коэффициент полезного действия для солнечных панелей, как отношение вырабатываемой к номинальной мощности. Проведенные исследования показали, что коэффициент преобразования для исследуемых модулей был определен на уровне 22 % для условий Северо-Запада РФ, что практически равно паспортным характеристикам панели, которые равны 23%.

Полученные значения коэффициента полезного действия солнечной энергии показывают, что представленные панели являются эффективными и возможно их применение в качестве альтернативных источников энергии. Также с учетом полученных данных о накоплении эл. энергии за исследованный период, можно сделать вывод, что использование их в условиях Северо-Запада в качестве альтернативных и резервных источников энергии является экономически целесообразным. Данные установки можно применять в качестве основного источника электрической энергии на небольших и отдаленных объектах сельскохозяйственного предприятия. Это позволит снизить издержки на эксплуатацию центрального энергоснабжения таких объектов на 50 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Судаченко В.Н., Размук В.А., Ефимова А.Н. Целесообразность использования солнечных электростанций на сельской территории // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 3 (100). С. 9-20.

2. Kryuchenko Yu.V., Sachenko A.V., Bobyl A.V. et al. Evaluation of the annual electric energy output of an a-Si:H solar cell in various regions of the CIS countries. Energy Policy. 2014. № 68, pp. 116-122

3. Бровцин В.Н., Эрк А.Ф. Математическая модель солнечной водонагревательной установки // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2013. № 84. С. 90-112

4.Бровцин В.Н., Эрк А.Ф. Оптимизация параметров солнечной водонагревательной установки методом вычислительного эксперимента. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2013. № 84. С. 112-125

5.Ярымбаш Д.С., Даус Ю.В. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций Електротехніка та електроенергетика. 2014. № 1. С. 74-78.

6. Global Market Outlook for Solar Power 2020-2024. Solar Power Europe. Reports. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2020-2024/ (дата обращения 27.09.2021)

7. Yano A., Tohoda S., Matsuyama K., Nakamura Y., Nishiwaki T., Fujita K., Taguchi M., Maruyama E. 24.7% Record Efficiency HIT® Solar Cell on Thin Silicon Wafer // A. Mine, A. Jäger-Waldau, P. Helm (eds.) Proc. of the 28th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, 30 Sep- 04 Oct 2013, Paris, France. München, Germany: WIP. 2013. pp. 748-752

8. Jordan D. C., Kurtz S. R. Photovoltaic degradation rates-an analytical review. Progress in photovoltaics: Research and Applications. 2013. Vol. 21. No. 1, pp. 12-29 https://doi.org/10.1002/pip.1182

9. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Vlasiuk V.M., Sokolovskyi I.O., Evstigneev M. The influence of the exciton nonradiative recombination in silicon on the photoconversion efficiency // M. Topic, P. Helm, N. Taylor (eds.) Proc. of the 32nd Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, 20-24 June 2016, Munich, Germany. München, Germany: WIP. 2016. P. 141-148 (In English)

10. Richter A., Benick J., Feldmann F., Fell A., Hermle M., Glunz S.W. N-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation // Solar Energy Mater. Solar Cells. 2017. Vol. 173. pp. 96-105

11.Said M., EL-Shimy M., Abdelraheem M.A. Photovoltaics Energy: Improved Modeling and Analysis of the Levelized Cost of Energy (LCOE) and Grid Parity - Egypt case study // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2015. Vol. 9. pp. 37-48.

12.Даус Ю.В., Юдаев И.В. Анализ вариантов электроснабжения потребителя электрической энергии от солнечной фотоэлектростанции
Вестник ВИЭСХ. 2018. № 2 (31). С. 90-94.

REFERENCES

1. Timofeev E.V., Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A., Efimova A.N. Tselesoobraznost' ispol'zovaniya solnechnykh elektrostantsii na sel'skoi territorii [Feasibility of using solar power plants in rural areas]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019. No. 3 (100): 9-20 (In Russian)

2. Kryuchenko Yu.V., Sachenko A.V., Bobyl A.V. et al. Evaluation of the annual electric energy output of an a-Si:H solar cell in various regions of the CIS countries. Energy Policy. 2014. No. 68: 116-122 (In English)

3. Brovtsin V.N., Erk A.F. Matematicheskaya model' solnechnoj vodonagrevatel'noj ustanovki [Mathematical model of solar water heaters]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2013. No. 84: 90-112 (In Russian)

4. Brovtsin V.N., Erk A.F. Optimizatsiya parametrov solnechnoi vodonagrevatel'noi ustanovki metodom vychislitel'nogo eksperimenta [Optimization of parameters of a solar water heating installation through computational experiment]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2013. No. 84: 112-125 (In Russian)

5. Yarymbash D.S., Daus Yu.V. Osobennosti identifikatsii intensivnosti solnechnoi radiatsii pri proektirovanii solnechnykh elektrostantsii [Solar radiation intensity identification features for solar power stations designing]. Електротехніка та електроенергетика. 2014. No. 1: 74-78 (In Russian)

6. Global Market Outlook for Solar Power 2020-2024. Solar Power Europe. Reports. Available at: https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2020-2024/ (accessed 27.09.2021)

7. Yano A., Tohoda S., Matsuyama K., Nakamura Y., Nishiwaki T., Fujita K., Taguchi M., Maruyama E. 24.7% Record Efficiency HIT® Solar Cell on Thin Silicon Wafer. In: A. Mine, A. Jäger-Waldau, P. Helm (eds.) Proc. of the 28th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, 30 Sep- 04 Oct 2013, Paris, France. München, Germany: WIP. 2013: 748-752

8. Jordan D. C., Kurtz S. R. Photovoltaic degradation rates-an analytical review. Progress in photovoltaics: Research and Applications. 2013. Vol. 21. No. 1, pp. 12-29 https://doi.org/10.1002/pip.1182

9. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Vlasiuk V.M., Sokolovskyi I.O., Evstigneev M. The influence of the exciton nonradiative recombination in silicon on the photoconversion efficiency // M. Topic, P. Helm, N. Taylor (eds.) Proc. of the 32nd Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, 20-24 June 2016, Munich, Germany. München, Germany: WIP. 2016. P. 141-148 (In English)

10. Richter A., Benick J., Feldmann F., Fell A., Hermle M., Glunz S.W. N-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation. Solar Energy Mater. Solar Cells. 2017. Vol. 173: 96-105

11. Said M., EL-Shimy M., Abdelraheem M.A. Photovoltaics Energy: Improved Modeling and Analysis of the Levelized Cost of Energy (LCOE) and Grid Parity - Egypt case study. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2015. Vol. 9: 37-48.

12. Daus Yu. V., Yudaev I.V. Analiz variantov elektrosnabzheniya potrebitelya elektricheskoi energii ot solnechnoi fotoelektrostantsii [Analysis of power supply options of electric energy consumer from solar photoelectric power station]. Vestnik VIESH. 2018. No. 2 (31): 90-94 (In Russian)

ЭНЕРГОЭКОЛОГИЯ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

УДК 573.7:581.41:58.084.1: 631.544.45 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-13-33**

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК РАСТЕНИЯ В СВЕТОКУЛЬТУРЕ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЦА *(CAPSICUM ANNUUM L.)* В РАССАДНЫЙ ПЕРИОД

Е.Н. Ракутько; С.А. Ракутько, д-р техн.наук; А.П. Мишанов; А.Е. Маркова, канд с.-х.наук

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

Рассмотрен опыт применения цифровых двойников в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Концептуально цифровой двойник растения должен представлять собой виртуальный объект, отображающий реальное растение в физическом пространстве. Показана преемственность современных концепций, связанных с цифровым двойником растения, с разработанной ранее в лаборатории энергоэкологии светокультуры иерархической информационной моделью искусственной биоэнергетической системы. Целью работы является разработка математической модели цифрового двойника растения, ее апробация на растениях перца, выращиваемых в условиях светокультуры, а также выявление чувствительности параметров модели к изменению спектрального состава излучения. Предложенная математическая модель цифрового двойника растения включает в себя четыре модуля: 1) первичные биометрические параметры; 2) оптические свойства листьев; 3) описание филлотаксиса и 4) ассимиляционные индексы растения. Эксперимент проводили на растениях сладкого перца в рассадный период. Облученность составляла 200 мкмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$. Растения выращивали под излучением с различными типами спектра, соотношение энергии красного и синего диапазонов у которых различалось более чем в три раза. Выявлено наличие изомерии генетической спирали. Для всех фиксируемых параметров тип изомерии филлотаксиса статистически не значим. Действие фактора спектра на высоту растения, среднюю толщину листа, содержание хлорофилла в листьях и коэффициенты пропускания листьев значимо. Найдено, что соотношение частот появления левых и правых изомеров по всей совокупности растений составляет 2:1. Угол дивергенции между последовательными листьями близок к «золотому» углу в 137.5°. Чувствительность параметров филлотаксиса к спектру не выявлена. Ряд ассимиляционных индексов растений показал статистически значимую зависимость от спектра излучения. Эффективность использования излучения в процессе фотосинтеза оказалась на 28% выше под спектром с повышенным содержанием синего излучения. Созданный цифровой двойник растения имеет перспективы усовершенствования в части разработки программной оболочки, позволяющей анализировать развитие растения перца в рассадном периоде.

Ключевые слова: сельское хозяйство, светокультура, цифровой двойник, Индустрия 4.0, виртуальная модель, моделирование.

Для цитирования: Ракутько Е.Н., Ракутько С.А., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Цифровой двойник растения в светокультуре на примере перца *(CAPSICUM ANNUUM L.)* в рассадный период // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.13-33

DIGITAL TWIN OF A PLANT IN GREENHOUSE HORTICULTURE: CASE STUDY OF PEPPER (*CAPSICUM ANNUUM L.)* IN TRANSPLANT PERIOD

E.N. Rakutko; S.A. Rakutko, A.P. Mishanov; A.E. Markova,

DSc (Engineering); Cand Sc. (Agriculture)

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

The article considers the experience of using digital twins in various industries and agriculture. Conceptually, digital twins should be a virtual representation of real plants in physical space. The modern concepts associated with digital twins of crops are shown to succeed to the information model of an artificial bioenergy system developed earlier in the laboratory of energy and ecology aspects of greenhouse horticulture. The work aimed to develop a mathematical model of a digital twin of an individual plant, to test it on pepper plants grown in artificial lighting conditions and to determine the response of the model parameters to the light quality. The created mathematical model included four modules: 1) primary biometric parameters; 2) optical properties of leaves; 3) description of phyllotaxis and 4) assimilation indices of plants. An experiment was carried on sweet pepper. The irradiance was 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Plants were grown under radiation with different amounts of energy in the red and blue bands, which differed by more than three times. The presence of isomerism of the genetic spiral was revealed. The type of phyllotaxis isomerism was statistically insignificant for all recorded parameters. The effect of the light quality factor on the plant height, leaf average thickness, chlorophyll content and transmittance was statistically significant. The ratio of the frequencies of occurrence of left and right isomers for the entire set of plants was found to be close to 2:1. The angle of alignment between successive leaves was close to the “golden” angle of 137.5°. The response of phyllotaxis parameters to the light quality was not revealed. Several assimilation indices showed statistically significant dependence on light quality. The radiation use efficiency in the process of photosynthesis was found to be 28% higher under the spectrum with increased content of blue radiation. The created digital twin of a plant has prospects for improvement in terms of creating a software shell that allows analyzing the development of plants at the transplant stage.

Keywords: agriculture, greenhouse horticulture, digital twin, Industry 4.0, simulation model, modeling

For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N., Mishanov A.P., Markova A.F. Digital twin of a plant in greenhouse horticulture: case study of pepper (*Capsicum Annuum L.)* in transplant period. *AgroEkoInzheneriya* 2021. No. 3(108): 13-33 (In Russian)

Введение. В настоящее время большое внимание в научных исследованиях и производственной деятельности уделяется цифровизации, цифровой трансформации и внедрению цифровых продуктов на предприятиях различных отраслей народного хозяйства. Важнейшим в этой области является понятие цифрового двойника (ЦД).

Впервые термин «цифровой двойник» (digital twin) как виртуальный, цифровой эквивалент физического объекта был использован М. Гривсом в 2003 г. Концептуально предложенная модель состояла из трех основных частей: 1) физических объектов в реальном пространстве, 2) виртуальных объектов в виртуальном пространстве, и 3) информационных связей между физическими и виртуальными объектами

[1]. Другое определение ЦД апеллирует к интегрированному мультифизическому, масштабному, вероятностному моделированию сложной системы с использованием физических моделей и датчиков для отображения ее состояния [2]

Данный подход наиболее развит для промышленных предприятий. В рамках виртуальной модели физического объекта или системы математические зависимости связывают отдельные параметры объекта. База данных параметров пополняется информацией с интеллектуальных датчиков на протяжении всего жизненного цикла объекта в режиме реального времени. ЦД позволяет моделировать в виртуальном пространстве поведение всего объекта или системы при изменении параметров отдельных составляющих. Внутренняя структура ЦД позволяет оптимизировать решение многокритериальных задач в целях повышения оперативности и эффективности функционирования предприятия. Использование ЦД дает возможность проведения множества виртуальных испытаний на виртуальной модели процесса в целях поиска оптимальных режимов по тому или другому критериям. По сравнению с натурными испытаниями, при этом обеспечивается существенная экономия материальных ресурсов, сокращается их продолжительность [3]. Применение ЦД в полной мере соответствует переходу к использованию кибернетических систем, что, в свою очередь, является одним из аспектов стратегий Индустрии 4.0 [4].

Концепция ЦД является эволюцией ряда существующих областей исследований и промышленных технологий [5]. Однако, несмотря на то, что эта концепция существует уже достаточно продолжительное время, ее реальное влияние проявляется только в последние годы. По мере увеличения числа конечных пользователей происходит адаптация концепции ЦД в различных отраслях благодаря ее потенциалу в сокращении эксплуатационных расходов и затрат времени, возможности увеличения производительности, улучшения обслуживания, повышения доступности, создания более безопасной рабочей среды и т.д. Выявление и понимание потенциала ЦД в любом секторе экономики дает возможность для разработки инструментов Индустрии 4.0, диапазон возможностей которых простирается от мониторинга и учета до моделирования и прогнозирования [6].

Наряду с исследованиями по концептуальным вопросам, предложены частные трактовки понятия ЦД. Например, для пищевого продукта разработана математическая имитационная модель, сочетающая многообразие факторов, включая его химический состав, функционально-технологические свойства и органолептические показатели [7]. Создана математическая модель ЦД для бесколлекторного двигателя постоянного тока, как элемента производственной линии, управляемого оптимально с применением нелинейного алгоритма. Моделирование на ЦД путем полного перебора дискретных значений параметров объекта с поиском элементов матриц управления и состояния по критерию минимума затрат энергии позволяет корректировать программу управления мехатронным устройством [8].

Сельское хозяйство в целом со своими подотраслями предоставляет большие возможности для реализации концепции ЦД, позволяющих достичь нового уровня продуктивности, устойчивости и интеллектуализации.

Использование ЦД в качестве центрального средства управления аграрным предприятием позволяет отделить физические потоки от планирования и контроля. Как следствие, фермеры могут управлять процессами удаленно на основе цифровой информации в реальном времени вместо того, чтобы полагаться на прямое наблюдение и ручные операции на

рабочих местах. Это позволяет им немедленно действовать в случае возможных отклонений и моделировать эффекты вмешательств на основе реальных данных. В рамках европейского проекта Internet of Food & Farm 2020 концепция ЦД нашла применение в земледелии, животноводстве, тепличной отрасли, органическом овощеводстве [9].

Так, исследована возможность применения ЦД в области поставок и хранения сельскохозяйственной продукции для количественного определения потерь качества плодов и овощей. Условия хранения и транспортировки характеризуются, как правило, уникальным и непредсказуемым набором температурных и газовых условий атмосферы. ЦД помогают определить результирующую, в значительной степени неизученную, эволюцию качества пищевых продуктов после уборки урожая, что особенно актуально для скоропортящихся видов. ЦД предоставляют экспортерам, розничным продавцам и потребителям действенные данные, например, об оставшемся сроке хранения каждой партии, на которых могут основываться логистические решения и маркетинговые стратегии.

ЦД также помогают диагностировать и прогнозировать потенциальные проблемы в цепочках поставок, которые могут снизить качество продуктов питания и вызвать потери. Они могут даже предложить профилактические меры, адаптированные к транспортировке, для сокращения потерь продуктов питания в розничной торговле и домохозяйствах [10].

Применение ЦД в животноводстве позволяет улучшить использование техники и оборудования, а также здоровье и благополучие сельскохозяйственных животных, психическое и эмоциональное состояние которых можно контролировать с помощью технологий распознавания. Использование ЦД вместе с технологиями моделирования, симуляции и дополненной реальности может помочь разработать энергоэффективные конструкции для содержания животных, прогнозировать циклы размножения, предотвращать негативное поведение и многое другое [11].

В садоводстве эволюция систем выращивания в сторону более плотных планировок делает мониторинг растений все более важным. Технологический прогресс значительно расширил возможности собирать, сопоставлять и анализировать данные по каждому дереву сада. ЦД в данном случае - это виртуальная модель каждого дерева и окружающего пространства, это непрерывно обучающаяся система, которая может запрашивать автоматически в режиме реального времени необходимые параметры для анализа (состояние растений, их структуру, наличие стресса, качество плодов и т.д.) [12]

Коммерческий тепличный сектор в значительной степени ориентирован на оптимальное использование энергии с множеством новых концепций, представленных в последние годы, например вертикальное земледелие и городское сельское хозяйство. ЦД позволяют использовать Интернет вещей и большие данные для моделирования альтернативных операционных стратегий без ущерба для текущей работы, оптимизации процесса производства в теплице и общаться с другими ЦД, описывающие подсистемы теплицы (климат, энергоснабжение). ЦД теплицы могут прогнозировать состояние теплицы, используя ранее полученные данные и данные в реальном времени, поступающие из информационных баз и датчиков [13].

В литературе представлена формализованная модель цифрового двойника растения (ЦДР), действующего на основе графа переходов по состояниям, соответствующим стадиям развития растения, описанным в базе знаний. Разработан прототип интеллектуальной системы ЦДР, в котором реализованы функции создания и редактирования онтологии растений, просмотра

и модификации базы знаний об урожае, моделирования продолжительности стадий развития растения и прогноза урожайности. С использованием ЦДР проведены эксперименты по оценке длительности стадий развития растения и изменения урожайности озимой пшеницы. ЦДР является основной частью интеллектуальной кибер-физической системы и призван не только отражать реальное состояние растения на каждой стадии, но и помогать в управлении и моделировании поведения растения в будущем [14].

Считается, что сельскому хозяйству еще предстоит пройти долгий путь, чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами ЦД. Исследователи в области сельского хозяйства и другие заинтересованные стороны должны прилагать усилия, чтобы с учетом самых последних достижений найти связи между проблемами сельского хозяйства и проблемами, которые решаются с помощью ЦД в других дисциплинах. Даже несложная модель ЦД с простой функциональностью (например, мониторинга, интерфейса и аналитики), может быть трансформирована путем добавления соответствующих компонентов, которые уже присутствуют в других дисциплинах, в оригинальное полномасштабное приложение.

Обязательным является учет характерных отличий, проистекающих от особенностей сельского хозяйства. Это, прежде всего, наличие живых систем (сюда можно отнести и скоропортящиеся продукты), а так же эффекты масштаба. Здесь имеется в виду как пространственное измерение (от отдельного растения до целого сельскохозяйственного региона), так и временн*о*е (например, онтогенез растений) [15].

Отмечают, что применение ЦД в сельском хозяйстве также связано с потенциальными ловушками, например, возможностью нанести необратимый ущерб живым объектам при неадекватном управлении ими [16]. В случае сложных физических двойников применение идеологии ЦД может быть вообще затруднено из-за большого количества необходимых ресурсов для моделирования взаимодействий в сельскохозяйственных системах, которые еще нельзя точно определить количественно [17].

Для создания ЦД в такой мультидисциплинарной области, как сельское хозяйство, необходимо наличие специальных знаний из ряда технологических областей и навыков у разработчиков, во избежание проблем с интеграцией компонентов модели [18].

Целью работы является разработка концепции ЦДР и его математической модели, апробация результатов для растения перца в рассадном периоде, выращиваемого в условиях светокультуры, а так же выявление чувствительности параметров модели к изменению спектрального состава источников света.

Материалы и методы

Анализ литературных источников дает представление о системе управления светокультурой с использованием ЦДР (рис. 1).

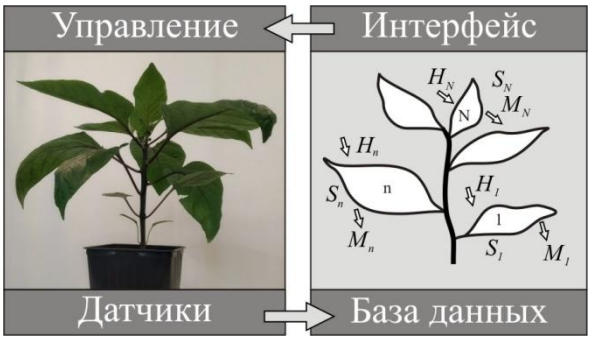


Рис. 1. ЦДР в системе управления Светокультурой

В наших предыдущих исследованиях прототипом цифрового двойника светокультуры (ЦДС) является иерархическая информационная модель искусственной биоэнергетической системы светокультуры (ИБЭСС) [19]. Иерархия представляет собой вложение элементов один в другой, сочетающее жесткие связи и

автономную независимость как совокупность взаимодействующих подсистем. Каждая подсистема образует отдельный иерархический уровень, который характеризуется как различным числом и расположением, так и природой элементов системы. Отдельный уровень является элементарной ступенью для вышележащего и сложной ступенью для нижележащего. Взаимодействие элементов на более высоком уровне определяется их свойствами на нижнем уровне. Отдельный иерархический уровень достаточно автономен и допускает свое характерное описание. Каждый уровень характеризуется структурной специфической организацией, не копирующей предыдущие.

Данный подход полностью лежит в русле энергоэкологии светокультуры как актуального междисциплинарного научного направления [20]. Иерархический подход к моделированию потоков субстанции (вещества и энергии) в ИБЭСС приводит к понятию наилучших доступных технологий светокультуры (НДТС), представляющих собой технологии производства продукции растениеводства в контролируемых условиях, выбираемых для конкретных условий и требований из достигнутого уровня науки, техники и технологий по критерию минимальных удельных энергетических затрат и воздействия на окружающую среду при условии обеспечения экологически чистой конечной продукции. Предложено понятие энергоэкологичности светокультуры как свойства технологического процесса выращивания растений в ИБЭСС соответствовать требованиям энергоэффективности и экологичности, оцениваемое по близости к НДТС. Выделены частные показатели энергоэкологичности на различных иерархических уровнях ИБЭСС, соответствующих уровням ЦДС: I) биологический объект (растение), II) технологический процесс облучения растений, III) культивационное сооружение в целом, IV) получаемая полезная продукция, V) внешняя среда [21]. В современной терминологии, каждый уровень иерархии ИБЭСС может быть представлен своим ЦД.

Методика моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры с использованием ЦДС включает анализ эффективности преобразования энергии на различных этапах ее преобразования: 1) источнике электрического питания; 2) источнике излучения; 3) оптической части; 4) пространственного распределения потока; 5) поверхностного распределения потока; 6) отдельного растения или ценоза в целом. Предложены формулы для вычисления энергоемкости каждого из блоков ИБЭСС [22].

Обоснована необходимость построения эмпирических математических моделей динамики биометрических параметров растения, которые позволяют оптимизировать продукционный процесс путем подбора необходимых сочетаний внешних факторов в целях повышения продуктивности растений. Выявлено существенное различие биометрических параметров растений томата, выращиваемых под излучением с различным спектром. Получены эмпирические модели основных биометрических параметров растения томата [23].

Предлагаемая в рамках энергоэкологического подхода математическая модель ЦДР включает в себя четыре модуля: 1) первичных биометрических параметров; 2) оптических свойств листьев; 3) описания филлотаксиса и 4) ассимиляционных индексов растения. Первые три модуля описывают состояние растения в текущий момент времени, третий – характеризует динамику его роста.

1) Биометрические параметры являются первичной информацией, получаемой с помощью датчиков или ручных измерений для характеристики текущего состояния растения. Рост растения, то есть необратимые изменения

размеров клеток, органов и всего растения фиксируется по изменению биометрических параметров во времени. Рост растения происходит благодаря делению клеток и увеличению их размеров. Измеряемыми проявлениями роста растения являются увеличение его длины или высоты, диаметра стебля, объема тканей, сырой массы, количества сухого вещества, площади листьев и т.д. Рост сопровождается изменением биохимического состава, который можно отследить неразрушающими оптическими методами. Поэтому в перечень первичных данных органично входят оптические характеристики органов растений. Для дальнейшего вычисления ассимиляционных индексов необходимыми являются сухая масса растения $m_р$ (в том числе листьев $m_л$, стебля $m_с$ и корня $m_к$), площади листьев S и горизонтальной проекции кроны $S_{кр}$, вычисляемые для двух моментов времени t_1 и t_2.

2) Оптические свойства листьев, зависящие от содержания пигментов, могут выступать как индикаторы комплексной физиологии листьев в широком диапазоне условий окружающей среды. В качестве параметров модели в настоящем исследовании приняты коэффициенты пропускания листьев верхнего яруса в *i*-х (*R, G, B*) спектральных диапазонах, определяемые через оптическую плотность листа $ОП_i$ по формуле

$$\tau_i = 100 \cdot 10^{-ОП_i}. \qquad (1)$$

Оперативная оценка оптических свойств листьев позволяет провести быстрый, неразрушающий мониторинг состояния растения в процессе его роста.

3) Филлотаксис (листорасположение) описывается двумя параметрами:

- направлением генетической спирали (левый *L* и правый *R* изомер, рис. 2);

- расположением на генетической спирали узлов листьев.

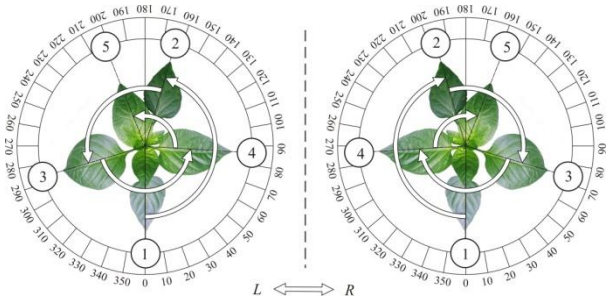


Рис. 2. Левый и правый изомеры

В исследовании использована модель филлотаксиса, описываемая системой уравнений:

$$\begin{cases} \delta_n = MOD(n \cdot \delta_{cp} \mid 360) \\ h_n = h_{n-1} + n \cdot \Delta h_{cp} \end{cases}. \qquad (2)$$

Первое уравнение определяет угол дивергенции δ_n для *n*-го листа как остаток от деления по модулю 360° накопленного значения угла, в предположении, что все углы равны среднему значению δ_{cp}. Второе уравнения определяет высоту следующего узла листа h_n через высоту предыдущего и среднее значение междоузлия.

4) Модуль ассимиляционных индексов (модель роста растения). Индексы являются показателями активности фотосинтетической деятельности растения [24].

Средняя скорость роста (*average growth rate, ARG*) определяется как прирост сухой массы в растении за единицу времени

$$AGR = \frac{\overline{m}_{р2} - \overline{m}_{р1}}{t_2 - t_1}. \qquad (3)$$

Этот параметр является размер -зависимым и его значение для различных экземпляров растений в выборке может быть различным. К тому же параметр подразумевает линейный рост. Однако более общим случаем является рост экспоненциальный (сигмоидальный), при котором величина *AGR* не остается постоянной

во времени. Здесь константой является относительная скорость роста (*relative growth rate, RGR*)

$$RGR = \frac{\overline{\ln}(m_{р2}) - \overline{\ln}(m_{р1})}{t_2 - t_1}. \quad (4)$$

Данный параметр не зависит от случайных начальных различий состояния отдельных растений в выборке и может применяться при сравнительном анализе роста.

Показателем прироста сухого вещества с единицы площади выращивания является скорость роста (*crop growth rate, CGR*)

$$CGR = \frac{1}{S_{кр}} ARG. \quad (5)$$

Показателем прироста сухого вещества на единицу площади листа является величина скорости истинной асимиляции (*net assimilation rate, NAR*) [25].

$$NAR = AGR \times \frac{\overline{\ln}(S_2) - \overline{\ln}(S_1)}{\overline{S}_2 - \overline{S}_1}. \quad (6)$$

Облиственность растения характеризует соотношение между площадью листьев и сухой массой растения (*leaf area ratio, LAR*).

$$LAR = \frac{\overline{\ln}(m_{р2}) - \overline{\ln}(m_{р1})}{\overline{m}_{р2} - \overline{m}_{р1}} \times \frac{\overline{S}_2 - \overline{S}_1}{\overline{\ln}(S_2) - \overline{\ln}(S_1)}. \quad (7)$$

Высокий показатель *LAR* может определять более высокую интенсивность роста и конкурентоспособность экземпляров растений, особенно в ювенильной фазе. Кроме того, этот показатель тесно связан с величиной истинной ассимиляции, которая отражает интенсивность фотосинтеза [26].

Структуру кроны характеризует индекс площади листьев (*leaf area index, LAI*)

$$LAI = \frac{S}{S_{кр}}. \quad (8)$$

Данный индекс характеризует возможности захвата кроной потока излучения.

Доля количества сухого вещества, приходящегося на листья от общей массы сухого вещества растения (*leaf weight ratio, LWR*)

$$LWR = \frac{\overline{\ln}(m_{р2}) - \overline{\ln}(m_{р1})}{\overline{m}_{р2} - \overline{m}_{р1}} \times \frac{\overline{m}_{л2} - \overline{m}_{л1}}{\overline{\ln}(m_{л2}) - \overline{\ln}(m_{л1})}. \quad (9)$$

Важным количественным показателем структуры листьев является площадь единицы их массы (*specific leaf area, SLA*)

$$SLA = \frac{\overline{\ln}(m_{л2}) - \overline{\ln}(m_{л1})}{\overline{m}_{л2} - \overline{m}_{л1}} \times \frac{\overline{S}_2 - \overline{S}_1}{\overline{\ln}(S_2) - \overline{\ln}(S_1)}. \quad (10)$$

Более высокие значения *SLA* означают меньшую толщину листа и/или его плотность. Этот показатель отражает затраты растения на построение листовой поверхности. Чем выше *SLA*, тем меньше растение затрачивает продуктов фотосинтеза на формирования своих листьев, тем быстрее оно растет.

Между ассимиляционными индексами существуют определенные взаимосвязи, помогающие произвести анализ влияния внешних факторов:

$$RGR = NAR \times LAR. \quad (11)$$

$$LAR = SLA \times LWR. \quad (12)$$

Важным показателем физиологии растения является соотношение массы (по сухому веществу) подземной и надземной частей. Это показатель (*root mass fraction, RMF*) определяется по формуле

$$RMF = \frac{m_к}{m_к + m_с + m_л}. \quad (13)$$

Растения с более высокой долей корней более эффективно поглощают питательные вещества почвы, в то время, как при более высокой доли побегов они имеют возможность поглощать больше световой энергии.

Полноту преобразования излучения, генерируемого источниками света, в сухую массу растения характеризует коэффициент эффективности (*radiation use efficiency, RUE*)

$$RUE = \frac{CGR}{DLI}, \qquad (14)$$

где DLI - суточная доза облучения (*day light integral*).

В приведенных формулах черта над величиной означает ее среднее значение по биологическим повторностям.

Эксперимент проводили в лаборатории энергоэкологии светокультуры ИАЭП в июне-июле 2021 года. Растения располагали на двух столах размером 1,0 х 1,4 м. В процессе эксперимента на высоте верхушек растений поддерживали одинаковый уровень фотонной облученности E=200 мкмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$ путем регулирования подвеса облучателей. Группы растений были разделены светонепроницаемой шторой (на рис. 3 не показана).

Фотопериод был задан $ФП$=16 ч, что обеспечивало DLI = $ФП \cdot E$=11,5 моль·м$^{-2}$·сут$^{-1}$. Неравномерность величины облученности по поверхности, характеризуемая коэффициентом минимальной освещенности $z=E_{мах}/E_{ср}$ составляла не более 10 %.

Рис. 3. Размещение групп растений под облучательными установками

Спектральную плотность фотонной облученности ФАР (*photosynthetic photon flux density, PPFD)* измеряли спектрометром UPRtek MK350N (рис. 4).

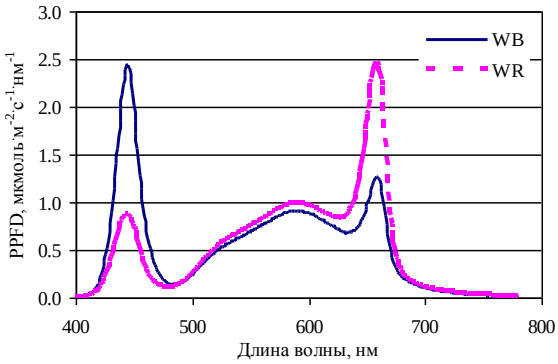


Рис. 4. Спектральная плотность потока источников излучения

Спектр излучения характеризовали процентным составом по количеству энергии в спектральных диапазонах, измеренной в фотонных единицах: в синем (*B* – blue) 400-500 нм, зеленом (*G* - green) 500-600 нм и красном (*R* - red) 600-700 нм. Требуемый спектр обеспечивали раздельно регулируя поток от светодиодов (СД) трех типов: 1) белых, имеющих узкий пик в синей области на длине волны 445 нм (полуширина 24 нм) и широкую полосу с максимумом на длине волны 589 нм (полуширина 127 нм), охватывающей зеленую и красную части спектра, 2) отдельных синих СД, излучающих на той же длине волны в синем диапазоне, что и белые СД и 3) отдельных красных СД, имеющих узкий пик на длине волны 658 нм (полуширина 23 нм). Спектр излучения в первой зоне соответствует формуле *B:G:R*= 33 %: 34 %: 33 %. Соотношение доли потоков в красном и синем диапазонах *R:B*=1,0. Далее этот спектр обозначен *WB* (White-Blue, бело-синий). Спектральный состав излучения во второй зоне соответствует формуле *B:G:R*= 15%: 36%: 49%. Соотношение доли потоков в красном и синем диапазонах *R:B*=3,4. Далее этот спектр обозначен *WR* (White-Read, бело-красный). Таким образом, было обеспечено два

вида спектра, соотношение энергии красного и синего диапазонов у которых различалось более чем в три раза.

Объект исследования - растения сладкого перца *(Capsicum Annuum L.)* среднеспелого сорта Калифорнийское Чудо. По ботаническому описанию у растений главный стебель хорошо выражен, ветвление дихотомическое, при котором стебель, а затем ветви последовательно делятся на две новые. Листья одиночные, цельнокрайные, варьируют от яйцевидной до ланцетно-эллипсовидной формы, с различными оттенками зеленого цвета. Отмечается, что большое значение для растений перца имеет не только уровень облученности, но и спектр [27].

В качестве субстрата использовали торфогрунт, приготовленный из одной части грунта для рассады («АгроТорф ЛТД» и двух частей универсального питательного грунта TERRA VITA (ООО «НОРД ПАЛП»). Содержание подвижных элементов питания (азот, фосфор, калий) определяли ионоселективным методом и с помощью спектрофотометра ПЭ 5400. Вносили микроэлементы до необходимых количеств: Zn (0,33 мг·кг$^{-1}$), B (0,32 мг·кг$^{-1}$), Cu (0,048 мг·кг$^{-1}$), Mo (0,048 мг·кг$^{-1}$). Измеряли pH смеси на приборе «Мультитест-101» (pH=6,44).

Предварительно замоченные в марганцовке и стимуляторе роста Эпин семена перца 26.06.2021 г. высадили в кассету на глубину около 1 см и присыпали просеянным песком. Влажность торфа составляла порядка 80 %. Кассету помещали в пропагатор при температуре 27-28 °С. Массовые всходы наблюдались 02.06.2021 г. (начало отсчета *DAE, day after emergency*). Кассета с сеянцами перца была помещена под белые источники света при круглосуточном облучении. Через три дня был установлен фотопериод 16 часов. Параметры микроклимата в помещении поддерживали с помощью автоматической системы управления: дневная температура +24 °С, ночная +22 °С. Влажность субстрата составляла 70%, влажность воздуха 55±5 %. Появление первой пары настоящих листьев отмечено 06.06.2021 г. Под источники с различным спектром растения были выставлены 12.06.2021 г. Всего было выставлено 50 растений. Полив осуществляли ежедневно. Выращивание завершили 13.07.2021.

Из биометрических параметров фиксировали высоту растения *H*, измеряя ее от корневой шейки до отгиба верхнего листа. Количество листьев и бутонов определяли путем подсчета. Диаметр стебля *D* измеряли у корневой шейки с помощью микрометра. Площади листьев и горизонтальной проекции кроны находили методом фотограмметрии (рис. 5). Массу листьев определяли на весах ВЛМ-500.

Рис. 5. Измерение площади кроны растений

На ранних сроках, без изъятия растений из эксперимента, площадь листьев определяли через коэффициент формы $K_ф$ данного листа и его линейные размеры. Коэффициенты формы (их значения указаны на рис. 6) листьев определяли методом фотограмметрирования, фотографируя черную пластину известных размеров и площади вместе с разложенными по порядку листьями.

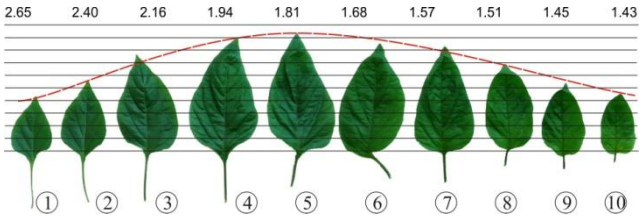


Рис. 6. Листья перца

Оптическую плотность листьев определяли с помощью денситометра ДП-1М, с использованием светофильтров группы А.

В качестве параметров филлотаксиса измеряли высоты узлов последовательных в порядке появления листьев и угол расхождения между двумя последовательными листьями [28]. Это двугранный угол, образуемый двумя полуплоскостями (гранями), исходящими из общей прямой (ребра). Его величину характеризуют плоским углом дивергенции - меньшим углом между проекциями на плоскость поперечного сечения стебля прямых, соединяющих ось стебля с точками последовательно образовавшихся листьев. Измерения вели с помощью специально изготовленного устройства (рис. 7).

Рис. 7. Измерение параметров Филлотаксиса

Значения ассимиляционных коэффициентов определяли расчетным путем по приведенным выше формулам. Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики (p<0.05) с использованием пакетов программ *Microsoft Office Excel 2003* и *Statistica 6.0*.

Результаты и обсуждение

Развитие растений перца в онтогенезе. Первую серию измерений, во время которой у всех растений фиксировали длину A_i, ширину B_i и углы дивергенции δ_i для первых трех листьев провели 15 июня, на 14-й день после появления всходов (*day after emergency, DAE).*

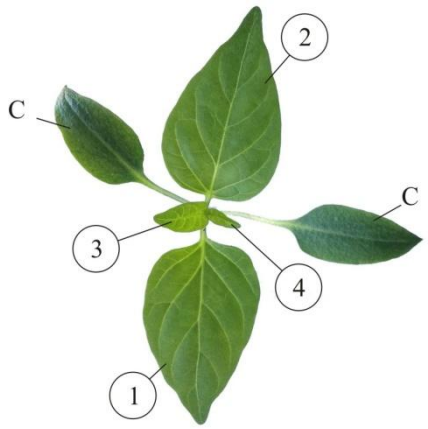


Рис. 8. Крона растения на 14-й *DAE*

Зафиксировано, что первые два листа расположены практически оппозитно в плоскости, перпендикулярной плоскости семядолей. Высоты их узлов зрительно совпадают. Третий лист имеет существенно меньшие, но фиксируемый размеры. Четвертый лист появляется в зачатке на некоторых экземплярах растений (рис. 8).

Результаты измерений для первых трех листьев приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений на 14-й *DAE*

Параметр	Лист	Спектр	
		WB	WR
Длина A_i	1-й	34.2±8.0	36.5±6.3
	2-й	34.5±7.2	35.7±5.7
	3-й	7.5±4.2	7.8±3.8
Ширина B_i	1-й	16.1±3.6	16.5±2.7
	2-й	15.7±3.0	16.2±2.9
	3-й	2.5±1.8	2.6±1.6
Угол δ_i	1-й	0.0±0.0	0.0±0.0
	2-й	173.2±6.9	172.1±7.2
	3-й	271.2±18.0	272.6±18.2

Направление генетической спирали на данном этапе определить не представилось возможным, поскольку узлы всех листьев расположены практически на одном уровне. По размерам же первый и второй лист практически одинаковы. Так, если принять за первый тот лист, который на рисунке 8 расположен снизу, то генетическую спираль следует классифицировать как левостороннюю. Если же за первый лист принять лист, расположенный на рисунке сверху, то генетическая спираль получается правосторонней. Дальнейшие наблюдения показали, что возможность однозначно определить направление генетической спирали появиться, когда за счет роста стебля станут различимыми междоузлия и будет понятна последовательность расположения листьев на стебле в порядке их появления.

16 июня практически на всех растениях вышел четвертый лист. Появились признаки междоузлия первого и второго листьев (менее миллиметра). Узлы третьего и четвертого листьев междоузлие неразличимо. 21 июня появились пятый и шестой листья. 23 июня на отдельных растениях появились седьмой и восьмой листья. При появлении парные листья выглядят практически супротивными. Появилось видимое междоузлие между третьим и четвертым листом.

Вторую серию измерений, во время которой фиксировали длины A_i, ширины B_i, углы дивергенции δ_i и высоты узлов H_i провели 29 июня, на 28-й DAE, когда на растениях появился девятый лист. Объем выборки – семь растений.

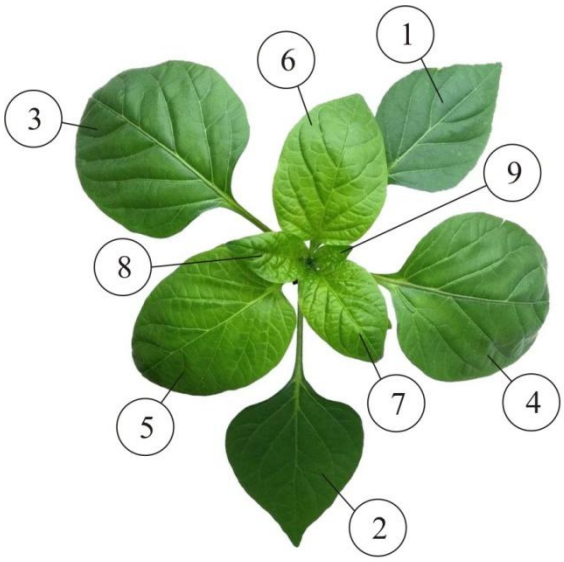


Рис. 9. Крона растения на 28-й *DAE*

Результаты измерений геометрических размеров листьев показаны на рисунке 10.

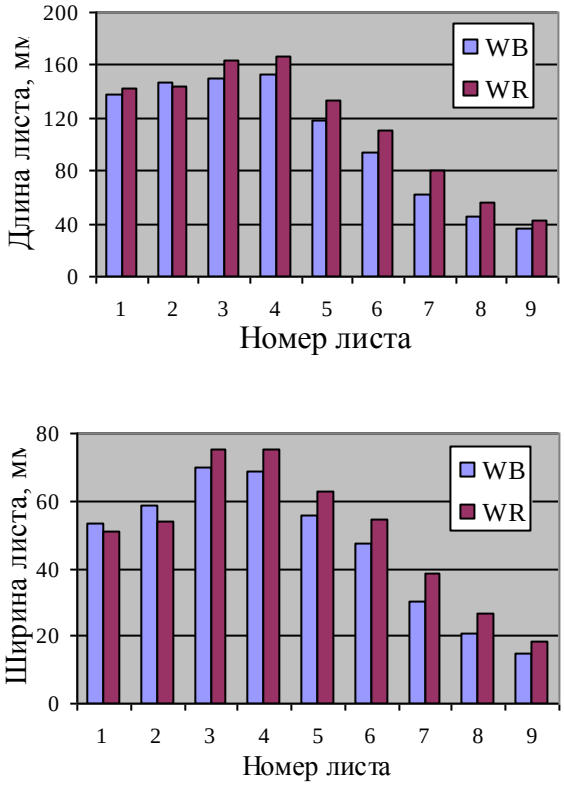


Рис. 10. Геометрические размеры листьев

Такие измерения позволили определять площади листьев косвенным способом, не срывая их с растения, через их геометрические размеры и коэффициент формы, различный для различных листьев.

Поскольку появились различимыми междоузлия (до шестого листа), стало возможным однозначно определить направление генетической спирали. Выявлено, что чаще встречается левосторонняя спираль.

Типичная картина филлотаксиса показана на рисунке 11. Показано соответствие высот узлов листьев H_i и соответствующих им углов дивергенции δ_i. Дополнительно указаны площади листьев растений S_i, см^2, которые помогают проследить последовательность появления листьев на генетической спирали в порядке монотонного возрастания и убывания их площади. Так, на рисунке 11 четвертый лист (площадью 51.3 см^2) начинает второй виток спирали. Последний на этом витке – шестой лист, его площадь 25,9 см^2.

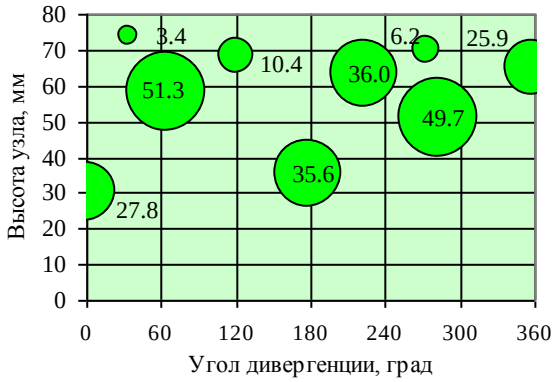


Рис. 11. Картина филлотаксиса растений перца 28 DAE

Третью серию измерений провели 7 июля, на 36-й *DAE*. Практически на всех растениях произошло ветвление стебля, в развилке появилась завязь. Объем выборки – пять растений. Помимо параметров филлотаксиса, определяли массы частей растений, содержание и количество сухого вещества в них. Для всех листьев кроны до развилки определяли содержание хлорофилла. Для нижнего, среднего и верхнего ярусов листьев определяли оптическую плотность в синем, зеленом и красном диапазонах, а так же толщины листьев.

Четвертую серию измерений провели 13 июля, на 42-й DAE, повторив измерения, сделанные в третьей серии. Дополнительно измеряли оптическую плотность листьев верхнего яруса. Повторные измерения с интервалом 6 суток необходимы для нахождения ассимиляционных индексов. На всех растениях стебель имеет ветвление, на побегах – обильное цветение. Объем выборки – пять растений.

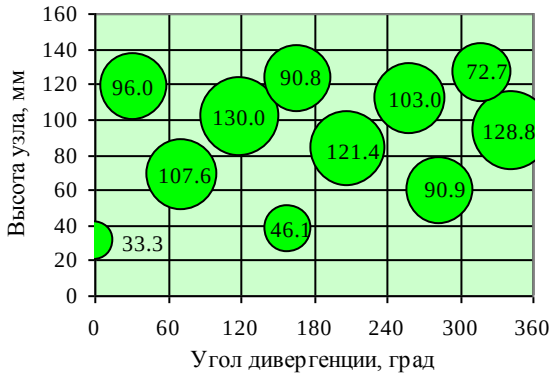


Рис. 12. Картина филлотаксиса растений перца 42 DAE

Рис. 13. Внешний вид растения на 42 DAE (справа - с удаленными листьями)

Анализ параметров модели роста растения. Оценка влияния факторов спектра (*WB*, *WR*), типа изомерии (*L*, *R*) и их сочетания на биометрические показатели растений (первый модуль модели ЦДР) произведена с помощью дисперсионного анализа. Выявлено, что ни для

одного фиксируемого параметра тип изомерии филлотаксиса не оказал значимого влияния. Значимо действие фактора спектра на высоту *H* (12.98 см при *WB* и 13.50 см при WR); средняя толщина листа (соответственно 0,24 и 0,29 мм); среднее содержание хлорофилла в листьях (44.45 и 35.04 отн.ед.).

Анализ показателей второго модуля модели ЦДР показал, что основное поглощение света листьями наблюдается в синем спектральном диапазоне, наименьшее – в зеленом. Коэффициент пропускания в синем диапазоне τ_B меньше у растений, выращиваемых под WB спектром по сравнению с WR (0.4% против 0.5%). Коэффициент пропускания в красном диапазоне τ_R, наоборот, больше у растений, выращиваемых под WB спектром, нежели под WR (4.5% против 3.8%). Это может быть обьяснено адаптационными процессами, когда при недостатке энергии в определенном диапазоне спектра излучения коэффициент пропускания листа в этом диапазоне снижается для большей степени поглощения световой энергии растением.

Генетическая спираль у растений, выращенных под *WB* спектром, в 18 случаях (72%) была левосторонняя, в 7 случаях (28%) – правосторонняя. Под *WR* спектром 14 растений (56%) имели левостороннюю спираль и 11 (44%) – правостороннюю. Для проверки гипотезы о влиянии спектра излучения на направление генетической спирали использовали точный критерий Фишера. Его значение оказалось равным *p*=0.26, что превышает критический уровень значимости 0.05. Таким образом, принимается нулевая гипотеза и делается вывод об отсутствии статистически значимых различий частоты появлений левосторонних и правосторонних изомеров при заданных в эксперименте различий спектра излучения. По всей генеральной совокупности (50 растений) частота появления левосторонних изомеров составляет 64%, правосторонних 36%, что близко к соотношению L:R=2:1. При спиральном филлотаксисе угол дивергенции между последовательными боковыми органами близок к «золотому» углу в 137.5°, при котором вокруг стебля может быть размещено бесконечное количество листьев без полного перекрытия между любыми двумя из них. В нашем исследовании средний угол δ_{cp} оказался близок к этому значению при обоих типах спектра, без статистически значимых различий. То же самое наблюдалось для средней длины междоузлия Δh_{cp}. Таким образом, при обеспеченных в эксперименте различий спектрального состава излучения чувствительность параметров филлотаксиса (третий модуль ЦДР) к спектру не выявлена.

Оценка интенсивности производства биомассы в растении произведена в четвертом модуле ЦДР, по асимиляционным индексам, характеризующим фотосинтез в растении. Относительная скорость роста *RGR* может быть разделена на «фотосинтетическую» составляющую *NAR* и «морфогенетическую» *LAR* (ф. 11). Последняя, в свою очередь, зависит от площади единицы массы листьев *SLA* и доли общей массы сухого вещества в растении, приходящегося на листья *LWR* (ф. 12).

Эти два показателя зависят от многих факторов окружающей среды. В эксперименте, их действие на величину *LAR* разнонаправлено, *SLA* значимо выше при спектре *WR*, *LWR* - при спектре *WB*. В итоге различия индекса *LAR* незначимы и причины большей величины *RGR* при спектре *WB* следует искать в большей величине *NAR* (0.824 против 0.634).

Вариации *LAR* обычно в первую очередь связывают с вариациями *SLA* [29]. Уменьшение площади листьев снижает возможности растения улавливать света, что в условиях недостаточного освещения ограничивает рост растений [30]. Исследования влияния красного и

синего излучения на рост и развитие растений выявили их различное действие на рост и развитие растений [31]. Наши эксперименты подтверждают эти закономерности для растений перца.

Разделение ассимилятов между подземной и надземной частями регулируется равновесием между активностью корней (поглощение воды или питательных веществ) и активностью побегов (фотосинтез). Величина *RMF* под спектром *WB* оказалась ниже, чем под *WR*. Это означает, что под спектром, обогащенным синим излучением, побеги имеют более высокий приоритет для накопления продуктов фотосинтеза, чем корни.

Таблица 2

Показатели модулей модели ЦДР

Модуль модели	Показатель	Спектр	
		WB	*WR*
1.Биометрические параметры	1. Высота растения H, см	12.98	13.50*
	2. Диаметр шейки D, мм	6.89	6.90
	3. Площадь листовой поверхности S, м^2	0.118	0.126
	4. Средняя толщина листа d, мм	0.24	0.29*
	5. Сухая масса листьев $m_л$, г·растение$^{-1}$ (%)	4.01 (64%)	3.74 (60%)
	6. Сухая масса стебля, m_c, г·растение$^{-1}$ (%)	1.06 (17%)	1.07 (17%)
	7. Сухая масса корня, $m_к$, г·растение$^{-1}$ (%)	1.23 (20%)	1.42 (23%)
	8. Сухая масса растения, $m_р$, г·растение$^{-1}$ (%)	6.29 (100%)	6.24 (100%)
	9. Среднее сод. хлорофилла в листьях, CCI, отн.ед.	44.45	35.04*
2.Оптич. свойства листьев	1. Коэф. пропускания в син. диапазоне τ_B, %	0.4	0.5*
	2. Коэф. пропускания в зел. диапазоне τ_G, %	12.6	11.2*
	3. Коэф. пропускания в кр. диапазоне τ_R, %	4.5	3.8*
3.Филлотаксис	1. Доля левосторонней генетической спирали, %	72	56
	2. Средняя длина междоузлия $\Delta h_{ср}$, мм	10.1	10.9
	3. Средний угол дивергенции $\delta_{ср}$, град.	139.1	138.3
4.Ассимиляц	1. Average growth rate (*AGR*), г·сут$^{-1}$	0.528	0.468*

ионные индексы	2. Crop growth rate (*CGR*), $mg \cdot d^{-1} \cdot cm^{-2}$	0.591	0.461*
	3. Relative growth rate (*RGR*), $г \cdot г^{-1} \cdot сут^{-1}$	0.169	0.143*
	4. Net assimilation rate (*NAR*), $мг \cdot см^{-2} \cdot сут^{-1}$	0.824	0.634*
	5. Leaf area ratio (*LAR*), $см^{2} \cdot мг^{-1}$	0.205	0.226
	6. Specific leaf area (*SLA*), $см^{2} \cdot мг^{-1}$	0.309	0.357*
	7. Leaf weight ratio (*LWR*), $г \cdot г^{-1}$	0.664	0.632*
	8. Leaf area index (*LAI*), отн.ед.	1.065	1.073
	9. Root mass fraction (*RMF*), отн.ед.	0.229	0.268*
	10. Radiation use efficiency (*RUE*), $g \cdot mol^{-1}$	0.513	0.401*

* значимость различий на уровне $p<0,05$

Итоговый показатель оценки эффективности использования излучения – *RUE* – на 28% выше под *WB* спектром.

Таким образом, выявлено различие в первичных биометрических показателях растений, выращиваемых под различным спектральным составом излучения (первый модуль ЦДР), а так же оптических свойств листьев (второй модуль ЦДР). При обеспеченных в эксперименте спектральных различиях влияние спектра на параметры филлотаксиса (третий модуль ЦДР) не выявлено. Различия значений ряда ассимиляционных индексов (четвертый модуль ЦДР) у растений, выращиваемых под различным спектром, оказались статистически значимыми.

Заключение. Рассмотренный опыт применения ЦД в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства позволяет сделать вывод, что применение данной концепции к растению является развитием идеи моделирования на новом этапе, подразумевающем цифровую трансформацию тепличной отрасли. Концептуально ЦДР представляет собой виртуальный объект, отображающий реальное растение в физическом пространстве, информационные связи между которыми позволяют в режиме реального времени отображать параметры реального растения.

Показана приемственность современных концепций, связанных с ЦДР, с разработанной ранее в лаборатории энергоэкологии светокультуры иерархической информационной моделью искусственной биоэнергетической системы. В рамках энергоэкологического подхода предложена математическую модель ЦДР, включающая в себя четыре модуля: 1) первичных биометрических параметров; 2) оптических свойств листа; 3) описания филлотаксиса и 4) ассимиляционных индексов растения. Первые три модуля описывают состояние растения в текущий момент времени, третий – характеризует динамику его роста.

В экспериментальной части работы произведено наполнение модели параметрами, полученными при выращивании растений сладкого перца для двух различных спектров, соотношение энергии красного и синего диапазонов у которых различается более чем в три раза. Производили наблюдение за ростом и развитием растений в течение 42 дней после появления всходов. Значимым оказалось действие фактора спектра на высоту, среднюю толщину листа и содержание хлорофилла в листьях. Выявлено, что для растений перца

имеет место изомерия генетической спирали. Оценка влияния факторов спектра, типа изомерии и их сочетания на биометрические показатели растений произведена с помощью дисперсионного анализа. Выявлено, что ни для одного фиксируемого параметра тип изомерии филлотаксиса не оказал значимого влияния. Найдено, что соотношение частот появления левых и правых изомеров по направлению генетической спирали составляет по всей совокупности 2:1. Угол дивергенции между последовательными листьями близок к «золотому» углу в 137.5°. При обеспеченных в эксперименте различий спектрального состава излучения чувствительность параметров филлотаксиса к спектру не выявлена.

Коэффициенты пропускания листьев и ряд ассимиляционных индексов растений показали статистически значимую зависимость от спектра источников. Эффективность использования излучения в процессе фотосинтеза оказалась выше на 28% выше под спектром с повышенным содержанием синего излучения.

Созданный ЦДР имеет перспективы усовершенствования в части разработки программной оболочки, позволяющей производить анализ развития растения перца на рассадном этапе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grieves M. W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Whitepaper. 2015. 7 p. URL: https://www.researchgate.net/publication /275211047_Digital_Twin_Manufacturing _Excellence_through_Virtual_Factory_Replication

2. Glaessgen E.H., Stargel D. The Digital Twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. *53rd AIAA /ASME /ASCE /AHS /ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. 23-26 April 2012. Honolulu, Hawaii. 2012, pp. 1-14. DOI:10.2514/6.2012-1818

3. Пономарев К.С., Шутиков М.А., Феофанов А.Н. Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия. *Вестник МГТУ Станкин*. 2019. № 4 (51). С. 19-23.

4. Сердюков Р.Д. Концептуализация понятия «цифровой двойник» в индустриальном сегменте экономики // *Цифровая экономика и индустрия 4.0: Форсайт Россия*: сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, 26-28 марта 2020 г. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. Т. 1. С. 250-258.

5. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. No. 29, pp. 36–52 DOI:10.1016 /j.cirpj.2020.02.002

6. Singh M., Fuenmayor E., Hinchy E.P., Qiao Y., Murray N., Devine D. Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*. 2021. No. 4(2), pp. 36. DOI:10.3390/asi4020036.

7. Никитина М.А. «Цифровой двойник» - имитационная модель пищевого продукта. Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 6. С. 136-140.

8. Трефилов С.А., Лекомцев П.В., Никитин Ю.Р. Цифровой двойник мехатронного устройства на основе алгоритма прогнозирования по малым обучающим выборкам. *Автоматизация и измерения в машино- приборостроении*. 2020. № 3 (11). С. 39-49.

9. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*. 2021. No 189(15):103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046

10. Defraeye T., Shrivastava C., Berry T., Verboven P., Onwude D., Schudel S., Bühlmann A., Cronje P., Rossi P.M. Digital twins are coming: Will we need them in supply chains of fresh horticultural produce? *Trends in Food Science & Technology*, 2021. No (109), pp. 245-258 DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.025.

11. Neethirajan S., Kemp B. Digital Twins in Livestock Farming. *Animals* 2021. No. 11(4), pp. 1-14. DOI:10.3390/ani11041008.

12. Moghadam P, Lowe T, Edwards EJ. Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Proceedings of the Third International Tropical Agriculture Conference (TROPAG 2019)*. 2019. No. 36(1), pp. 92 DOI: 10.3390/proceedings2019036092.

13. Howard D.A., Ma Z., Jorgensen B.N. Digital Twin Framework for Energy Efficient Greenhouse Industry 4.0. In: Novais P., Vercelli G., Larriba-Pey J.L., Herrera F., Chamoso P. (eds). *Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the 11th International Symposium on Ambient Intelligence, L'Aquila, Italy.* Springer, Cham. 2021. Vol. 1239, pp. 289-292. DOI: 10.1007/978-3-030-58356-9_34.

14. Скобелев П.О., Майоров И.В., Симонова Е.В. и др. Реализация цифрового двойника растений для адаптивного расчета длительности стадий развития и прогнозирования урожайности культур в кибер-физической системе управления точным земледелием. *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ.* 2020. Т. 12-3. С. 133-136.

15. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I.N. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. No. 184(4), pp. 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.

16. Smith M.J., 2018. Getting value from artificial intelligence in agriculture. *Anim. Prod. Sci.* 2018. No. 60(1), pp. 46-54 https://doi.org/10.1071/AN18522

17. West T.D., Blackburn M. Is Digital Thread/Digital Twin Affordable? A Systemic Assessment of the Cost of DoD's Latest Manhattan Project. *Procedia Computer Science*, 2017. Vol. 114, pp. 47–56. DOI: 10.1016/j.procs.2017.09.003.

18. Lohtander M., Garcia E., Lanz M., Volotinen J., Ratava J., Kaakkunen J., Micro Manufacturing Unit – Creating Digital Twin Objects with Common Engineering Software. *Procedia Manufacturing*, 2018. Vol. 17, pp. 468–475. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.071

19. Ракутько С.А. Иерархическая информационная модель искусственной биоэнергетической системы. Патент на изобретение RU 2562421, 2015.

20. Ракутько С.А., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н. Энергоэкология светокультуры – новое междисциплинарное научное направление. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2016. № 90. С. 14-28.

21. Ракутько С.А. Энергоэкологичность как свойство искусственной биоэнергетической системы светокультуры. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 77-89.

22. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. № 3. С. 11-17.

23. Ракутько С.А., Мишанов А.П., Маркова А.Е., Ракутько Е.Н. Математическая модель динамики биометрических параметров рассады томата (*Solanum Lycopersicum*) при различном спектральном составе излучения. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2018. № 96. С. 39-51.

24. Pandey R., Paul V., Das M., Meena M., Meena R.C. Plant Growth Analysis. In: *Physiological Techniques to Analyze the Impact of Climate Change on Crop Plants*. New Delhi, India India: IARI. 2017. 103 p. DOI:10.13140/RG.2.2.21657.72808

25. Watson D J. The physiological basis of variation in yield. Advances in Agronomy. 1952. Vol IV, pp. 101-45.

26. Gardner F.P., Pearce R.B., Mitchell R.L.(Eds.) Physiology of crop plants. Ames, Iowa: Iowa State University Press, 1985. 327 p.

27. Deli J., Tiessen H. Interaction of temperature and light intensity of flowering of Capsicum frutescens var. grossum of California Wonder. J Amer Soc Hortic Sci, 1969. Vol. 94, No. 4, pp. 349-351.

28. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Экспериментальное исследование и математическая модель филлотаксиса перца (Capsicum Annuum L.) в светокультуре. АгроЭкоИнженерия. 2021. № 2(107). С. 68-80.

29. Hunt R. *Plant Growth Curves: The Functional Approach to Plant Growth Analysis*. London: Edward Arnold, 1982. 248 p.

30. Hernandez R., Kubota C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*. 2016. Vol. 121, pp. 66-74 DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.04.001

31. Fan X. X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W., Han X.L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*, 2013. Vol. 153, pp. 50–55 DOI: 10.1016/ j.scienta.2013.01.0177.

REFERENCES

1. Grieves M. W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Whitepaper. 2015. 7 p. URL: https://www.researchgate.net/publication /275211047_Digital_Twin_Manufacturing _Excellence_through_Virtual_Factory_Replication

2. Glaessgen E.H., Stargel D. The Digital Twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. *53rd AIAA /ASME /ASCE /AHS /ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. 23-26 April 2012. Honolulu, Hawaii. 2012: 1-14. DOI:10.2514/6.2012-1818

3. Ponomarev K.S., Shutikov M.A., Feofanov A.N. Tsifrovoi dvoinik kak instrument tsifrovoi transformatsii predpriyatiya. [Digital twin as an instrument of enterprise digital transformation]. *Vestnik MGTU Stankin*. 2019. No. 4 (51): 19-23. (In Russian)

4. Serdyukov R.D. Kontseptualizatsiya ponyatiya “tsifrovoi dvoinik” v industrial'nom segmente ekonomiki [Conceptualization of the concept of “digital twin” in the industrial segment of the economy] In: *Tsifrovaya ekonomika i industriya 4.0: Forsait Rossiya* [Digital Economy and Industry 4.0: Foresight Russia]. Proc. Sci. Prac. Conf. 26-28 March 2020. Saint Petersburg: POLITEKh-PRESS. 2020. Vol. 1: 250-258 (In Russian)

5. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. No. 29: 36-52. DOI:10.1016 /j.cirpj.2020.02.002

6. Singh M., Fuenmayor E., Hinchy E.P., Qiao Y., Murray N., Devine D. Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*. 2021. No. 4(2): 36. DOI:10.3390/asi4020036.

7. Nikitina M.A. “Tsifrovoi dvoinik” – imitatsionnaya model' pishchevogo produkta [“Digital twin” – a food product simulation model]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh - MMTT*. 2020. Vol. 6: 136-140 (In Russian)

8. Trefilov S.A., Lekomtsev P.V., Nikitin Yu.R. Tsifrovoi dvoinik mekhatronnogo ustroistva na osnove algoritma prognozirovaniya po malym obuchayushchim vyborkam [Digital twin of mechatronic device based on the forecasting algorithm for small learning samples]. *Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino-priborostroenii*. 2020. No. 3 (11): 39-49 (In Russian)

9. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems.* 2021. No 189(15):103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046

10. Defraeye T., Shrivastava C., Berry T., Verboven P., Onwude D., Schudel S., Bühlmann A., Cronje P., Rossi P.M. Digital twins are coming: Will we need them in supply chains of fresh horticultural produce? *Trends in Food Science & Technology*, 2021. No (109): 245-258 DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.025.

11. Neethirajan S., Kemp B. Digital Twins in Livestock Farming. *Animals* 2021. No. 11(4): 1-14. DOI: 10.3390/ani11041008.

12. Moghadam P, Lowe T, Edwards EJ. Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Proceedings of the Third International Tropical Agriculture Conference (TROPAG 2019)*. 2019. No. 36(1): 92. DOI: 10.3390/proceedings2019036092.

13. Howard D.A., Ma Z., Jorgensen B.N. Digital Twin Framework for Energy Efficient Greenhouse Industry 4.0. In: Novais P., Vercelli G., Larriba-Pey J.L., Herrera F., Chamoso P. (eds). *Advances in Intelligent Systems and Computing. Proceedings of the 11th International Symposium on Ambient Intelligence, L'Aquila, Italy.* Springer, Cham. 2021. Vol. 1239: 289-292. DOI: 10.1007/978-3-030-58356-9_34.

14. Skobelev P.O., Mayoriv I.V., Simonova E.V. et al. Realizatsiya tsifrovogo dvoinika rastenii dlya adaptivnogo rascheta dlitel'nosti stadii razvitiya i prognozirovaniya urozhainosti kul'tur v kiber-fizicheskoi sisteme upravleniya tochnym zemledeliem [Implementation of digital twin of plants for adaptive calculation of development stages duration and crop yield forecasting in cyber-physical system for precision farming management]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT*. 2020. Vol. 12-3: 133-136 (In Russian)

15. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I.N. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. No. 184(4): 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.

16. Smith M.J., 2018. Getting value from artificial intelligence in agriculture. *Anim. Prod. Sci.* 2018. No. 60(1): 46-54. DOI: 10.1071/AN18522

17. West T.D., Blackburn M. Is Digital Thread/Digital Twin Affordable? A Systemic Assessment of the Cost of DoD's Latest Manhattan Project. *Procedia Computer Science,* 2017. Vol. 114: 47–56. DOI: 10.1016/j.procs.2017.09.003.

18. Lohtander M., Garcia E., Lanz M., Volotinen J., Ratava J., Kaakkunen J., Micro Manufacturing Unit – Creating Digital Twin Objects with Common Engineering Software. *Procedia Manufacturing*, 2018. Vol. 17: 468-475. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.071

19. Rakutko S.A. Ierarkhicheskaya informatsionnaya model' iskusstvennoi bioenergeticheskoi sistemy [Hierarchical information model of an artificial bioenergy system]. Patent for invention RU No. 2562421, 2015.

20. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energoekologiya svetokul'tury – novoe mezhdistsiplinarnoe nauchnoe napravlenie [Energy and ecological efficiency of indoor plant lighting as a new interdisciplinary reseach area]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. No. 90: 14-28 (In Russian)

21. Rakutko S.A. Energoekologichnost' kak svoistvo iskusstvennoi bioenergeticheskoi sistemy

svetokul'tury [Energy and ecological efficiency as the property of the artificial bioenergetic system of indoor plant lighting]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 95: 77-89 (In Russian)

22. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Modelirovanie i chislennyi analiz energoekologichnosti svetokul'tury [Simulation and numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting]. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. 2019. Vol. 13. No. 3: 11-17 (In Russian)

23. Rakutko S.A., Mishanov A.P., Markova A.E., Rakutko E.N. Matematicheskaya model' dinamiki biometricheskikh parametrov rassady tomata (*Solanum Lycopersicum*) pri razlichnom spektral'nom sostave izlucheniya [Mathematical model of dynamic pattern of biometrical parameters of tomato (*Solanum Lycopersicum*) transplants under different light quality]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 96: 39-51 (In Russian)

24. Pandey R., Paul V., Das M., Meena M., Meena R.C. Plant Growth Analysis. In: *Physiological Techniques to Analyze the Impact of Climate Change on Crop Plants*. New Delhi, India India: IARI. 2017. 103 p. DOI:10.13140/RG.2.2.21657.72808

25. Watson D J. The physiological basis of variation in yield. *Advances in Agronomy.* 1952. Vol IV, pp. 101-45.

26. Gardner F.P., Pearce R.B., Mitchell R.L.(Eds.) *Physiology of crop plants*. Ames, Iowa: Iowa State University Press, 1985. 327 p.

27. Deli J., Tiessen H. Interaction of temperature and light intensity of flowering of Capsicum frutescens var. grossum of California Wonder. *J Amer Soc Hortic Sci*, 1969. Vol. 94, No. 4: 349-351.

28. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Mishanov A.P., Markova A.E. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskaya model' fillotaksisa pertsa (*Capsicum Annuum* L.) v svetokul'ture [Experimental study and mathematical model of pepper (*Capsicum Annuum L.)* phillotaxis under artificial lighting]. *AgroEkoInzheneriya.* 2021. No. 2 (107): 62-80 (In Russian)

29. Hunt R. *Plant Growth Curves: The Functional Approach to Plant Growth Analysis*. London: Edward Arnold, 1982. 248 p.

30. Hernandez R., Kubota C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*. 2016. Vol. 121: 66-74 DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.04.001

31. Fan X. X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W., Han X.L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*, 2013. Vol. 153: 50–55 DOI: 10.1016/ j.scienta.2013.01.0177.

УДК 535.241.46: 631.544.4 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50**

ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧНОСТЬ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

С.А. Ракутько[1], д-р техн.наук; Е.Н.Ракутько[1];А.Н.Васькин[2]

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

[2]ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», Брянск, Россия

При проектировании тепличных облучательных установок важны вопросы повышения эффективности использования энергии и улучшения качества среды выращивания растений. Целью работы является представление математического аппарата для описания распределения потока излучения по поверхности, обоснование и выбор параметров, характеризующих степень неравномерности облучения, а также исследование влияния компоновочных параметров (высоты подвеса и расположение облучателя относительно границ участка облучения) на энергоэкологичность светокультуры. Изложены различные подходы определения среднего значения освещенности. Представлены формулы для коэффициентов равномерности. Экспериментальную проверку проводили на горизонтальной плоскости, моделирующей поверхность для выращивания растений. Предложенный метод оценки энергоэкологичности учитывает две ее составляющие: энергоэффективность характеризовали коэффициентом полезного использования потока излучения, экологичность – величиной, обратной равномерности создаваемой освещенности, влияние которой на светокультуру выявлено по литературным источникам. Установлено, что при увеличении высоты подвеса светильника над растениями происходит снижение энергоэффективности светокультуры. Однако при этом растет значение коэффициента экологичности. Одновременное действие этих закономерностей приводит к сложному характеру зависимости энергоэкологичности от высоты подвеса. До некоторого ее значения энергоэкологичность возрастает, принимает максимальное значение, а затем падает. Показано, что бо́льшая энергоэкологичность обеспечивается при симметричном расположении источника света.

Ключевые слова: светокультура, облучательная установка, равномерность освещения, коэффициент полезного использования потока, энергоэффективность, экологичность

Для цитирования: Ракутько С.А.,Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Влияние компоновочных параметров облучательной установки на энергоэкологичность светокультуры // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.33-51

EFFECT OF LIGHTING FIXTURES SPATIAL ARRANGEMENT ON ENERGY AND ECOLOGICAL PERFORMANCE OF GREENHOUSE HORTICULTURE

S.A. Rakutko[1], DSc (Engineering); E.N. Rakutko[1]; A.N.Vaskin[2].

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

[2]Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Bryansk State Agrarian University”, Russia

When designing greenhouse lighting systems, of importance are the issues of increasing energy efficiency and improving the quality of the growing environment for plants are important. The research aimed to present a mathematical apparatus for describing the distribution of the radiation flux over the surface, to substantiate and choose the parameters characterizing the uniformity degree

of illumination and to investigate the effect of the spatial arrangement of lighting fixtures (their suspension height and location against the boundaries of the irradiated area) on the energy and ecological performance of greenhouse lighting. The article outlines various approaches to determining the average illumination value and presents the formulas for calculating the uniformity coefficients. Experimental verification was carried out on a horizontal plane simulating the surface for growing plants. The proposed method for assessing energy and ecological performance takes into account its two components: energy efficiency was characterised by the coefficient of efficient use of the radiation flow, ecological performance was characterised by the value inverse to the uniformity of the generated illumination, the role of which in the greenhouse lighting was revealed from the literature. The study revealed that with an increase in the suspension height of the lighting fixture above the plants, the energy efficiency of the greenhouse lighting decreased. However, the value of the ecological performance grew. The simultaneous action of these regularities resulted in the complex dependence of the energy and ecological performance on the suspension height. To a certain suspension height value, the energy and ecological performance increased to the maximum and then dropped. The study demonstrated that high energy and ecological performance was ensured with the symmetrical arrangement of the light sources.

Key words: greenhouse horticulture, lighting fixture, illumination uniformity, flux efficiency, energy efficiency, environmental performance

For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N., Vaskin A.N. Effect of lighting fixtures spatial arrangement on energy and ecological performance of greenhouse horticulture. *AgroEkoInzheneriya* 2021. No. 3(108): 33-51 (In Russian)

Введение

По данным бюро переписи населения США (*Bureau of the Census*) общее количество человек на земном шаре на настоящее время составляет около 7,8 миллиарда и, как ожидается, увеличится до 9,0 млрд к 2050 году. Для производства требуемого количества продуктов питания необходимо наличие высокоразвитого сельского хозяйства. В то же время, с этой отраслью связан ряд серьезных экологических проблем - изменение климата, утрата биоразнообразия, деградация земель и пресной воды. Поэтому так важно развитие методов выращивания растений в искусственных условиях – теплицах, вертикальных фермах, аква-, гидро- и аэропонных установках. В районах с недостатком естественного дневного освещения в культивационных сооружениях с искусственным микроклиматом широко применяют облучательные установки (ОбУ) для ассимиляционного освещения как обязательный элемент системы выращивания растений, в задачу которых входит повышение интенсивности фотосинтеза (ассимиляции CO_2). Все еще широкое применение в таких установках в настоящее время находят традиционные натриевые лампы. Однако на смену им все больше приходят светодиодные источники [1]. Практически подтверждено, что светодиодное освещение имеет множество преимуществ по сравнению с другими источниками света, благодаря их хорошим спектральным характеристикам, большому срок службы, эффективности и экологичности.

Применение гибридных систем освещения позволяет реализовать преимущества отдельных типов источников света, обеспечивающих максимальный полезный эффект от их совместного применения [2, 3]. Такой подход представляет

собой реализацию концепции наилучших доступных технологий (НДТ) в светокультуре [4].

При проектировании наряду с выбором оптимального источника света необходимо определение компоновочных параметров ОбУ – размещения светильников и высоты их подвеса. Наряду с необходимостью обеспечения среднего уровня освещенности, важна так же равномерность распределения потока по всей площади выращивания [5]. Размещение светильников в теплице в первую очередь влияет на равномерность создаваемого освещения. Компоновочные параметры являются исходными для определения количества и расположения светильников в системе дополнительного освещения теплицы.

Анализ литературных источников показывает, что для характеристики однородности создаваемого на поверхности распределения потока используют ряд показателей, таких как градиент равномерности, отношение минимального значения освещенности к максимальному, стандартное отклонение от среднего [6]. В отечественной практике часто используют заимствованный из методики светотехнических расчетов коэффициент минимальной освещенности, вычисляемый как отношение средней освещённости к минимальной [7]. Так же используют коэффициент, вычисляемый как отношение минимальной освещенности к максимальной [8]. На практике используют и обратные величины для этих коэффициентов. На основании анализа различных мер однородности распределения светового потока в теплице предложено использовать частотный график результатов измерений освещенности во всех точках плоскости выращивания. Такой подход позволяет определить долю точек поверхности, освещенность в которых удовлетворяет некоторым требованиям (например, отклоняется от среднего уровня не более чем на 10%.

Другой подход заключается в использовании среднего относительного отклонения уровней освещенности в различных точках поверхности, которое является относительной мерой отклонения уровня освещенности от среднего и вычисляется как среднее по количеству точек отношение суммы модулей разницы значений освещенности в точке и среднего значения к среднему значению по поверхности [9].

Вопросы проектирования систем ассимиляционного освещения теплиц и выбора компоновочных решений достаточно широко представлены в специальной литературе. Выработаны рекомендации по устройству систем освещения, выпускаемых отдельными производителями [10]. Выявлено, что наибольшее влияние на равномерность света на рабочей плоскости оказывает отражательная способность внутренних поверхностей, следом за этим фактором идет пространственное светораспределение, а количество светодиодов (непосредственно влияющее на интенсивность освещения) оказывает наименьшее влияние [11].

Исследовано влияние расположения светодиодов на однородность излучения в камерах для выращивания растений [12]. Создана модель равномерности освещения с красной и синей светодиодной матрицей, исследовано влияния расстояния между светильником и освещяемой поверхностью и других факторов на равномерность освещения растений с помощью численного моделирования [13]. Исследована однородность освещения с учетом распределения светодиодов в светильнике [14]. Теоретически обоснованы и практически исследованы вопросы оптимизации

светораспределения светильников, обеспечивающих равномерное освещение горизонтальной рабочей поверхности [15].

Тем не менее, ряд важных вопросов остается недостаточно рассмотренным. Это вопросы, относящиеся к теоретической фотометрии, связанные с влиянием компоновочной схемы ОбУ на энергоэкологичность светокультуры, так и практические вопросы характеристики степени неравномерности освещенности с помощью простых формул.

Целью данной работы является представление математического аппарата для описания распределения потока излучения по поверхности, обоснование и выбор параметров, характеризующих степень неравномерности, а так же исследование влияния компоновочных параметров на энергоэкологичность светокультуры.

Энергоэкологичность светокультуры и факторы ее обеспечения

Особенностью научной методологии современного периода является междисциплинарный подход. В соответствии с его сутью расмотрение сопряженных процессов использования энергии и экологических аспектов такого использования должно производиться в их взаимосвязи. Такой подход может быть назван энергоэкологическим. При этом под экологичностью, как правило, понимают степень воздействия технологических процесов на окружающую среду [16]. Ярким примером энергоэкологического подхода является его применение при оценке эффективности использования топлива с единых термодинамических позиций, где энергетическими являются показатели эффективности топливоиспользования, а экологическими - уровень вредных выбросов. Точные технические оценки экологических факторов, ограничений и целевых функций порой затруднены, поэтому широкое применение для определение энергоэкологической эффективности находит метод экспертных оценок [17].

Показаны возможности энергоэкологического подхода в весьма неочевидных областях его применения, например, при оценке последствий чрезвычайных ситуаций различного характера, ведущих к изменению количества потребляемой предприятием мощности, эффективности ее использования и качества окружающей среды [18], а так же при совершенствовании технологических систем очистных устройств [19].

Известна реализация совместного энергетического и экологического подходов в области аудита, при котором комплексное энергоэкологическое обследования объектов включает учет энергопроизводственных и экологопроизводственных показателей, отражающих потоки вещества и энергии [20].

Термин «светокультура» означает технологию выращивания растений в искусственных условиях с применением источников света как средства энергетического воздействия, а так же соответствующую область научных знаний, синтезирующую в себе отдельные направления естественных, биологических и технических наук. Энергоэкологический подход здесь предусматривает изучение структуры и направленности потока субстанций в искусственной биоэнергетической системе светокультуры (*ИБЭСС*) [21]. Растения, выращиваемые в среде, создаваемой технологическим оборудованием, образуют особую экосистему, параметры которой определяют интенсивность образования ими органического вещества в ходе фотосинтеза.

Если энергоэффективность светокультуры в целом либо ее отдельных

иерархических уровней трактуется весьма стандартным образом, через энергоемкость (или *КПД*) соответствующих процессов, то оценка экологичности представляет собой непростую методическую задачу. Привнесение экологического подхода означает учет организации и функционирование надорганизменных систем при культивировании растений в искусственных условиях, взаимоотношения растений с окружающей средой.

Стандартно рассматриваемыми факторами, влияющими на растения в светокультуре (в новой терминологии, на ее энергоэкологичность) являются интенсивность создаваемого потока, спектральный состав излучения, продолжительность. Равномерность распределения потока в светокультуре (определяемая прежде всего компоновочными параметрами ОбУ) обычно выпадает из рассмотрения, хотя является очень важной.

В отличие от осветительных установок бытовых и производственных помещений, вопросы равномерности освещения растений в теплице имеют большое значение. Это связано с тем, что в отличие от глаза человека, который воспринимает интенсивность света в логарифмической шкале, позволяющей воспринимать световые сигналы в большом диапазоне изменения освещенности, растения реагируют на уровень освещения достаточно линейно. Малые, незаметные на глаз изменения освещенности, оказывают значительное воздействие на рост, развитие и продуктивность растений в светокультуре. Кроме того, у различных экземпляров растений, выращиваемых в различных точках поверхности, неравномерность освещения может привести к существенному разбросу фиксируемого отклика растений на условия выращивания, что критично в исследовательской практике, где важным является обеспечение статистической достоверности [22].

При неравномерном распределении света по поверхности фотосинтезирующих органов растений неодинаковой так же является скорость деления клеток в его различных частях. Даже при одинаковых условиях выращивания, растения одной группы будут иметь различные физиологические и морфологические показатели, что повлияет на качество как самих растений, так и получаемой от них продукции, что связано с экологичностью светокультуры. Так же проблематичным является создание единых алгоритмов управления выращиванием для растений, находящихся в различном биологическом состоянии, что снижает энергоэффективность светокультуры. Отмеченные причины требуют улучшения равномерности освещения в помещениях и установках для выращивания растений для повышения эффективности использования энергии и улучшения качества растений [23].

Имеются результаты сравнения создаваемой различными типами светильников равномерности света в теплице и энергоэффективностью [24]. Отмечается, что распределение света и его поглощение кроной растения более важны, чем электрический *КПД* прибора, при этом ценность получаемых однородных растений может быть более важна, чем фактор меньшей эффективности использования фотонного потока. Авторы исследования приводят аналогию с поливом, когда применение точного орошения может повысить эффективность использования воды. Точное освещение по мнению авторов аналогично позволит повысить эффективность использования электроэнергии [25].

Разработана методика моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры, заключающаяся в определении эффективности преобразования энергии на различных этапах в блоках модели *ИБЭСС*. В одном из блоков модели учитывается распределение потока по освещаемой поверхности [26]. Таким образом, обеспечение энергоэффективности тепличных ОбУ [27] и, в более широком понимании, энергоэкологичности светокультуры [28], является важным аспектом выращивания растений в искусственных условиях.

Следует отметить, что к настоящему времени задача создания комплексного показателя энергоэкологичности светокультуры полностью не решена, несмотря на разработанность ее моделей, методов и средств контроля [29]. В рамках данной работы численно определим величину энергоэкологичности (ЭЭ) светокультуры как произведение ее двух составляющих – энергоэффективности (*Эн*) и экологичности (*Эк*)

$$ЭЭ = Эн \cdot Эк. \qquad (1)$$

Следует отметить, что с численной характеристикой *энергоэффективности* обычно не возникает вопросов, ее мерой является энергоемкость процесса, точнее, обратная ей величина, определяемая как отношение полезно используемой энергии к затраченной.

Сложнее обстоит дело с экологичностью, к определению которого в литературе имеются различные подходы. Однако даже в отсутствие точного определения термина «экологичность» можно дать интуитивно понятную трактовку через частные случаи его использования. Уже отмечалась связь этого понятия с потоком вещества и энергии в окружающую среду. Другой аспект экологичности – удобство, приспособленность искусственной среды к обитанию в ней живых существ. Экологичным называют дом, или местность с их комфортной средой обитания. Тогда под *экологичностью* светокультуры следует понимать степень соответствия обеспеченной техническими средствами среды в *ИБЭСС* требованиям выращиваемых растений, при которых в максимальной мере раскрывается их генетический потенциал. Для численной оценке экологичности в отдельных случаях могут применяться быть показатели различной природы – биологические (урожайность, стабильность развития растений и др.), либо технические, влияющие на физиологию растений (равномерность поля облученности, как в настоящей работе).

Фотометрические основы оценки энергоэкологичности

Математический аппарат данного исследования базируется на положениях теоретической фотометрии, в которой облученность *E* выступает как характеристика интенсивности процессов, протекающих под воздействием излучения и численно определяется как отношение потока излучения *dФ* к площади элемента поверхности *dS* с координатами *(x,y),* на которую он падает

$$E(x, y) = \frac{d\Phi}{\mathrm{dS}}. \qquad (2)$$

Единицей измерения облученности в энергетической системе величин является $Вт \cdot м^{-2}$. В светокультуре в настоящее время используют величину фотонной облученности, измеряемую в $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$. В световой системе единицей аналогичная величина называется освещенностью и измеряется в люксах. Для источника с фиксированным спектром значения освещенности и облученности связаны линейно, поэтому можно применять любую единицу измерения. Наиболее удобны

измерения люксметром, поэтому данное исследование проведено с применением световой системы величин.

При размещении источника света над освещаемой поверхностью на отдельные участки поверхности, выделенные в окрестностях определенных точек, падает различный поток. Каждой точке поверхности с координатами *x,y* можно сопоставить значение освещенности *E(x,y)*. В общем случае, величина формируемой освещенности в различных точках поверхности различна.

Получаемая в трехмерном пространстве фигура (тело освещенности) имеет объем, вычисляемый по формуле

$$\Phi = \int_S E(x, y)dS \,, \qquad (3)$$

который численно равен падающему на поверхность потоку излучения.

Эффективность захвата потока, генерируемого источником света, освещаемой поверхностью может быть оценена величиной коэффициента полезного использования потока (фотометрический налог *КПД*)

$$КПИ = \frac{\Phi}{\Phi_{ИС}} 100\% \,, \qquad (4)$$

где $\Phi_{ИС}$ - поток, излучаемый источником света в пространство.

Таким образом, для рассматриваемого нами процесса формирования распределения потока по освещаемой поверхности эта величина может быть принята за энергоэффективность, т.е. *Эн=КПИ*.

Эта величина зависит от компоновочной схемы ОбУ (взаимного расположения источника света и освещаемой поверхности, прежде всего, расстояния между ними, задаваемого высотой подвеса).

Если *E(x,y)=const*, то от значения освещенности в точке можно перейти к средней освещенности:

$$E_{ср} = \frac{\Phi}{S} \,, \qquad (5)$$

где *Ф* – полный поток, падающий на всю поверхность площадью *S*.

Для упрощения в светотехнике используют кривую, получаемую сечением тела освещенности плоскостью, перпендикулярной освещаемой поверхности и проходящей через проекцию точки подвеса светильника. Для типичного случая (плоская поверхность, расположенная горизонтально) эта кривая называется кривой горизонтальной освещенности (*КГО*). Типичный вид *КГО* показан на рисунках 1 и 2.

Характерными точками здесь следует выделить максимальное значение освещенности E_{max}; минимальное значение освещенности E_{min} в точке поверхности с координатой $x_{кр}$; среднее значение освещенности $E_{ср}$, которое может быть найдено из следующих соображений.

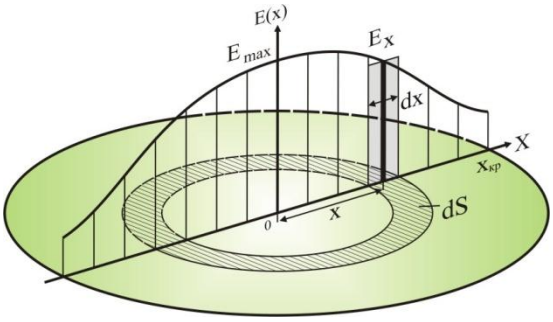


Рис. 1. К определению среднего значения освещенности от круглосимметричного светильника

Построим *КГО* в плоскости, перпендикулярной освещаемой поверхности. В силу симметрии светильника рассматриваемым участком поверхности является диск, центр которого совпадает с

точкой проекции светильника на поверхность.

Дадим координате x приращение dx. Элементарным участком поверхности в этом случае является кольцо с радиусом x, площадь которого составляет

$$dS = 2\pi x dx . \qquad (6)$$

Поток, падающий на это кольцо от светильника равен

$$d\Phi = E_x dS , \qquad (7)$$

где E_x – освещенность в точке с координатой x (определяется по *КГО*).

Тогда

$$d\Phi = E_x 2\pi x dx , \qquad (8)$$

и поток, падающий на диск радиусом $x_{кр}$

$$\Phi = 2\pi \int_0^{x_{кр}} E(x) x dx . \qquad (9)$$

Площадь диска

$$S = \pi x_{кр}^2 . \qquad (10)$$

Средняя освещенность для рассмотренного частного случая

$$E_{ср} = 2 \frac{\int_0^{x_{кр}} E(x) x dx}{x_{кр}^2} . \qquad (11)$$

Поскольку на практике вычисление по формуле (10) затруднено, можно выделить следующие подходы к нахождению среднего значения.

1. Среднее между минимальным и максимальным значением

$$E_{ср1} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} . \qquad (12)$$

2. Среднее для всего множества расчетных точек поверхности

$$E_{ср2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E_i . \qquad (13)$$

Равномерность хода кривой горизонтальной освещенности характеризуют коэффициентом равномерности. Здесь так же возможны различные подходы.

1. Через максимальное и минимальное значения освещенности

$$z_1 = \frac{E_{max}}{E_{min}} . \qquad (14)$$

2. Через среднее и минимальное значения освещенности

$$z_{21} = \frac{E_{ср1}}{E_{min}} \text{ и } z_{22} = \frac{E_{ср2}}{E_{min}} \qquad (15)$$

При равномерном характере кривой $E(x)$ $E_{min}=E_{max}=E_{ср}$ значения этих коэффициентов равны единице. При б*о*льших отклонениях кривой $E(x)$ от равномерного характера их значения увеличиваются.

В принципе, в качестве характеристики равномерности освещенности можно использовать любой из этих коэффициентов. В дальнейшем изложении мы используем z_{22}. Анализ литературных источников показал, что качество световой среды растений, в дальнейшем влияющее на качество продукции светокультуры, обратно пропорционально величине равномерности. Примем в качестве коэффициента экологичности величину

$$Эк = \frac{1}{z_{22}} . \qquad (16)$$

Чем более наравномерно распределение освещенности, тем меньшие значения принимает коэффициент экологичности *Эк*.

Для построения *КГО* каждой точке с координатой x_i необходимо сопоставить значение освещенности E_i в этой точке, нахождение которой возможно с помощью основного закона светотехники по известному пространственному распределению потока, задаваемому кривыми сила света (*КСС*) в меридианальных плоскостях. В соответствии с этим законом, величина освещенности в точке пропорциональна силе света в данном направлении I_α и косинусу угла α между вертикалью и нормалью к поверхности, и обратно пропорциональна квадрату высоты светильника H над плоскостью

$$E_i = \frac{I_\alpha cos^3\alpha}{H^2}. \qquad (17)$$

Рассмотрим расчет неравномерности освещения, когда освещаемая поверхность представляет собой прямоугольник размерами *A* x *B*. Положение точки проекции подвеса светильника на поверхности от одного из краев характеризуется линейными величинами *a* и *b*.

Для точки на поверхности, задаваемой координатами x и y, расстояние от нее до проекции светильника на плоскость

$$R = \sqrt{(y-b)^2 + (x-a)^2}. \qquad (18)$$

Расстояние от светового центра светильника до расчетной точки

$$L = \sqrt{R^2 + H^2}. \qquad (19)$$

Косинус угла между вертикалью и направлением на расчетную точку

$$\cos\alpha = \frac{H}{L} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (y-b)^2 + (x-a)^2 x}}. \qquad (20)$$

В случае косинусного светораспределения значение силы излучения I_α под углом α определяется через осевую силу света I_0 выражением

$$I_\alpha = I_0 \cos\alpha. \qquad (21)$$

При этом

$$I_0 = \frac{\Phi_{ИС}}{\pi}. \qquad (22)$$

Окончательно получаем

$$E(x,y) = \frac{I_0 H^2}{(H^2 + (y-b)^2 + (x-a)^2)^2}. \qquad (23)$$

Для экспериментальной проверки измеряли значения освещенности, создаваемым светодиодным светильником на горизонтальной плоскости, моделирующей поверхность для выращивания растений (рис. 2).

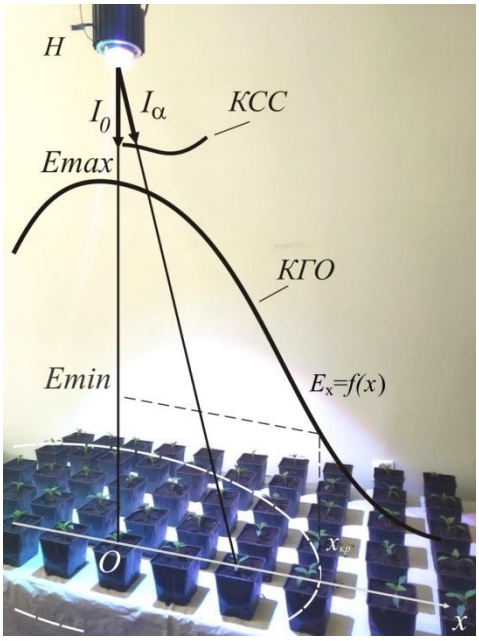


Рис. 2. Распределение освещенности

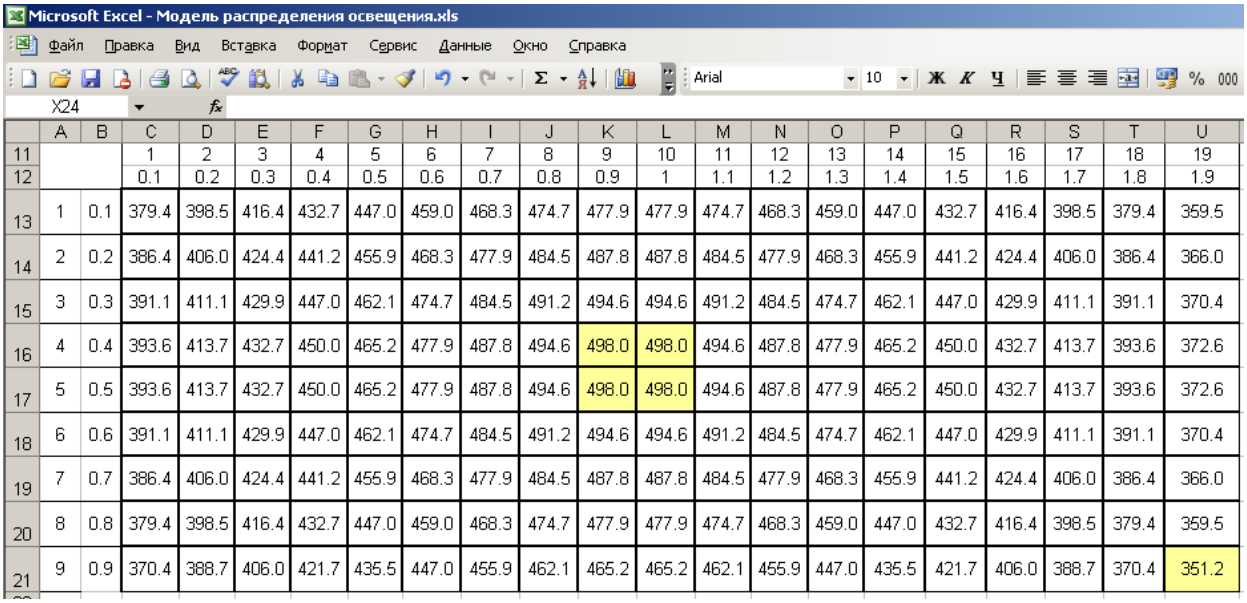
В работе [30] нами было произведено моделирование для случая произвольного (несимметричного, смещенного к одному из углов) размещения светильника над плоской поверхностью в целях оценки энергоэффективности процесса.

Найденные для этого случая значения некоторых численных показателей указаны в скобках ниже. В данном исследовании для выявления связи между неравномерностью освещения энергоэкологичностью светокультуры рассмотрим случай размещения светильника над центром поверхности. Исходные данные для моделирования: высота подвеса светильника *H*=2,40 м, размер рабочей поверхности *A*=1,90 м, *B*=0,90 м, проекция подвеса светильника совпадает с центром поверхности *a*=0,95 (против 0,7) м и *b*=0,45 (против 0,3) м. На рисунке 2 показано распределение освещенности на натурной модели - по верхушкам растений перца, размещенных на освещаемой поверхности. В качестве светильника взят светодиодный излучатель мощностью 100 Вт. Излучаемый им световой поток в нижнюю полусферу составляет $\Phi_{ИС}$=9027 лм.

Измерения вели с трехкратной повторностью. Полученные результаты обрабатывали в электронных таблицах *Excel*.

Результаты и обсуждение

Вычисленные значения в различных точках освещаемой плоскости показаны в таблице на рис. 3. Они соответствуют экспериментально полученным значениям в тех же точках, поскольку светораспределение светильника соответствует косинусному закону. Поэтому дальнейший анализ ведется для полученных в результате моделирования значений освещенности.



Microsoft Excel - Модель распределения освещения.xls

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
11			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
12			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
13	1	0.1	379.4	398.5	416.4	432.7	447.0	459.0	468.3	474.7	477.9	477.9	474.7	468.3	459.0	447.0	432.7	416.4	398.5	379.4	359.5
14	2	0.2	386.4	406.0	424.4	441.2	455.9	468.3	477.9	484.5	487.8	487.8	484.5	477.9	468.3	455.9	441.2	424.4	406.0	386.4	366.0
15	3	0.3	391.1	411.1	429.9	447.0	462.1	474.7	484.5	491.2	494.6	494.6	491.2	484.5	474.7	462.1	447.0	429.9	411.1	391.1	370.4
16	4	0.4	393.6	413.7	432.7	450.0	465.2	477.9	487.8	494.6	498.0	498.0	494.6	487.8	477.9	465.2	450.0	432.7	413.7	393.6	372.6
17	5	0.5	393.6	413.7	432.7	450.0	465.2	477.9	487.8	494.6	498.0	498.0	494.6	487.8	477.9	465.2	450.0	432.7	413.7	393.6	372.6
18	6	0.6	391.1	411.1	429.9	447.0	462.1	474.7	484.5	491.2	494.6	494.6	491.2	484.5	474.7	462.1	447.0	429.9	411.1	391.1	370.4
19	7	0.7	386.4	406.0	424.4	441.2	455.9	468.3	477.9	484.5	487.8	487.8	484.5	477.9	468.3	455.9	441.2	424.4	406.0	386.4	366.0
20	8	0.8	379.4	398.5	416.4	432.7	447.0	459.0	468.3	474.7	477.9	477.9	474.7	468.3	459.0	447.0	432.7	416.4	398.5	379.4	359.5
21	9	0.9	370.4	388.7	406.0	421.7	435.5	447.0	455.9	462.1	465.2	465.2	462.1	455.9	447.0	435.5	421.7	406.0	388.7	370.4	351.2

Рис. 3. Численное моделирование освещенности в различных точках поверхности

Максимальная освещенность приходится на центр поверхности, на точку проекции светильника на плоскость, минимальная – на углы поверхности. При исходных данных осевая сила света составила I_0=2873 кд, максимальная освещенность E_{max}= 499 лк, минимальная освещенность E_{min}=351 (против 290) лк, средние освещенности E_{cp_1}=425 (против 394) лк и E_{cp_2}=443 (против 429) лк.

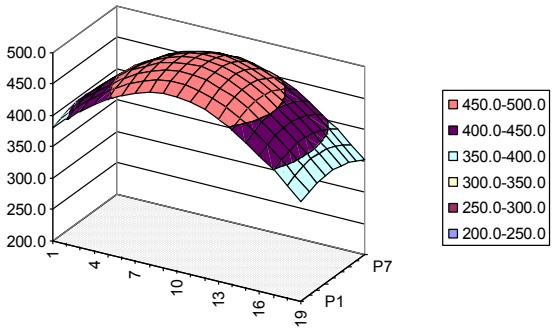


Рис. 4. Тело освещенности

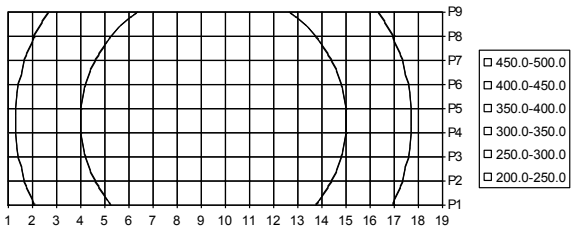


Рис. 5. Картина горизонтальных изолюкс

На рис. 4 показано тело освещенности, на рис. 5 - картина горизонтальных изолюкс, получаемая сечением тела освещенности плоскостями, параллельными рабочей поверхности.

Значения коэффициентов, характеризующих неравномерность освещения: z_1=1,41 (против 1,72); z_{21}=1,21 (против 1,36); z_{22}=1,26 (против 1,48) отн.ед.

Меньшее значение z_{21} не означает лучшую равномерность распределения освещенности. Для каждого способа вычисления коэффициентов z должны быть свои допустимые нормы. Представляется более обоснованным применение коэффициента z_{22}, поскольку он при расчете среднего учитывает картину распределения освещенности по всем точкам поверхности.

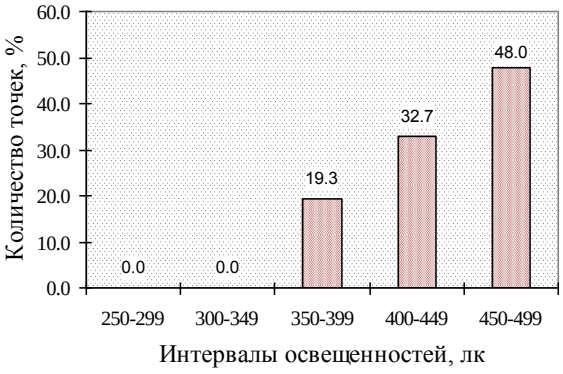


Рис. 6. Частотный график точек с одинаковой освещенностью

На рис. 6 показан частотный график распределения величины освещенности всех точек рабочей поверхности (интервалы освещенности выбраны те же, что в принятой для сравнения работе). График отображает количество точек на поверхности, освещенность в которых попадает в интервал между двумя соседними изолюксами. Так, по графику можно найти, что освещенность от 400 до 499 лк наблюдается на 32,7+48,0=80,7 (против 73,1) % площади поверхности.

В соответствии с ф. 3, падающий на рабочую поверхность поток составляет *Ф*=757 (против 733) лм. То есть *КПИ* потока (и энергоэффективность *Ээ*) составляет 8,4 (против 8,1) %. Это весьма низкая величина, поэтому представляет интерес выявление зависимости *КПИ* потока от различных параметров компоновочной схемы. Ранее были получены зависимости *КПИ* потока и коэффициента z_{22} от высоты подвеса излучателя. Было выявлено, что при снижении высоты подвеса до 0,5 м возможно повысить *КПИ* до 65%, однако при этом резко возрастает неравномерность распределения освещенности. При увеличении высоты подвеса равномерность улучшается, однако резко (до 10%) снижается величина *КПИ*.

На рисунке 8 показаны зависимости энергоэффективности *Эн* (ф. 4),

экологичности *Эк* (ф. 16) и комплексного показателя энергоэкологичности ЭЭ (ф. 1) светокультуры от высоты подвеса.

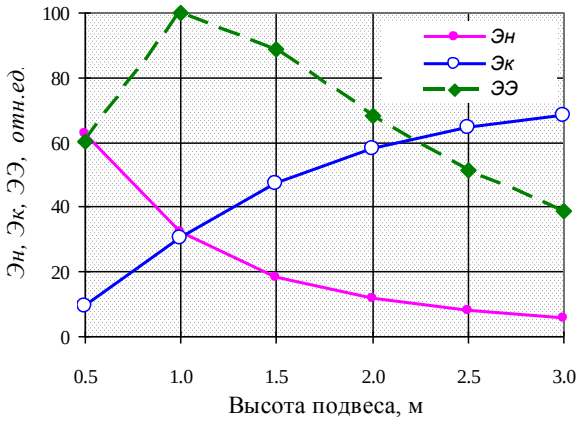


Рис. 7. Показатели энергоэкологичности светокультуры

Итак, при увеличении важнейшего компоновочного параметры (высоты подвеса светильника над растениями) происходит снижение энергоэффективности светокультуры вследствие меньшего перехвата распространяемого от светильника потока поверхностью кроны растений. Однако при этом растет значение коэффициента экологичности вследствие повышения равномерности распределения освещенности. Одновременное действие этих закономерностей приводит к сложному характеру зависимости энергоэкологичности светокультуры ЭЭ от высоты подвеса. До некоторого значения величина ЭЭ возрастает, принимает максимальное значение, а затем падает. При рассмотренных в работе сочетаниях прочих факторов этот оптимум наблюдается при высоте подвеса около одного метра.

Другим компоновочным параметром, рассмотренным в данной работе, является расположение проекции источника света относительно границ поверхности. Получены результаты численных расчетов для двух вариантов: 1) проекция совпадает с геометрическим центром поверхности и 2) смещена к одному из углов. В случае симметричного расположения на поверхность падает б*о*льший поток. При этом создаваемая максимальная освещенность одинакова, но минимальная освещенность имеет б*о*льшее значение. Соответственно, б*о*льшие значения имеют и значения средних освещенностей. Частотный анализ показывает, что б*о*льшая доля точек поверхности имеет б*о*льшие значения освещенности. Коэффициенты равномерности имеют меньшие значения, что означает б*о*льшее значение экологичности. Б*о*льшее значение имеет и энергоэффективность. Следовательно, при симметричном расположении источника света относительно границ поверхности обеспечивается б*о*льшая энергоэкологичность.

Заключение

Для управляемого выращивания растений в искусственных условиях освещение имеет важнейшее значение. Как правило, наибольшее внимание среди факторов освещения уделяют фотопериоду (продолжительности светового дня), количеству (интенсивности) и качеству (спектральному составу) света. Равномерность распределения потока по освещаемой поверхности часто остается за пределами рассмотрения, несмотря на важность этого фактора. Однако однородность света не менее важна, чем другие факторы, поскольку оказывает большое влияние на физиологию развития растений и формирование урожая.

В работе представлен математический аппарат расчета создаваемой равномерности в теплице. Предложенный метод оценки энергоэкологичности учитывает ее две составляющие. Энергоэффективность находит отражение в показателе *КПИ*,

определяющего собой долю полезного потока, падающего на поверхность от общего потока, генерируемого источниками света. Экологичность светокультуры учитывается через установленную в работе взаимосвязь с равномерностью создаваемой освещенности, влияние которой на светокультуру выявлена по литературным источникам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gupta S.D., Jatothu B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis, *Plant Biotechnol Rep*. 2013. No. 7, pp. 211-220.

2. Rakutko S.A., Avotins A., Gruduls J., Rakutko E.N. Hybride irradiation as best available practice in artificial plant lighting. *Engineering for Rural Development*. Proceedings of 19th International Scientific Conference. May, 20-22, 2020. Jelgava, Latvia: LLU. 2020. pp. 1076-1081. DOI: 10.22616/ERDev.2020. 19.TF254.

3. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Аюпов М.Р. Применение комбинированного облучения в светокультуре. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2020. Т. 14. № 2. С. 46-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-46-52.

4. Ракутько С.А. Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2019. № 1 (98). С. 44-60.

5. Deitzer G., Langhans R., Sager J., Spomer A., Tibbits T. Guidelines for installation of supplementary lighting in greenhouses. *Proc. Intl. Lighting in Controlled Environments Workshop*. Madison, WI: NASA.1994, pp. 391-393.

6. Rea M. (ed). *IES Lighting Handbook*. New York: Illumination Engineering Society of North America. 1993, pp. 383-446.

7. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. М.: Знак, 2006. 972 с.

8. Moreno I. Illumination uniformity assessment based on human vision. *Optics letters*. 2010. Vol. 35. No. 23, pp. 4030-4032.

9. Ciolkosz D.E., Both A.J., Albright L.D. Selection and placement of greenhouse luminaires for uniformity. *Appl Eng Agric* 2001. Vol. 17. No. 6, pp. 875-882.

10. Anonymous. *Artificial lighting in horticulture*. Philips Lighting Technical Library Publication no. 3222 634 0068 1. The Netherlands. 1992.

11. Xu Y., Wang H., Nsengiyumva W. Analysis of the uniformity of light in a plant growth chamber. *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Universal Village (UV).* 2018. pp. 1-7, DOI: 10.1109/UV.2018.8642131.

12. Wu L., Cao L., Chen M., Liu Y. Study on uniformity of LED lights in plant growth chamber. *J. Illumination Engineering* (in Chinese). 2015. No. 2, pp. 104-109.

13. Zhu Z., Ying S.S., Hu H.J., Tong X.Y., Zheng S.H. Study on illumination distribution and uniformity for LED plant light source array. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*. 2015. No. 27, pp. 1489-1493.

14. Fang Y., Ji H., Tian K., Li H., Meng Y., Sun Q. Design of high illumination uniformity LED luminaries for plant tissue culture. *China Light & Lighting.* 2014. No. 2, pp. 1-5.

15. Кочетков Н.П., Широбокова Т.А., Галлямова Т.Р. Определение кривой силы света, обеспечивающей равномерное

освещение горизонтальной рабочей поверхности. *Достижения науки и техники АПК*. 2013. №8. С. 64-66.

16. Белозеров Д.А. и др. Энергоэкология как основа устойчивого развития России: опыт, методология и перспективы: Монография. Дубна: Государственный университет «Дубна», 2017. 202 с.

17. Скороходов А., Полонский В. Вывод обобщенного энергоэкологического показателя эффективности использования топлива и работы котельной. *Новости теплоснабжения*. 2004. №1(41) [Электронный ресурс] https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1884 (дата обращения 02.08.2021)

18. Большаков Б.Е., Кнауб Р.В., Шамаева Е.Ф., Игнатьева А.В. Энергоэкология катастроф как новое направление в науке устойчивого развития. *Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление*. 2018. Т. 14. № 1 (38). С. 1-31.

19. Ерёмкин А.И., Зиганшин М.Г. Совершенствование оценки санитарно–гигиенической и энергоэкологической эффективности систем очистки. *Известия Казанского государственного архитектурно–строительного университета.* 2007. № 2 (8). С. 117–121.

20. Федоров М.П. и др. Способ комплексного энергоэкологического обследования энергетических и промышленных объектов Патент РФ на изобретение № 2439625. 25.01.2010.

21. Ракутько С.А. Энергоэкологичность как свойство искусственной биоэнергетической системы светокультуры. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2018. № 95. С. 77-89.

22. Albright L. D., Both A.J. Comparison of luminaires: efficacies and system design. *Proc. Intl. Lighting in Controlled Environments Workshop*, Madison, Wis.: NASA.1994. No. 28: 1-297.

23. Xu Y. Seven dimensions of light in regulating plant growth. *Acta Hortic*. 2016. No.1134, pp. 445-452.

24. Both A. J., Albright L. D., Langhans R. W., Vinzant B. G., Walker P. N. Research on energy consumption of HID lighting. *Proc. National Agricultural Demand—Side Management Conf.* Ithaca, N.Y.: NRAES, Cornell University. 1992, pp. 125-134.

25. Nelson J.A., Bugbee, B. Supplemental greenhouse lighting: Return on Investment for LED and HPS fixtures. *Controlled Environments.* 2013. Paper 2. Available at: https:// digitalcommons.usu.edu/cpl_env/2 (accessed 02.08.2021)

26. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры. *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2019. Т. 13. № 3. С. 11-17.

27. Ракутько С.А. Теоретические основы энергосбережения в оптических электротехнологиях АПК. *Достижения науки и техники АПК*. 2010. № 5. С. 68-70.

28. Ракутько С.А., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н. Энергоэкология светокультуры - новое междисциплинарное научное направление. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2016. № 90. С. 14-28.

29. Ракутько Е.Н., Васькин А.В., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Модели, методы и средства контроля энергоэкологичности в светокультуре: аналитический обзор. *АгроЭкоИнженерия*. 2021. №1(106). С. 25-50.

30. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры. *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 3. С. 470-486. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103.470-486

REFERENCES

1. Gupta S.D., Jatothu B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis, *Plant Biotechnol Rep*. 2013. No. 7: 211-220.

2. Rakutko S.A., Avotins A., Gruduls J., Rakutko E.N. Hybride irradiation as best available practice in artificial plant lighting. *Engineering for Rural Development*. Proceedings of 19th International Scientific Conference. May, 20-22, 2020. Jelgava, Latvia: LLU. 2020. Vol 18: 1076-1081 (In English) DOI: 10.22616/ERDev.2020. 19.TF254

3. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Ayupov M.R. Primenenie kombinirovannogo oblucheniya v svetokul'ture [Use of combined irradiation in grow light]. *Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. No. 2: 46-52 (In Russian) DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-46-52.

4. Rakutko S.A. Energoekologicheskie osnovy nailuchshih dostupnyh tekhnologij svetokul'-tury [Energy and ecological basis of best available techniques of plant lighting]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii raste-nievodstva i zhivotnovodstva*. 2019. No. 1 (98): 44-60 (In Russian)

5. Deitzer G., Langhans R., Sager J., Spomer A., Tibbits T. Guidelines for installation of supplementary lighting in greenhouses. *Proc. Intl. Lighting in Controlled Environments Workshop*. Madison, WI: NASA.1994: 391-393.

6. Rea M. (ed). *IES Lighting Handbook*. New York: Illumination Engineering Society of North America. 1993: 383-446.

7. Ajzenberg Yu.B (ed.) Spravochnaya kniga po svetotekhnik [Lighting Engineering Reference Book]. Moscow: Znak Publ. 2006: 972 p. (In Russian)

8. Moreno I. Illumination uniformity assessment based on human vision. *Optics letters*. 2010. Vol. 35. No. 23: 4030-4032.

9. Ciolkosz D.E., Both A.J., Albright L.D. Selection and placement of greenhouse luminaires for uniformity. *Appl Eng Agric* 2001. Vol. 17. No. 6: 875-882.

10. Anonymous. *Artificial lighting in horticulture.* Philips Lighting Technical Library Publication no. 3222 634 0068 1. The Netherlands. 1992.

11. Xu Y., Wang H., Nsengiyumva W. Analysis of the uniformity of light in a plant growth chamber. *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Universal Village (UV).* 2018: 1-7, doi: 10.1109/UV.2018.8642131.

12. Wu L., Cao L., Chen M., Liu Y. Study on uniformity of LED lights in plant growth chamber. *J. Illumination Engineering* (in Chinese). 2015. No. 2: 104-109.

13. Zhu Z., Ying S.S., Hu H.J., Tong X.Y., Zheng S.H. Study on illumination distribution and uniformity for LED plant light source array. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*. 2015. No. 27: 1489-1493.

14. Fang Y., Ji H., Tian K., Li H., Meng Y., Sun Q. Design of high illumination uniformity LED luminaries for plant tissue culture. *China Light & Lighting.* 2014. No. 2: 1-5.

15. Kochetkov N.P., Shirobokova T.A., Gallyamova T.R. Opredelenie krivoj sily sveta,

obespechivayushchej ravnomernoe osveshchenie gorizontal'noj rabochej poverhnosti [Definition of light distribution, which provides uniform lighting of horizontal surface]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2013. No. 8: 64-66 (In Russian)

16. Belozerov D.A. et al. Energoekologiya kak osnova ustojchivogo razvitiya Rossii: opyt, metodologiya i perspek-tivy: Monografiya [Energy in conjunction with Ecology as the Basis for Sustainable Development of Russia: Experience, Methodology and Prospects: Monograph]. Dubna: State University “Dubna”. 2017. 202 p. (In Russian)

17. Skorohodov A., Polonskij V. Vyvod obobshchennogo energoekologicheskogo pokazatelya effektivnosti ispol'zovaniya topliva i raboty kotel'noj [Calculation of the generalized energy and ecological indicator of the efficiency of fuel use and the operation of the boiler house]. *Novosti teplosnabzheniya*. 2004. No. 1(41) (In Russian) Available at: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1884 (accessed 02.08.2021)

18. Bolshakov B.E., Knaub R.V., Shamaeva E.F., Ignateva A.V. Energoekologiya katastrof kak novoe napravlenie v nauke ustojchivogo razvitiya [Energy considered in conjunction with ecology of disasters as a new direction in the science of sustainable development]. *Ustojchivoe innovacionnoe razvitie: proektirovanie i upravlenie*. 2018. Vol. 14. No. 1 (38): 1-31 (In Russian)

19. Eremkin A.I., Ziganshin M.G. Sovershenstvovanie ocenki sanitarno–gigienicheskoj i energoekologicheskoj effektivnosti sistem ochistki [The improvement of an estimation of sanitary and hygienic, energy and ecological efficiency of clearing systems]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno–stroitel'nogo universiteta*. 2007. No. 2 (8): 117-121 (In Russian)

20. Fedorov M.P. et al. Sposob kompleksnogo energoekologicheskogo obsledovaniya energeticheskih i promyshlennyh ob’ektov [Method for a comprehensive energy and environmental survey of energy and industrial facilities]. Patent RF on invention No. 2439625. 2010 (In Russian)

21. Rakutko S.A. Energoekologichnost' kak svojstvo iskusstvennoj bioenergeticheskoj sis-temy svetokul'tury [Energy and ecological efficiency as the property of the artificial bioenergetic system of indoor plant lighting]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 95: 77-89 (In Russian)

22. Albright L. D., Both A.J. Comparison of luminaires: efficacies and system design. *Proc. Intl. Lighting in Controlled Environments Workshop*, Madison, Wis.: NASA.1994. 28: 1-297.

23. Xu Y. Seven dimensions of light in regulating plant growth. *Acta Hortic*. 2016. No. 1134: 445-4522.

24. Both A. J., Albright L. D., Langhans R. W., Vinzant B. G., Walker P. N. Research on energy consumption of HID lighting. *Proc. National Agricultural Demand—Side Management Conf.* Ithaca, N.Y.: NRAES, Cornell University. 1992: 125-134.

25. Nelson J.A., Bugbee, B. Supplemental greenhouse lighting: Return on Investment for LED and HPS fixtures. *Controlled Environments.* 2013. Paper 2. Available at: https:// digitalcommons.usu.edu/cpl_env/2 (accessed 02.08.2021)

26. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Modelirovanie i chislennyj analiz energoekologichnosti svetokul'tury [Simulation and numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting].

Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii. 2019. Vol. 13. No. 3: 11-17 (In Russian)

27. Rakutko S.A. Teoreticheskie osnovy energosberezheniya v opticheskih elektrotekhnologi-yah APK [Theoretical bases of energy saving in optical electrotechnology of agrarian and industrial complex]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2010. No. 5: 68-70 (In Russian)

28. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energoekologiya svetokul'tu-ry – novoe mezhdisciplinarnoe nauchnoe napravlenie [Energy and ecological efficiency of indoor plant lighting as a new interdisciplinary research area]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva me-hanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. No. 90: 14-28 (In Russian)

29. Rakutko E.N., Vaskin A.V., Mishanov A.P., Markova A.E. Modeli, metody i sredstva kontrolya energoekologichnosti v svetokul'ture: analiticheskij obzor [Models, methods and tools for energy and ecological control in greenhouse horticulture: review]. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. No. 1(106): 25-50 (In Russian)

30. Rakutko E.N., Rakutko S.A. Ocenka ravnomernosti poverhnostnogo raspredeleniya po-toka izlucheniya kak faktora energoeffektivnosti svetokul'tury [Assessment of lighting uniformity as a factor of energy efficiency in greenhouse horticulture]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2021. Vol .31, No. 3: 470-486 (In Russian) DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103.470-486

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

УДК 633.491+631.147 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-51-65**

ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО КАРТОФЕЛЯ, ВОЗДЕЛЫВАЕМОГО ПО БИОЛОГИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

В.Б. Минин[1], канд. с.-х. наук; С.П. Мельников[2], канд. с.-х. наук,
А.М. Захаров[1], канд. техн. наук; М.А. Васильев[1], канд. с.-х. наук

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

[2]ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

Обновленный План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю предусматривает, что доля земель, занятых сельскохозяйственными культурами, которые возделываются по органическим технологиям, возрастет к 2030 году до 25% от всей засеваемой площади. В России с 01.01.2020 года начал действовать Федеральный закон об органической продукции, что также должно стимулировать российских агропроизводителей переходить на органическое производство. С целью подготовить и передать им соответствующие технологии в институте с 2016 года ведутся исследования в рамках органического севооборота, включающего поля картофеля, свеклы и многолетних трав. В статье представлены результаты исследования особенностей возделывания биологизированного картофеля, с использованием разработанной технологии. В опыте были изучены три группы факторов: уровень минерального питания, обеспеченный внесением компоста; действие азотофиксатора «Флавобактерин»; действие биофунгицидов. Возделывался картофель сорта Удача. Были использованы две дозы компоста, соответствующие 80 и 160 кг N/га. Клубни обрабатывались биопрепаратами при посадке, позднее была выполнена обработка листьев. Площадь делянки составляла 61,6 м^2. Повторность опыта четырехкратная. Все анализы выполнялись в соответствии с ГОСТами. Погодные условия 2020 года характеризовались относительно холодным маем и обильными осадками в июле и августе. Содержание минеральных форм азота (преимущественно нитратов) в почве значительно повысилось в июне – начале июля. С возрастанием дозы компоста, возрастало и содержание нитратов в почве. Использование разработанной технологии, второй дозы компоста и биопрепаратов позволило выйти на урожайность стандартных клубней в 31,8 т/га. Сохранность картофеля при шестимесячном зимнем хранении составила 84,7 - 89,7% от заложенных на хранение клубней. При этом в числе сохранившихся было более 93,4% здоровых клубней. Биопрепараты способствовали повышению доли сохранившихся здоровых клубней, доведя ее 97% и выше. За время хранения картофеля содержание сухого вещества в клубнях существенно не изменилось, а содержание нитратов понизилось.

Ключевые слова: картофель; органическое производство; компост; биопрепарат; органическая технология

Для цитирования: 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

YIELDING CAPACITY AND QUALITY OF POTATO CULTIVATED BY BIOLOGY-BASED TECHNOLOGY IN THE CONDITIONS OF THE LENINGRAD REGION

V.B. Minin[1], Cand Sc. (Agriculture); S.P. Melnikov[2], Cand. Sc. (Agriculture);
A.M.Zakharov[1], Cand. Sc. (Engineering); M. A. Vasilev[1], Cand. Sc. (Agriculture)

[1]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia
[2]Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Saint Petersburg State Agrarian University”, Saint Petersburg, Russia

The updated HELCOM Action Plan Baltic Sea envisages increasing the share of agricultural land cultivated by organic technologies by 2030 to 25% of the total sown area. In Russia, the Federal Law on Organic Products in force from 01.01.2020 should also promote the switching of Russian agricultural producers to organic farming. To develop and pass relevant organic practices to farmers, since 2016, the institute has performed experiments within organic crop rotation, including fields with potatoes, beets and perennial grasses. The article presents the study results on potato cultivation by the biology-based technology. Three groups of factors were considered in the experiment - the level of mineral nutrition provided by the compost introduction, the action of “Flavobacterin” nitrogen fixer, and the action of bio-fungicides. The compost was applied in two doses corresponding to 80 and 160 kg N/ha. The potato tubers of the Udacha variety were treated with bio-preparations during planting. Later, the same preparations were used for spraying the leaves. Each plot area was 61.6 m^2. The experiments were held in four replications. All analyses complied with relevant state standards. The weather in 2020 featured relatively cold May and heavy rainfall in July and August. The content of mineral forms of nitrogen (mainly nitrates) in the soil increased significantly in June - early July. With an increase in the applied compost dose, the content of nitrates in the soil also increased. The use of the developed technology, application of the second dose of compost and bio-preparations allowed to harvest 31.8 t/ha of standard potato tubers. The preserving degree of potatoes during six-month winter storage was 84.7 - 89.7%, of which 93.4% were healthy tubers. Bio-preparations contributed to the higher share of preserved healthy tubers, bringing it to 97% and higher. During the storage of potatoes, the dry matter content in the tubers did not change significantly; however, the nitrate content decreased.

Key words*:* potato; organic production; compost; biopreparation; organic technology

For citation: 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. *AgroEcoEngineering.* 2021. No.3 (108): 51-66 (In Russian)

Введение

В обновленном Плане действий по защите Балтийского моря планируется существенное развитие органического сельского хозяйства в регионе, с доведением доли площадей под такими культурами к 2030 году до 25% от общей площади посевов (ХЕЛКОМ). Основное различие между органическими и интенсивными системами ведения сельского хозяйства заключается в значительных ограничениях на использование минеральных удобрений и пестицидов в органических сельскохозяйственных предприятиях. Кроме того, закупки удобрений, кормов, фармацевтических препаратов, чистящих средств этими предприятиями ограничены. Таким образом, органическое сельское хозяйство имеет высокий потенциал для содействия защите Балтийского моря. Оно сокращает выбросы питательных веществ, пестицидов и ветеринарных медицинских препаратов, тем самым защищая поверхностные и грунтовые воды и Балтийское море. Это также может принести дополнительные выгоды для биоразнообразия и здоровья человека.

В настоящее время законы об органической продукции действуют в более чем 80 странах мира. В Российской Федерации с 1 января 2020 года вступил в силу Федеральный закон от 03.08.2018 N 280-ФЗ "Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». При реализации этого закона в полной мере, как отмечал премьер-министр Д.А. Медведев, выступая на заседании Правительства, Россия может занять от 10% до 25% рынка органических продуктов. Современная сельскохозяйственная продовольственная система достаточно продуктивна, но создает множество экологических проблем, таких как сокращение биоразнообразия, деградация почв, выделение больших объемов парниковых газов, эвтрофикация водных объектов, и ряд других (Ponisio et al., 2015; **Foley** et al.,2005).

Feiziene et al. (2014) экспериментально подтвердили, что в органических севооборотах, с участием красного клевера, осуществляется активное запасание углерода и азота в составе гумусовых соединений почвы и существенное снижение выделения парниковых газов по сравнению с интенсивным земледелием. Аналогичные результаты были получены Müller-Lindenlauf (2009), подтверждающие, что возрастание запасов углерода и азота в почве при органическом производстве обеспечивает большую устойчивость продуктивности сельскохозяйственных культур, по сравнению с традиционным. Тем не менее, необходимо проведение аналитически строгих, агроэкологических и социально-экономических исследований, обеспечивающих устранение разрывов в урожайности между органическим и интенсивным сельскохозяйственным производством, выявление препятствий для внедрения устойчивых методов и улучшение условий жизни сельских жителей отметили Саймон де Шетцен (2019).

В соответствии с результатами опросов, проведенных в более чем 1700 сельскохозяйственных организациях, наиболее востребованными считаются следующие технологии (Архипов и др. 2019):

1. Составление цифровых карт и планирование урожайности;
2. Дифференцированное внесение удобрений;
3. Мониторинг состояния посевов с использованием дистанционного зондирования;
4. Мониторинг качества урожая;

5. Дифференцированное опрыскивание.

Картофель это третья по значимости продовольственная культура, после риса и пшеницы, с общим объемом производства более 300 миллионов метрических тонн, как установлено Международным Картофельным Центром (2017) в Лиме, Перу. Российская Федерация занимает третье место в мире по производству картофеля, который возделывается во всех основных регионах страны, включая и Северо-Западный регион.

Цель нашей работы состоит в формировании технологии конкурентного и экологически безопасного органического производства картофеля в Северо-Западном регионе с использованием достижений сельскохозяйственных наук и информационных технологий (Попов В.Д., Минин В.Б., Максимов Д.А., Папушин Э.А., 2018). Это позволит перейти к разработке «умного» органического поля, на основе определенного количества данных и семейства соответствующих достоверных зависимостей. На этой основе будет создана экспертная система, которая с использованием накопленного опыта и заданного набора критериев оптимизации будет выбирать наилучшее решение, сможет рассчитать и оценить результаты различных сценариев, что обеспечит разностороннее рассмотрение выбираемой технологической операции с учетом складывающейся погодной обстановки и создаваемых экологических рисков.

Объекты и методы

В 2020 году были продолжены работы в органическом севооборотном опыте начатые в 2016 г. (Минин В.Б., Мельников С.П., Максимов Д.А., Логинов Г.А., 2019). В опыте, при реализации органической технологии возделывания с картофеля, изучались три группы факторов:

а) Уровень минерального питания, обеспеченный действием органического удобрения;

б) Действие дополнительного биологического азота, предоставляемого вносимыми микроорганизмами – азотфиксаторами (Флавобактерин);

в) Действие биофунгицидов, биологических средств защиты растений.

В опыте возделывался картофель сорта Удача. Исследования проводятся с одним видом органических удобрений, БИАГУМом, компостом, приготовленным на основе куриного помета индустриальным способом в биоконвекторе ИАЭП (Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., Vasilev E., 2017). Используются 2 дозы органического удобрения, 4,3 и 8,6 т/га (соответствующие внесению азота в 80 и 160 кг/га), которые вносятся перед посадкой картофеля.

В двух вариантах опыта с картофелем использовался разработанный ВНИИСХМБ микробиологический препарат с азотфиксирующей функцией – Флавобактерин. В четырех вариантах опыта применялись биологические фунгициды Картофен. СК и Фитолар.Г., на основе штаммов *Bacillus subtilis* и *Trchoderma asperellum* (Titova J.A. и др., 2019) разработанные в ВИЗРе. Клубни картофеля обрабатывались биопрепаратами при посадке, а затем по листьям. С этой целью на сажалку и культиватор был установлен специально разработанный для этой цели *опрыскиватель*.

Варианты опыта, в которых использовалась биологическая система защиты растений сравнивались с вариантами без такой защиты.

Площадь делянки в опыте - 5,6м х 11м = 61,6 м^2. Повторность – четырех кратная, расположение делянок рандомизированное.

Ширина междурядья 0,7 м., учетную площадь делянки составляют четыре срединных гребня, на которых проводится отбор образцов в динамике, и четыре гребня (по два с обеих сторон) – защитка.

Наблюдения за почвенными свойствами, темпами нарастания биомассы и за фитосанитарной обстановкой осуществлялись на выделенных делянках (на всех вариантах в трёх краткой повторности). В почвенных образцах определялись следующие показатели: влажность почвы, pH, содержание нитратов, аммония. Образцы почвы отбирали из пахотного слоя. Содержание аммония и нитратов в почве, а также нитратов в картофеле определяли ионометрическим методом, ГОСТ 26951-86.

Отобранные со всех делянок клубни картофеля размещались в сетчатых мешках и, после отбора образцов на анализы, были отправлены в хранилище. Перед закладкой на хранения образцы картофеля обрабатывались биофунгицидом Картофин. В начале апреля образцы картофеля были выбраны из хранилища для учета изменений происходящих в клубнях картофеля во время хранения. В образцах картофеля определялись: содержание сухого вещества, нитратов, аскорбиновой кислоты.

Результаты исследований

1. Особенности погодных условий вегетационных периодов в 2018-2020 годы

Как развитие растений картофеля, так и состояние почвенных условий определяются складывающимися погодными условиями. В табл.1 представлены такие показатели как среднемесячная температура воздуха, месячная сумма осадков и величина интегрального показателя Гидротермического коэффициента (ГТК) за четыре месяца вегетационного периода в течение 2018-2020 годов. Очевидно, что все года существенно отличаются друг от друга. Рассматриваемый нами 2020 год, характеризовался более холодным маем, но более влажным и теплым июнем. В июле и августе выпало достаточно много осадков, по сравнению со среднемноголетними данными и предыдущими годами.

Таблица 1

Показатели погодных условий в вегетационные периоды 2018-2020 г.

Месяц	Показатель	Год			Среднемноголет-ние значения
		2018	2019	2020	
Май	Температура воздуха, C^o	15,1	12,1	10,0	11,3
	Осадки , mm	14	134,7	53	46
	ГТК	0,64	2,11	0,59	
Июнь	Температура воздуха, C^o	16,2	18,7	19,2	15,7

	Осадки , mm	35,2	79,3	129,4	71
	ГТК	1,02	1,42	2,25	
Июль	Температура воздуха, С^{o}	20,8	16,5	17,6	18,8
	Осадки , mm	152	179,8	186,2	79
	ГТК	2,85	3,52	3,41	
Август	Температура воздуха, С^{o}	15,7	17,0	17,2	16,9
	Осадки , mm	60,1	94,6	195,9	83
	ГТК	2,02	1,80	3,80	

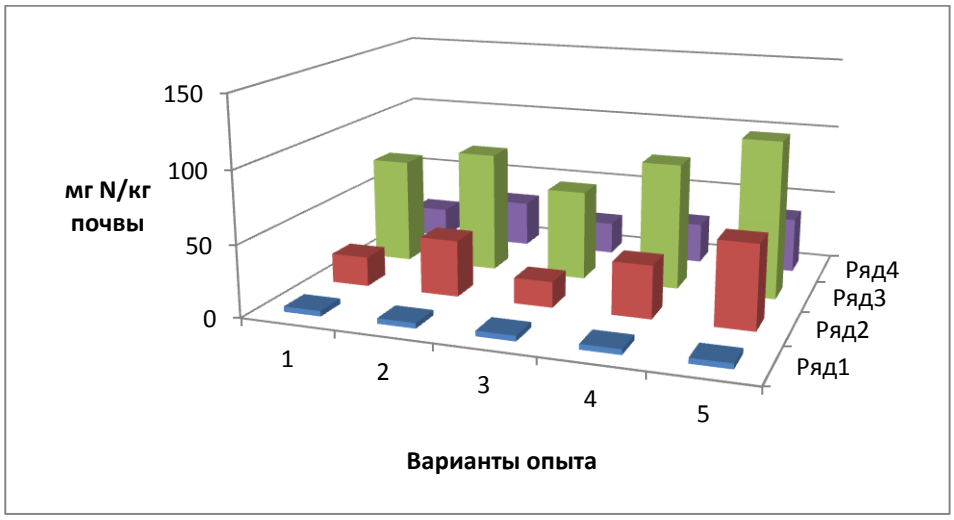
2. Влияние погодных условий на отдельные агрохимические показатели по вариантам опыта

В табл. 2 представлены значения ряда агрохимических показателей почвы опыта до его закладки. Почва характеризовалась нейтральной реакцией, достаточно высоким содержанием подвижного фосфора. К моменту отбора образцов в почве ещё не развился минерализационный процесс в результате чего не было отмечено накопления существенного количества минеральных форм азота и калия в ионной форме.

Таблица 2

Агрохимические показатели почвы перед закладкой опыта
(дата отбора образцов 21.05.2020)

Вариант	pH H_2O	pH KCl	Влажность, %	Подвижный P по Кирсанову в пересчёте на P, мг/кг	Ионной формы калия.		
					NH4+, мг/кг	K+, мг/кг	NO3-, мг/кг
Среднее значение из 5	7,88	6,50	25,0	189	0,17	1,46	16,22
Ст. отклонение	0,35	0,33	1,32	29,9	0,10	0,92	6,87



Примечание:
Ряд 1. – 22.05.2020; ряд 2 – 09.06.2020; ряд 3 – 29.06.2020; ряд 4 – 29.10.2020.
Варианты опыта: 1 – контроль; 2 – компост 1 доза; 3 - Картофин; 4 – Картофин + компост 1 доза;5 – Картофин + компост 2 доза.

Рис.1. Динамика содержание минеральных форм азота в почве по вариантам опыта.

На рисунке 1 представлены данные о динамике содержания минеральных форм азота в почве различных вариантов. Через две недели после закладке опыта, к 9 июня, в почве, как на контрольном варианте, так и на варианте с использованием Картофина, накопилось около 20 мг N/кг почвы, преимущественно в нитратной форме. Внесение компоста в первой дозе обеспечило усиление минерализационного процесса и концентрация минеральных форм азота в почвенном растворе составила 37-40 мг N/кг почвы, в результате действия второй дозы, содержание минеральных форм азота возросло до 59 мг/ N/кг почвы. К концу июня, в результате теплой и влажной погоды, минерализационный процесс активно развивался. На контрольном варианте накопилось более 70 мг/ N/кг почвы, несмотря на начало потребления картофелем. На вариантах с компостом, накопление минеральных форм азота шло более активно. Уборка картофеля была проведена в первую неделю сентября. Однако, к концу октября в почве оставалось достаточно большое количество минеральных форм азота. На вариантах с компостом оно достигало около 30 мг/ N/кг почвы. Очевидно, что после уборки картофеля следует сажать озимую пожнивную культуру, которая будет потреблять оставшийся азот и препятствовать его потерям в результате вымывания с осенними и зимними атмосферными осадками.

3. Влияние погодных условий и агрохимикатов на урожайность и качественный состав клубней картофеля

Общая урожайность картофеля в 2020 году была несколько ниже, чем в 2019, в связи со складывающимися погодными условиями (более прохладным маем и повышенным количеством осадков в июне – августе, табл. 1). Тем не менее, размах колебаний между вариантами усредненной биологической урожайности был в пределах от 19,2 до 34,2 т/га, (табл.3).

Таблица 3

Урожайность стандартных клубней картофеля сорта Удача и доли мелкого картофеля в биологическом урожае.

№ варианта	Доза компоста, кг N/га	Вид биозащиты	Урожайность биологическая, т/га	Урожайность стандарта, т/га	Доля стандартных клубней в биологическом урожае, %	Доля мелкого картофеля в биологическом урожае, %
1	0	0	20,8	19,9	95,7	2,07
2	80	0	25,4	24,6	96,9	1,68
3	0	Флавобактерин	22,6	22,4	98,4	1,36
4	80	Флавобакетрин	27,7	27,0	97,5	1,38
5	0	Картофин, СК	19,2	18,5	96,4	2,03
6	80	Картофин, СК	28,4	27,5	96,8	1,66
7	80	Картофин, СК + Фитолар, Г	28,7	28,2	98,1	1,84
8	160	Картофин, СК	34,2	31,8	93,0	0,83
$НСР_{95}$			1,7	1,4		

В связи с высоким уровнем плодородия почвы, даже в отсутствии применения компоста и средств защиты растений на контрольном варианте биологическая урожайность составила достаточно высокий уровень в 20,8 т/га (Табл.3). Использование компоста позволили поднять ее до 25,4 т/га, то есть более чем на 4 тонн. Тем не менее, потери картофеля с этих вариантов при хранении были более высокими, о чем будет сказано дальше.

Флавобактерин, способствующий как развитию почвенной азотфиксации, так и улучшению общего физиологического состояния растений картофеля, обеспечил достоверную прибавку урожайности по сравнению с контролем в 1,8 т/га даже без компоста. Использование компоста, совместно с Флавобактерином, увеличило урожайность ещё на 5,1 т - до 27,7 т/га.

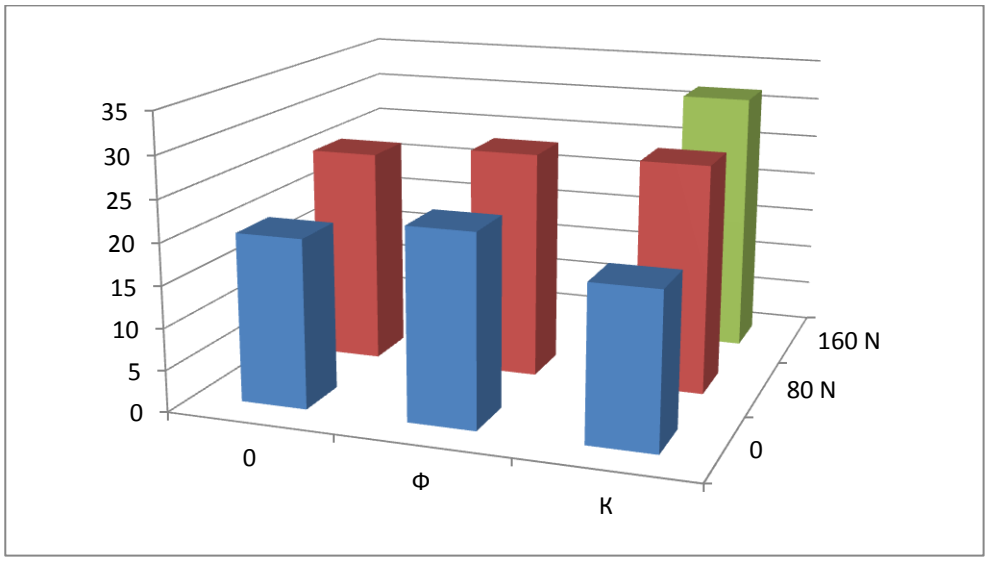
Величина урожайность картофеля на варианте с биофунгицидом Картофин, не сопровождаемая внесением компоста, достоверно не отличалась от контрольного варианта. Использование компоста совместно с Картофином дало прибавку урожая в 9,2 т/га.

Максимальная, как биологическая урожайность в 34,2 т/га, так и урожайность стандартных клубней в 31,8 т/га была достигнута при внесении второй дозы компоста (160 кг N/га) совместно с Картофином.

Следует отметить, что в соответствии требованиям ГОСТ 7176-2017 на продовольственный картофель производится отбраковка как мелких, так и очень крупных клубней. При этом, массовая доля клубней, не соответствующая требованиям по калибровке, не должна превышать 10%. Массовая доля клубней с механическими повреждениями не должны превышать 2%, и с израстаниями / позеленевших также быть не более 2%.

Максимальная доля мелкого картофеля отмечена на контрольном варианте, а также на варианте 5 (Картофин). Очевидно, что в условиях этих вариантов растениям картофеля не хватило питательных веществ для дальнейшего развития мелких клубней. Минимальное количество мелких клубней было на варианте 8, со второй дозой компоста и Картофином (0,83). Стандартный картофель на этом варианте представляет 93% общего биологического урожая, остальная часть картофеля - это слишком крупные клубни. Первая доза компоста обеспечила достаточное количество питательных веществ, благодаря чему более 96% биологического урожая было представлено стандартными клубнями. Наибольшая доля стандартных клубней (более 98%) была отмечена на варианте 7 (первая доза компоста + Картофин + Фитолар Г) и на вариантах 3 и 4 (с Флавобактерином).

На рисунке 3 представлена информация о влиянии дозы компоста и использования биопрепаратов на прибавку в урожайности стандартных клубней картофеля от каждой тонны компоста по результатам трехлетних исследований (2018-2020). Сопоставляя этот рисунок с рисунком 2, становится более наглядно видно, что более эффективно и устойчиво использование первой дозы компоста под картофель, соответствующей 80 кг азота/га. Действие биопрепаратов на прибавку урожайности, при этой дозе менее наглядно, но они обеспечивали получение более здоровых клубней.



Примечание: Ф – Флавобакетрин, К – Картофин СК

Рис. 2. Влияние биопрепаратов и компоста на урожайность стандартных клубней картофеля сорта «Удача» в 2020 году

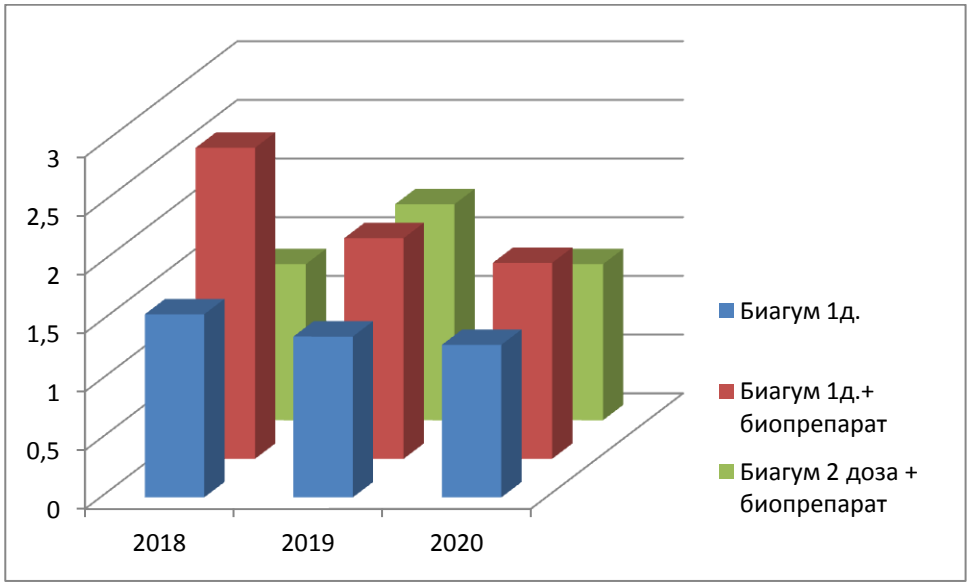


Рис. 3. Величина прибавки урожайности картофеля сорта «Удача» на одну тонну компоста, в зависимости от величины дозы компоста и использования биопрепарата

4. Влияние условий, создающих в вариантах опыта, на качественные показатели клубней картофеля

В таблице 4 представлены данные о содержании сухого вещества в клубнях картофеля сорта Удача при уборке, а также о содержании крахмала. Среднее содержание сухого вещества по вариантам находилось в пределах 19,18 - 20,96%. Минимальные значение были отмечены в контролях (без биопрепаратов). Внесение компоста, как правило несколько снижало содержание сухих веществ. В среднем, содержание крахмала в клубнях картофеля в 2020 году составляло около 13,3%. Значительных различий между большинством вариантов установлено не было. Только в двух вариантах с Флавобактерином (3 и 4 варианты) и в варианте 8 (вторая доза компоста и Картофин) содержание крахмала в клубнях картофеля повышалось до 13,7 – 13,8 %, достоверно отличаясь (примерно на 10,5%)от остальных вариантов.

Таблица 4

Влияние условий проведения опыта на содержание сухого вещества и крахмала в клубнях картофеля

№ варианта	Доза компоста, кг N/га	Вид биозащиты	Содержание сухого вещества,%	Содержание крахмала,%
1	0	0	19,47	12,9
2	80	0	19,18	12,9
3	0	Флавобактерин	20.49	13,8

4	80	Флавобакетрин	20,96	13,7
5	0	Картофин	21,06	12,6
6	80	Картофин	19,76	13,1
7	80	Картофин+ Фитолар, Г	20,72	12,8
8	160	Картофин	19,71	13,7
$НСР_{95}$			0,57	0,6

5. Влияние выбранных факторов на сохранение клубней картофеля при хранении

Хранение картофеля - это сложный процесс от которого зависит качество клубней, как для товарного, так и для семеноводческого использования. В результате дыхания при температуре 2 ^{o}C теряется от 1,30 до 3,68 мг CO_2 на 1 кг в час (Пшеченко и др. 2007, с. 23). Клубни картофеля теряют в массе также в результате испарения воды, и в результате развития болезней. В табл. 5 представлены результаты хранения клубней картофеля. Наибольший процент сохранившегося картофеля отмечается на вариантах с использование биопрепаратов: 3,4 и 7. В целом, использование компоста несколько снижала количество сохранившегося картофеля, особенно вторая доза. Наибольшее количество клубней, пораженных болезнями, отмечается на вариантах без использования биопрепаратов. На вариантах с использованием биопрепаратов основная масса картофель после хранения осталась здоровой (97 – 99% от сохранившихся). Однако, картофель с варианта 8, где была использована вторая доза компоста, также характеризовался более высокой долей больных клубней и меньшим процентом сохранившихся.

Таблица 5

Влияние биопрепаратов и компоста на сохранность картофеля при хранении

№ варианта	Доза компоста, кг N/га	Вид биозащиты	% сохранившегося картофеля, от заложенного на хранения	% клубней поврежденных различными болезнями, от сохранившихся	% здоровых клубней от сохранившихся
1	0	0	89,3	6,6	93,4
2	80	0	88,1	6,4	93,6
3	0	Флавобактерин	92,6	3,2	97,7

4	80	Флавобакетрин	92,6	2,3	97,1
5	0	Картофин	88,3	1,0	99,0
6	80	Картофин	89,7	2,2	97,9
7	80	Картофин+ Фитолар, Г	97,1	2,9	97,1
8	160	Картофин	84,7	5,6	94,2

В таблице 6 представлены информация о содержании сухого вещества и нитратов в клубнях картофеля при закладке их на хранение и после снятия с хранения (через шесть месяцев), а также содержании аскорбиновой кислоты после хранения. Среднее по вариантам содержание сухого вещества в клубнях колебалось осенью в пределах 19,18 – 20,72%, а весной от 18,85 до 21,24%. Следует отметить, что наименьшее содержание сухого вещества зафиксировано в вариантах без использования биопрепаратов и на варианте со второй дозой компоста. Очевидно, что это свидетельствует, что биопрепараты способствовали более эффективной жизнедеятельности растений картофеля и лучшему биосинтезу. Ожидаемо, более низкое содержание сухого вещества отмечается и на варианте с максимальной дозой компоста, здесь же и максимальное концентрация нитратов. Повышенное содержание нитратов способствовало активному накоплению воды.

Содержание нитратов в картофеле всех вариантов было ниже ПДК. При использовании биопрепаратов содержание нитратов в клубнях картофеля повышалось, что отражает повышенную минерализационную активность микрофлоры на этих вариантах опыта. Растения картофеля, в свою очередь, использовали это дополнительное количество азота.

Таблица 6

Содержание сухого вещества и нитратов в клубнях картофеля в сентябре 2020 и в марта 2021 годов

№ варианта	Доза компоста, кг N/га	Вид биозащиты	Содержание аскорбино-вой кисло-ты, мг/100 г	Содержание сухого вещества%		Содержание нитратов, мг/кг	
				Осенью 2020 г.	Весной 2021 г.	Осенью 2020 г.	Весной 2021 г.
1	0	0	1,36	19,56	18,11	185	160
2	80	0	2,27	19,18	18,85	271	139
3	0	Флавобактерин	3,00	20,49	20,40	210	145

4	80	Флавобактерин	2,31	20,20	20,47	268	115
5	0	Картофин	2,31	20,19	21,24	138	136
6	80	Картофин	2,32	19,71	20,06	324	177
7	80	Картофин + Фитолар, Г	3,60	20,72	20,41	253	150
8	160	Картофин	2,29	20,67	19,54	226	124
				0,57	0,78		

Выводы

1. По результатам исследований в 2020 году подтверждается эффективность выбранного варианта технологии производства органического картофеля. Совместное использование компоста в дозе 4,3 т/га и биопрепаратов позволило достичь урожайности стандартных клубней в 27,5 – 28, 2 т/ га с их низкой пораженностью грибными болезнями. При увеличении дозы компоста до 8,6 т/га урожайность возросла до 31,8 т/га, но в клубнях снижалось содержание сухого вещества и увеличивалось содержание нитратов.

2. Биопрепараты, значительно активизировали накопление минеральных форм азота в почве, что способствовало улучшению азотного питания растений картофеля.

3. Отмечено существенное накопление нитратов в почве в позднее осенний период (до 165 мг нитратов/кг почвы на варианте со второй дозой компоста), что может создавать угрозу потерь азота, в первую очередь нитратов, в результате вымывания. В связи с этим, целесообразно осуществлять посев озимых культур после уборки пропашных культур, которые будут устранять эти угрозы.

4. Собранный массив информации позволяет подойти к созданию программного комплекса «умное» органическое поле. В результате анализа информации за четыре года было установлено конкретное значение суммы активных температур в мае - июне для обеспечения высокого урожая органического картофеля и снижения заболеваемости клубневыми болезнями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De Schaetzen S. Organic Agriculture and the Sustainable Development Goals: Part of the Solution. Nature&More. 2019. 68 p. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.eosta.com/sites/www.eosta.com/files/documenten/nm19_329_report_nm_lr.pdf (дата обращения 25.08.2021)

2. Ponisio L., M'Gonigle L., Mace K., Palomino J., de Valpine P., Kremen C.

Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2015. Vol. 282. Issue 1799: 20141396. DOI: 10.1098/rspb.2014.1396.

3. Foley J., Defries R., Asner G. et al. Global Consequences of Land Use. Science. 2005. Vol. 309 (5734), pp. 570-574. DOI: 10.1126/science.1111772.

4. Feiziene D., Janusauskaite D., Feiza V., Povilaitis V. et al. After-effect of long-term soil management on soil respiration and other qualitative parameters under prolonged dry soil conditions // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2015. Vol. 39, pp. 633-651 DOI: 10.3906/tar-1405-88

5. Архипов А.Г., Косогор С.Н., Моторин О.А. и др. Цифровая трансформация сельского хозяйства России. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 80 с.

6. Попов В.Д., Минин В.Б., Максимов Д.А., Папушин Э.А. Обоснование интеллектуальной системы управления органическим производством в растениеводстве // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 4(97). С. 28-41.

7. Минин В.Б., Мельников С.П., Максимов Д.А., Логинов Г.А. Особенности формирования продуктивности картофеля, возделываемого по биологизированной технологии // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 3 (100). С. 70-80.

8. Minin V.B., Popov V.D., Maksimov D.A., Ustroev A.A., Papushin E.A., Melnikov S.P. Developing of modern cultivation technology of organic potatoes. Agronomy Research. 2020. Vol.18. Special issue 2, pp. 1359-1367.

9. Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., Vasilev E. Method of designing of manure utilization technology. Agronomy research. 2017. Vol. 15. No. 3, pp. 658-663

10. Titova J.A., Novikova I.I., Boykova I.V., Pavlyushin V.A., Krasnobaeva I.L. Novel solid-phase multibiorecycled biologics based on Bacillus subtilis and Trichoderma asperellum as effective potato protectants against Phytophthora disease. Agricultural Biology [Sel'Sokhozyaistvennaya biologiya]. 2019. Vol. 54 No. 5, pp. 1002–1013. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.1002eng

11. Пшеченко К.В., Зейрук В.Н., Еланский С.Н., Мальцев С.В. Технологии хранения картофеля. М.: «Картофелевод», 2007. 191 с.

12. Бутов А.В., Мандрова А.А. Биохимические показатели и нитраты в период хранения картофеля при современных приемах возделывания. Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. №1. С. 127-134. DOI:10.21603/2074-9414-2019-1-127-134

13. HELCOM. Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions on an Action Plan for the development of organic production. [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/com2021_141_act_organic-action-plan_en.pdf (дата обращения 25.08.2021)

REFERENCES

1. De Schaetzen S. Organic Agriculture and the Sustainable Development Goals: Part of the Solution. Nature&More. 2019: 68. Available at: https://www.eosta.com/sites/www.eosta.com/files/documenten/nm19_329_report_nm_lr.pdf (accessed 25.08.2021)

2. Ponisio L., M'Gonigle L., Mace K., Palomino J., de Valpine P., Kremen C. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2015. Vol. 282. Issue 1799: 20141396. DOI: 10.1098/rspb.2014.1396.

3. Foley J., Defries R., Asner G. et al. Global Consequences of Land Use. Science. 2005. Vol. 309 (5734): 570-574. DOI: 10.1126/science.1111772.

4. Feiziene D., Janusauskaite D., Feiza V., Povilaitis V. et al. After-effect of long-term soil management on soil respiration and other qualitative parameters under prolonged dry soil conditions // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2015. Vol. 39: 633-651 DOI: 10.3906/tar-1405-88

5. Arkhipov A.G., Kosogor S.N., Motorin O.A. et al. Tsifrovaya transformatsiya sel'skogo khozyaistva Rossii [Digital transformation of Russian agriculture]. Moscow: Rosinformagrotekh, 2019: 80 (In Russian)

6. Popov V.D., Minin V.B., Maksimov D.A., Papushin E.A. Obosnovanie intellektual'noi sistemy upravleniya organicheskim proizvodstvom v rastenievodstve [Substantiation of intellectual management system of organic crop production]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2018. No. 4(97): 28-41 (In Russian)

7. Minin V.B., Melnikov S.P., Maksimov D.A., Loginov G.A. Osobennosti formirovaniya produktivnosti kartofelya, vozdelyvaemogo po biologizirovannoi tekhnologii [How to achieve the high yielding capacity of potato cultivated by the biology-based technology]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019 No. 3 (100): 70-80 (In Russian)

8. Minin V.B., Popov V.D., Maksimov D.A., Ustroev A.A., Papushin E.A., Melnikov S.P. Developing of modern cultivation technology of organic potatoes. Agronomy Research. 2020. Vol.18. Special issue 2: 1359-1367 (In English)

9. Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., Vasilev E. Method of designing of manure utilization technology. Agronomy research. 2017.Vol. 15. No. 3: 658-663 (In English)

10. Titova J.A., Novikova I.I., Boykova I.V., Pavlyushin V.A., Krasnobaeva I.L. Novel solid-phase multibiorecycled biologics based on Bacillus subtilis and Trichoderma asperellum as effective potato protectants against Phytophthora disease. Agricultural Biology [Sel'Sokhozyaistvennaya biologiya]. 2019. Vol. 54. No. 5: 1002–1013 (In English) DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.1002eng

11. Pshechenko K.V., Zeiruk V.N., Elanskii S.N., Maltsev S.V. Tekhnologii khraneniya kartofelya [Potato storage technologies]. Moscow: Kartofelevod Publ., 2007: 191 (In Russian)

12. Butov A.V., Mandrova A.A. Biokhimicheskie pokazateli i nitraty v period khraneniya kartofelya pri sovremennykh priemakh vozdelyvaniya [Biochemical indicators and nitrates in potatoes during storage: modern cultivation techniques]. Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2019. Vol. 49. No.1: 127-134 (In Russian). DOI:10.21603/2074-9414-2019-1-127-134

13. HELCOM. Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions on an Action Plan for the development of organic production. Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/com2021_141_act_organic-action-plan_en.pdf (accessed 25.08.2021)

УДК 631.815 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-66-74**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ НОРМЫ ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ

А.М. Валге, д-р. техн. наук Э.А. Папушин, канд. техн наук

А.И. Сухопаров, канд. техн. наук

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

В статье представлен подход в определении оптимальных норм внесения минеральных удобрений с учетом изменения их стоимости при возделывании многолетних трав на примере злакового травостоя ежи сборной. Удобрения оказывают сложное влияние на формирование урожайности травы и их применение существенно сказывается на величине себестоимости выращиваемых трав. Обоснование целесообразности объёмов внесения минеральных удобрений осуществлялось математическими методами нелинейного программирования на базе полученной математической модели зависимости урожая на средне окультуренных почвах от следующих факторов: норм внесения удобрений (азотных, фосфорных и калийных), числа укосов за период вегетации и высоты среза травы. Решение задачи выполнялось через поиск целевой функции. Рассматривались два варианта – определение минимума затрат (оптимального значения норм внесения минеральных удобрений) для формирования травостоя с необходимой урожайностью и определение оптимального значения урожайности, которое можно получить при различном стоимостном сочетании минеральных удобрений. Выявлено, что наиболее низкой себестоимостью 533,4 руб/т обладает травостой ежи сборной с урожайностью 9 т/га при двукратном скашивании на высоте 8 см при внесении только азотных удобрений в количестве 311,2 кг/га. При необходимости получения высоких урожаев (более 11 т/га) целесообразно внесение фосфорно-калийных удобрений. В настоящее время выявлено, что на себестоимость выращиваемых трав наименьшее влияние имеет изменение стоимости фосфорных удобрений, а наибольшее – азотных удобрений, так как именно они оказывают наиболее сильное воздействие на формирование урожайности злаковых трав.

Ключевые слова: многолетние травы, урожайность, минеральные удобрения, оптимизация, нелинейное программирование.

Для цитирования: Валге А.М., Сухопаров А.И., Папушин Э.А. Моделирование оптимальной нормы внесения минеральных удобрений при возделывании многолетних трав // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.66-75

MODELLING OF THE OPTIMAL APPLICATION RATE OF MINERAL FERTILISERS IN PERENNIAL GRASS CROPPING

A.M. Valge, DSc (Engineering), A.I. Sukhoparov, Cand Sc. (Engineering), E.A. Papushin, Cand Sc. (Engineering)

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

The article presents an approach to determining the optimal application rates of mineral fertilizers with due account for their cost variation in perennial grass cropping on the example of the cocksfoot grass (*Dactylus glomerata*). Fertilisers have a complex effect on the formation of the grass yields. Their use significantly affects the self-cost of cultivated grasses. The feasibility of the application amounts of mineral fertilisers was substantiated by mathematical methods of nonlinear programming based on the created mathematical model describing the dependence of the yield on medium cultivated soils on the following factors: fertilization rates with nitrogen, phosphorus and potash fertilisers, the number of cuttings during the growing season, and the height of the grass cutting. The problem was solved through the search for the target function. Two options were considered - determining the minimum cost (the optimal application rates of mineral fertilisers) of the grass stand formation with the required yield and determining the optimal yield, which can be obtained with a different cost combination of mineral fertilisers. The study revealed that the cocksfoot grass stands with the yield of 9 t/ha demonstrated the lowest self-cost of 533.4 RUR/t under the double mowing at a height of 8 cm and only nitrogen fertilisation in the amount of 311.2 kg/ha. The application of phosphorus and potassium fertilisers was advisable for the required yields above 11 t/ha. The study also demonstrated that the cost variation of phosphorus fertilisers had the least effect on the self-cost of cultivated grass and that of the nitrogen fertilisers had the biggest effect since nitrogen fertilisation was most important for the formation of the cereal grass yield.

Key words: perennial grass, yielding capacity, mineral fertiliser, optmisation, non-linear programming

For citation: Valge A.M., Sukhoparov A.I., Papushin E.A. Modelling of the optimal application rate of mineral fertilisers in perennial grass cropping. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. No. 3(108): 66-75(In Russian)

Введение

Под кормовыми культурами в ЕС занято около 33% сельскохозяйственных угодий [1], а на Северо-Западе России более 90% всех площадей сельскохозяйственных угодий, из которых более 88% приходиться на многолетние травы [2]. Основной задачей кормопроизводства является заготовка высококачественных кормов различного видового состава в необходимом объеме, т.е создание надёжной кормовой базы для животноводства [3]. На Северо-Западе России кормовые культуры занимают около 1500 тыс. га, или 65-66% в структуре посевных площадей. Основной группой кормовых культур остаются многолетние травы, занимающих в структуре посевных площадей более 88%, а в валовом сборе растительного сырья – 85% [4].

Для получения высокой продуктивности кормовых культур необходимо, чтобы почва имела благоприятную для них реакцию, а также содержала достаточное количество элементов питания. Почвенно-климатические условия Северо-Запада России таковы, что обеспечивают наивысшую в нашей стране отдачу от применения практически всех видов удобрений. Без их обоснованного использования эффективное земледелие в регионе невозможно в принципе [5, 6] В связи с этим необходимо осуществлять

подкормку минеральными удобрениями в период ухода за посевами многолетних трав [7, 8]. Выявлено, что многолетние травы усваивают и используют около 30-45% фосфора (P_2O_5), 55-85% калия (K_2O) и до 100% азота (N) из удобрений. По сравнению с другими полевыми культурами фосфор они используют в 1,3-2 раза, калий – в 1,7-2,2 и азот – в 1,5-2 раза лучше [9]. Однако, минеральные удобрения имеют высокую стоимость и необоснованное их применение будет способствовать росту затрат на производство кормов, следовательно увеличению конечной себестоимости продукции животноводства. Поэтому важнейшим условием рационального применения минеральных удобрений является установление наиболее эффективных норм внесения удобрений в зависимости от вида травостоя, обеспеченности почв питательными веществами и интенсивности использования травостоя.

Цель исследования – определение оптимальных норм внесения удобрений в зависимости от урожайности трав с учётом их стоимости.

Материалы и методы

Количество получаемой зеленой массы травы с единицы площади (урожай травы) зависит от многих факторов. Для многолетней травы злакового травостоя ежи сборной, используемой для заготовки кормов, методом планирования экспериментов получена модель зависимости урожая на средне окультуренных почвах от следующих факторов: норм внесения удобрений (азотных – N, фосфорных – P и калийных K), числа укосов за период вегетации, высоты среза травы [10]. Для получения математической модели был реализован 5-факторный эксперимент. Уровни факторов и их значение приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица факторов планирования эксперимента

Кодированные значения факторов	Абсолютные значения факторов				
	x_1(N) кг/га	x_2(P_2O_5) кг/га	x_3(K_2O) кг/га	x_4,число укосов	x_5, высота скашивания, см
-2	0	0	0	2	2
-1	150	55	80	3	4
0	300	110	160	4	6
+1	450	165	240	5	8
+2	600	220	320	6	10

В результате обработки экспериментальных данных получена достоверная математическая модель урожая травы (урожай сухой биомассы в сумме за все укосы, т/га) в зависимости от пяти факторов [9]:

$$У = (102,3 + 27,09\ x_1 + 0,69\ x_2 + 0,91x_3 - 8,4\ x_4 - 1,9\ x_5 - 8,25\ x_1^2 - 0,37\ x_2^2 - 1,56\ x_3^2 –$$

$$4{,}2\ x_4^2 - 2{,}28\ x_5^2 + 0{,}14x_1 \cdot x_2 + 1{,}15x_1 \cdot x_3 - 1{,}1x_1 \cdot x_4 - 0{,}68\ x_1 \cdot x_5 - 0{,}0063\ x_2 \cdot x_3 - 0{,}36\ x_2 \cdot x_4 \quad (1)$$

$$- 0{,}76\ x_2 \cdot x_5 - 0{,}85\ x_3 \cdot x_4 - 1{,}6\ x_3 \cdot x_5 - 0{,}49\ x_4 \cdot x_5)/10,\ (\text{т/га}).$$

Уравнение (1) показывает, что урожайность имеет достаточно большое число степеней свободы. Для исследования изменения пятифакторного пространства зависимой переменной, урожая травы, от действующих факторов, были построены поверхности откликов для всех возможных сочетаний факторов модели. Характер изменения поверхностей откликов показывает, что урожай зеленой массы изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от изменения значений факторов.

Анализ уравнения (1) на экстремум классическим методом, путем определения частных производных и решения полученной системы уравнений, показал, гиперповерхность имеет экстремум maximum с координатами:

$$x_1 = 2{,}055;\ x_2 = 4{,}311;\ x_3 = 2{,}591;\ x_4 = -1{,}589;\ x_5 = -2{,}18.$$

Из полученных результатов видно, что значения трех факторов x_1, x_3, x_5 лежат за пределами экспериментальных данных. При полученных значениях факторов значения урожая травы составляет y = 14,154 т/га.

Определение максимальной урожайности травы в пределах эксперимента было выполнено путем решения оптимизационной задачи с ограничениями:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \to \max, \quad (2)$$

$$-2{,}0 \le x_i \le 2{,}0,\ \ i = 1 \Lambda\ 5,$$

где функция зависимости урожайности травы от действующих факторов записана в общем виде.

Для решения этой задачи на системе Excel разработана программа и выполнены расчеты по определению максимальной урожайности травы. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения экстремальных значений урожайности травы на 1 га

Значения факторов	x_1 (N)	x_2 (P_2O_5)	x_3 (K_2O)	x_4 число укосов	x_5 высота скаш-ния	Напр-е поиска	Урож-сть травы, т
Нормиров-ные факторы	1,96	2,0	2,0	-1,45	-1,59	max	14,0
Дейст-ные факторы, кг	550,0	220,0	320,0	2,0	3,0		

Анализ данных таблицы показывает, что факторы оказывают существенное влияние на урожай травы. Получать урожай травы можно при различных значениях факторов. Максимальный урожай получать может быть не рационально, так как при этом необходимо использовать максимальные нормы удобрений, что достаточно дорого при современных ценах

на удобрения. Возникает необходимость решения оптимизационной задачи по определению значений факторов, обеспечивающих рациональную урожайность травы при минимальных расходах на удобрения и уборку травы. Рассмотрим возможные варианты формализации данной задачи:

- определение оптимальной нормы внесения удобрений при фиксированной их стоимости;

- определение оптимальных нормы внесения удобрений при изменении их стоимостей

Задача № 1. Определение оптимальной нормы внесения удобрений при фиксированной их стоимости

Для производства животноводческой продукции чрезвычайно важное значение имеет использование дешевых кормов из трав. Так как удобрения оказывают сложное влияние на урожай травы, представляет значительный практический интерес определение норм внесения удобрений и планируемой урожайности травы на её стоимость. Для решения этой задачи разработана следующая математическая модель:

$$S = C_N Z_1 + C_P Z_2 + C_K Z_3 + C_Y Z_4 \to \min$$

$$Z_1 = 300{,}0 + 150{,}0 \cdot x_1, – азот, кг;$$

$$Z_2 = 110{,}0 + 55{,}0 \cdot x_2, – фосфор, кг$$

$$Z_3 = 160{,}0 + 80{,}0 \cdot x_3, – калий, кг; \qquad (3)$$

$$Z_4 = 4{,}0 + x_4, – число_укосов_травы$$

$$Z_5 = 6{,}0 + 2{,}0 \cdot x_5, – высота_скашивания, см;$$

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = const - урожай_травы;$$

$$-2{,}0 \le x_i \le 2{,}0, i = 1-5,$$

где C_N, C_P, C_K – стоимость, соответственно азотных, фосфорных и калийных удобрений; C_Y – затраты на скашивание 1 га травы принята постоянной и равной 1000,0 руб./га; Z_1, Z_2, Z_3 – действительные значения количества использованных удобрений, кг; Z_4, Z_5 – действительные значения числа укосов и высоты скашивания травы;

Задача № 2. Определение оптимальных нормы внесения удобрений при изменении их стоимостей

В рыночных производственных условиях стоимость минеральных удобрений стоимость минеральных удобрений может изменяться по различным причинам. Поэтому представляет интерес оценки влияния изменяющейся стоимости удобрений на оптимальный урожай травы и нормы внесения удобрений.

Для оценки влияния стоимостей удобрений на оптимальный урожай травы представим в системе (3) следующую целевую

функцию при прежних ограничивающих условиях:

$$L = \frac{S}{y} \to \min \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Решение обоих вариантов задач выполняется по разработанным системам (3) и (4) в программном приложении Microsoft Office Excel[11].

Решение задачи №1

Цены на удобрении получены из Интернета и приведены в табл. 3.

Таблица 3

Действующие цены на основные виды минеральных удобрений

Виды удобрений	Отпускная цена за тонну	Цена 1 кг с учетом доставки, руб./кг
Азотные	7550,0 руб.	9,0
Фосфорные	$705,0	23,0
Калийные	7000, 0 руб.	8,0

Для выполнения расчетов задавались различные значения урожайности травы (от 5 до 14 т/га с шагом 1 т/га) и выполнялось решение оптимизационной задачи на минимум суммарных затрат на получение урожая травы. Для каждого значения урожая травы определены оптимальные значения факторов: дозы внесения N, P K, число укосов, высота скашивания и стоимость одной тонны урожая травы. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнительные показатели изменения стоимости 1 тонны травы от планируемой урожайности при заданных стоимостных показателях

Наименование расчетных факторов	Планируемый урожай травы, т/га									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13,9
Стоимость 1 т. травы	646,6	572,4	558,7	539,5	533,4	544,3	573,2	621,1	743,4	1044,2
Доза внесения N, кг/га	137,0	172,7	212,2	257,3	311,2	382,5	421,9	471,1	543,9	573,1
Доза внесения P, кг/га	0	0	0	0	0	0	0	0	13,3	190,1
Доза внесения K,	0	0	0	0	0	0	63,6	139,1	246,7	312,1

кг/га										
Число укосов	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
Высота скашивания, см	8	8	8	8	8	7	7	6	5	3

Анализ полученных результатов показывает, что наименьшая стоимость многолетних злаковых трав ежи сборной составляет 533,4 руб./т при её урожайности 9,0 т/га. При этом оптимальные значения факторов составляют:

- нормы внесения удобрений: N – 311, 2 кг/га, P – 0 т/га, K – 0 т/га;

- число укосов – 2;

- высота скашивания травы – 8,0 см.

Снижение и увеличение урожая травы относительно оптимальной приводит к повышению стоимости получаемого урожая травы.

Внесение калийных удобрений целесообразно при урожайности ежи сборной выше 11 т/га, а фосфорных удобрений – более 13 т/га.

Решение задачи №2

В Excel были выполнены модельные расчеты при различных стоимостях N, P, K удобрений. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Оценка влияния стоимостей удобрений на оптимальный урожай травы

№	Стоимости удобрений, руб./кг			Дозы внесения, кг/га			Урожай травы, т/га	Стоимость травы, руб./т
	N	P	K	N	P	K		
1	9,0	23,0	***8,0***	346,6	0	0	9,54	641,3
2	9,0	23,0	***6,0***	346,6	0	0	9,54	641,3
3	9,0	23,0	***4,0***	346,6	0	93,4	10,5	471,0
4	9,0	***20,0***	8,0	346,6	0	0	9,54	641,3
5	9,0	***15,0***	8,0	346,6	0	0	9,54	641,3
6	9,0	***10,0***	8,0	346,6	0	0	9,54	641,3
7	9,0	***5,0***	8,0	346,6	0	0	9,54	641,3
8	***20***	23,0	8,0	298,1	0	30,7	8,6	1015,4
9	***15***	23,0	8,0	298,1	0	0	8,8	851,3
10	***10***	23,0	8,0	336,0	0	0	9,4	677,4
11	***5***	23,0	8,0	400,2	0	0	10,2	490,8

Приведенные в таблице 5 результаты расчетов о влиянии стоимостей удобрений на стоимость урожая травы и нормы внесения показывает:

- наименьшее влияние оказывает стоимость фосфорных удобрений. Изменение стоимости в четыре раза не приводит к изменению урожая травы.

- изменение стоимости калийных удобрений показывает, что их использование рационально только при очень низкой стоимости (4,0 руб./кг). При этом доза внесения азотных не изменяется (346,6 кг/га), но добавляются калийные (93,4 кг/га), что приводит к увеличению урожая травы.

- изменение стоимости азотных удобрений оказывает самое высокое воздействие на урожай и стоимость травы. При изменении стоимости удобрений в четыре раза норма внесения изменяется в 1,33 раза, в два раза изменяется стоимость травы.

Выводы Выполненный анализ показывает, что минеральные удобрения оказывают значительное влияние на урожайность травы. Оценка норм внесения минеральных удобрений представляет собой сложную задачу. Использование максимальных норм внесения удобрений хотя и повышает урожай травы, но при этом так же значительно повышается стоимость травы.

При определении оптимального количества вносимых удобрений и их сочетания следует учитывать как стоимость удобрений, так необходимый объём травы. При изменении стоимости удобрений наибольшее влияние на себестоимость травы оказывает стоимость азотных удобрений, наименьшее – фосфорных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stypinski, P. The effect of grassland-based forages on milk quality and quantity. *Agronomy Research*. 2011. Vol. 9. Special Issue 2, pp. 479-488.
2. Справочник по кормопроизводству. / Под ред. В.М. Косолапова, И.А. Трофимова. М.: Россельхозакадемия, 2014. 717 с.
3. Кормопроизводство – стратегическое направление в обеспечении продовольственной безопасности России. Теория и практика. М.: Росинформагротех, 2009. 200 с.
4. Валге А.М., Сухопаров А.И., Фролова М.Г. Оптимизация параметров травяного конвейера при производстве кормов в условиях Ленинградской области // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. №2 (99). С. 222-229.
5. Иванов И.А., Иванов А.И. Научно-практические основы системы земледелия Северо-Западного района России. Великие Луки: ВГСХА. 2006. 249 с.
6. Иванов А.И., Конашенков А.А., Иванова Ж.А. и др. Рекомендации по применению технологий проведения агрохимических, агробиологических и реабилитационных мероприятий. СПб: Агрофизический НИИ РАСХН, 2009. 207 с.
7. Vázquez de Aldana B.R., Berendse F. Nitrogen-use efficiency in six perennial grasses from contrasting habitats. *Functional Ecology*. 1997. Vol. 11. No. 5. pp. 619-626.
8. Burnett S.E., Mattson N.S., Williams K.A. Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. Scientia Horticulturae. 2016. Vol. 208. pp.111-119.
9. Рекомендации по производству семян многолетних трав в условиях Ленинградской области. СПб.: ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 2006. 92 с.

10. Образцов А.С. Системный метод: применение в земледелии. М.: Агропромиздат, 1990. 368 с.

11. Валге А.М. Использование систем Excel и Mathcad при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства (Методическое пособие). СПб: ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии. 2013. 200 с.

REFERENCES

1. Stypinski, P. The effect of grassland-based forages on milk quality and quantity. *Agronomy Research.* 2011. Vol. 9. Special Issue 2: 479-488.

2. Spravochnik po kormoproizvodstvu [Feed Production Handbook]. V.M. Kosolapov, I.A. Trofimov (eds.) Moscow: Rossel'khozakademiya, 2014: 717 (In Russian)

3. Kormoproizvodstvo – strategicheskoe napravlenie v obespechenii prodovol'stvennoi bezopasnosti Rossii. Teoriya i praktika [Fodder production is a strategic direction in ensuring food security in Russia. Theory and practice]. Moscow: Rosinformagrotekh Publ., 2009: 200 (In Russian)

4. Valge A.M., Sukhoparov A.I., Frolova M.G. Optimizatsiya parametrov travyanogo konveiera pri proizvodstve kormov v usloviyakh Leningradskoi oblasti [Optimization of green forage chain parameters in fodder production under conditions of Leningrad Region]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019. No. 2 (99): 222-229 (In Russian)

5. Ivanov I.A., Ivanov A.I. Nauchno-prakticheskie osnovy sistemy zemledeliya Severo-Zapadnogo raiona Rossii [Scientific and practical foundations of the arable farming system of the North-West Region of Russia]. Velikie Luki: VGSKhA. 2006: 249 (In Russian)

6. Ivanov A.I., Konashenkov A.A., Ivanova Zh.A. et al. Rekomendatsii po primeneniyu tekhnologii provedeniya agrokhimicheskikh, agrobiologicheskikh i reabilitatsionnykh meropriyatii [Recommendations for the use of technologies for agrochemical, agrobiological and rehabilitation activities]. Saint Petersburg: Agrofizicheskii NII RASKhN, 2009: 207 (In Russian)

7. Vázquez de Aldana B.R., Berendse F. Nitrogen-use efficiency in six perennial grasses from contrasting habitats. *Functional Ecology*. 1997. Vol. 11. No. 5: 619-626.

8. Burnett S.E., Mattson N.S., Williams K.A. Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. *Scientia Horticulturae*. 2016. Vol. 208: 111-119.

9. Rekomendatsii po proizvodstvu semyan mnogoletnikh trav v usloviyakh Leningradskoi oblasti [Recommendations for perennial grass seeds production in the conditions of the Leningrad Region]. Saint Petersburg: GNU SZNIIMESKh Rossel'khozakademii, 2006: 92 (In Russian)

10. Obraztsov A.S. Sistemnyi metod: primenenie v zemledelii [Systemic method: application in arable farming]. Moscow: Agropromizdat, 1990: 368 (In Russian)

11. Valge A.M. Ispol'zovanie sistem Excel i Mathcad pri provedenii issledovanij po mekhanizatsii sel'skokhozyajstvennogo proizvodstva (Metodicheskoe posobie) [Application of Excel and Mathcad in research related to mechanisation of agricultural production/ Guidance manual]. Saint Petersburg: GNU SZNIIMESKH Rossel'khozakademii, 2013: 200(InRussian)

УДК 632.51:631.316.6 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-75-90**

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО АГРЕГАТА С КОЛЬЦЕВЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ В БОРЬБЕ С БОРЩЕВИКОМ СОСНОВСКОГО

Н.И. Джабборов, д-р техн. наук; А.В. Добринов, канд. техн. наук

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

В статье дана оценка эффективности использования почвообрабатывающего агрегата с кольцевыми рабочими органами для борьбы с борщевиком Сосновского. В проведенном исследовании почвообрабатывающий агрегат УКПА-2,4-4 обеспечивал высококачественную поверхностную обработку почвы с одновременным уничтожением сорных растений, включая борщевик Сосновского при двукратном использовании с промежутком между обработками в 10-12 дней. Кольцевые рабочие органы выполняли высококачественное рыхление верхнего слоя почвы и подрезание борщевика Сосновского и других сорных растений при установке угла их атаки в 25°. Предложенный прием уничтожения борщевика Сосновского следует использовать в комбинации с замещающими посевами быстрорастущих и высокопродуктивных злаковых, бобовых трав, а также масличных и пропашных культур при интенсивном их возделывании с соблюдением всех агротехнических требований.

***Ключевые слова*:** борщевик Сосновского, уничтожение, почвообрабатывающий агрегат, кольцевой рабочий орган, подрезание корнестебля.

Для цитирования: Джабборов Н.И., Добринов А.В. Оценка эффективности использования почвообрабатывающего агрегата с кольцевыми рабочими органами в борьбе с борщевиком Сосновского // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. № 3 (108). С. 75-90

EFFICIENCY OF THE TILLAGE IMPLEMENT WITH RING-SHAPED TOOLS IN THE SOSNOVSKY'S HOGWEED CONTROL

N.I. Dzhabborov, DSc (Engineering), A.V. Dobrinov, Cand. Sc. (Engineering)

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

The article considers the application efficiency of a tillage implement with ring-shaped tools in the Sosnovsky's hogweed (*Heracleum Sosnowskyi*) control. In the conducted study the UKPA-2.4-4 tillage implement was found to provide the high-quality surface tillage with simultaneous destruction of weeds including the Sosnovsky’s hogweed in two soil cultivations with an interval of 10 to 12 days. Ring-shaped tools performed high-quality loosening of the topsoil layer and cutting of the Sosnovsky’s hogweed and other weeds when their approach angle was set at 25°. The proposed method for the Sosnovsky’s hogweed control is recommended for use in combination

with replacement plantings of fast-growing and high-yielding cereals and legumes as well as oilseeds and row crops with their intensive cultivation in compliance with all agro-technical requirements.

***Key words*:** Heracleum Sosnowskyi, weed control, tillage implement, ring-shaped tillage tool, root stem cutting

For citation: Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Efficiency of the tillage implement with ring-shaped tools in the Sosnovsky's hogweed control. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. No. 3(108): 75-90 (In Russian)

Введение

Борщевик Сосновского представляет собой крупное травянистое растение высотой от 1 до 2 и более метров семейства Зонтичные. Корневая система растения стержневая, основная масса корней располагается в слое до 30 см, отдельные корни достигают глубины 2 м. При культивировании борщевика как силосной культуры еще в середине XX века, он получил широкое распространение в ряде стран Европы, в том числе и в России. Не контролируемое распространение борщевика Сосновского в начале уже XXI века стало представлять серьезную угрозу как для территорий населенных пунктов, так для сельскохозяйственных угодий, особенно в Центральном и Северо-Западном регионах нашей страны.

Борщевик Сосновского интенсивно распространяется на заброшенных землях, на территориях садоводств, откосах мелиоративных каналов, обочинах дорог. Он устойчив к неблагоприятным климатическим условиям, активно подавляет произрастание других видов растений, вытесняет естественную растительность. А также может образовывать насаждения различной плотности площадью от нескольких квадратных метров до нескольких гектаров. Так на территории СЗФО по данным 2019 года, общая площадь, занятая борщевиком Сосновского составила порядка 140 тыс. га (рис. 1) [1]. По официальным данным Центра агропромышленного развития Московской области в 2021 году, борщевиком Сосновского поражено порядка 40 тысяч гектаров подмосковной земли.

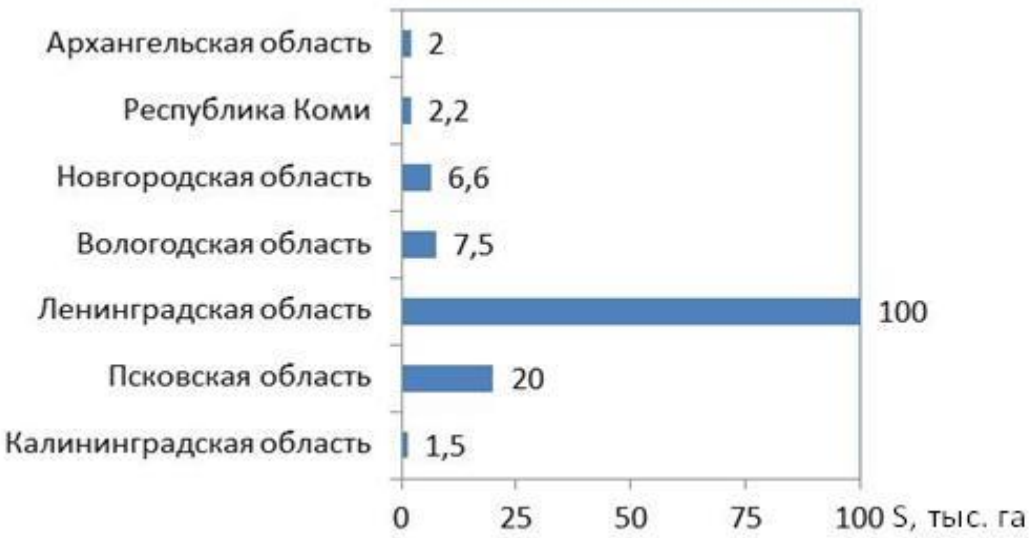


Рис. 1. Площадь занятая борщевиком Сосновского в СЗФО РФ [1].

В 2012 году борщевик Сосновского был выведен из Государственного реестра селекционных достижений, допущенных к использованию на территории Российской Федерации, как утративший хозяйственную полезность. С 01.01.2015 г. семена и зеленая масса борщевика Сосновского исключены из Общероссийского классификатора продукции ОК 005-93. В ноябре 2015 г. в Отраслевой классификатор сорных растений№ 384 021 310 внесено дополнение, согласно которому в него включен борщевик Сосновского (Heracleum Sosnovsky Manden): раздел «Двудольные многолетние корнестержневые», код 5500.

Уже не первое десятилетие учёные-практики занимаются разработкой эффективных технологий и технических средств, связанных с предотвращением распространения борщевика. Борьбе с чужеродной инвазией посвящено значительное количество научных работ, практических рекомендаций, пособий, которые достаточно полно отражают современный уровень и основные направления исследований в данной сфере.

Основные причины распространения борщевика Сосновского, применяемые методы и средства борьбы с ним в Новгородской области подробно изложены в работах [2, 3].

Авторы работы [4] дали анализ динамики засоренности полей борщевиком Сосновского на территории Пермского края, включая оценку структуры засоренных земель и некоторые рекомендации по реализации эффективных мероприятий для борьбы с ним.

Результаты исследований по оценке эффективности химической борьбы с борщевиком Сосновского отражены в статье [5].

Результаты апробации различных методов борьбы с борщевиком изложены в работе [6, 7]. Авторы данной работы отмечают, что борьба с распространением борщевика требует значительных материальных, финансовых и трудовых ресурсов. Различные методы уничтожения всходов борщевика в весенний период, такие как прополка, применение черной пленки, гербицидов, горячей воды и т.д., предлагают рассматривать как дополнение к системе мероприятий по борьбе с ним.

Авторы статьи [8, 9] отмечают, что борьбу с борщевиком целесообразно проводить такими методами, как кошение, срезание цветоносов, укрывание плёнкой, применение различных видов гербицидов, обработка почвы различными почвообрабатывающими машинами. Для борьбы с одиночно стоящими растениями борщевика предлагается также использовать концентрированную аммиачную селитру, дизельное топливо или уксус с солью.

Предложен термический метод борьбы с борщевиком – обработка растений горячей водой при температуре 92-100 ^{o}C [10]. Установлено, что при таком способе происходит гибель всходов борщевика, еженедельная обработка предотвращает появление новых всходов до осени. Авторы этого исследования считают необходимым поиск решений по разработке бесконтактных способов термической обработки зарослей борщевика.

Также разработаны и предложены практические рекомендации по применению гербицидов для уничтожения борщевика [11], подробно изложен способ оценки густоты стояния растений и прогнозирования зелёной массы от одного растения и целого участка растений [12].

Результаты анализа данных об инвазии борщевика Сосновского на территории МО ГО «Сыктывкар», результаты картографирования мест его произрастания приведены в работе [13]. Предложны этапы реализации пилотного

проекта по освобождению территории населенного пункта от борщевика.

Исследования по оценке морозоустойчивости борщевика Сосновского опубликованы в работе [14]. Установлена слабая устойчивость проростков и взрослых растений борщевика, его семена снижают свою морозостойкость после стратификации в течение перезимовки и увеличения содержания воды в тканях. Промораживание, как метод ликвидации зарослей борщевика рекомендовано для территорий, минимальными температурами не выше – 25 ^{o}C.

В работе [15] проведен подробный анализ мероприятий по ликвидации борщевика Сосновского на территории России.

В Институте агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ также проводятся исследования по разработке эффективных способов борьбы с борщевиком Сосновского [16-20] в рамках международного проекта KS11157 «Предотвращение и утилизация инвазивных растений» (PURE) программы приграничного сотрудничества 2014-2020 «Россия - Юго-Восточная Финляндия». Разработаны технологические приёмы борьбы с борщевиком, основы выбора рациональных технических средств, разработана универсальная машина для поверхностной обработки почвы, восстановления необрабатываемых земель и уничтожения сорных растений, в том числе и борщевика Сосновского при высоте растения, не выше 40 см.

Краткий анализ литературы свидетельствует о необходимости продолжения исследований по предотвращению дальнейшего распространения инвазивного вида на территории РФ и в частности Северо-Западного региона без использования химических средств и поиска экологически безопасных и в тоже время эффективных агротехнических способов его уничтожения.

Цель исследований - оценка эффективности использования почвообрабатывающего агрегата УКПА-2,4-4 с кольцевыми рабочими органами в борьбе с борщевиком Сосновского.

Материалы и методы

Объект исследований – технологический процесс уничтожения УКПА-2,4-4 сорных растений, включая борщевик Сосновского, произрастающих на участках полей, не обрабатываемых в течение 7-8 лет.

Предмет исследований – показатели оценки качества работы УКПА-2,4-4 при агрегатировании с трактором Беларус-82.1 в процессе уничтожения сорной растительности.

На рисунке 2 представлен общий вид машинно-тракторного агрегата Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 с кольцевыми рабочими органами.

Рис. 2. Общий вид машинно-тракторного агрегата Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 с кольцевыми рабочими органами.

Исследования работы МТА Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 проводились на территории экспериментально - производственной базы института в мае – июне 2021 года при следующих условиях: температура атмосферного воздуха 16°С; длина гона участка 150 м; влажность почвы 19-22 %; относительная влажность воздуха 70-75 %; средняя скорость ветра 5-7 м/с; направление ветра - западный, юго-западный; тип почвы- среднесуглинистая, дерново-подзолистая; рельеф 1-2°; средняя засоренность поля борщевиком Сосновского - 22 шт./м^{2}; высота сорных растений 28-35 см; твердость почвы в слое 5-15 см - 1,31 МПа, 15-30 см - 2,06 МПа.

Оценка эффективности использования почвообрабатывающего агрегата с кольцевыми рабочими органами в борьбе с борщевиком и получение необходимой информации о результатах исследований проводились преимущественно визуальным методом.

В процессе исследований проводилась фотофиксация полученных результатов при выполнении агрегатом технологического процесса уничтожения сорной растительности как объекта исследований. Полученные снимки, как иллюстративный материал, достаточно полно поясняют качество проведения соответствующих операций.

Результаты и обсуждение

Почвообрабатывающий агрегат УКПА-2,4-4, как показали результаты исследований [18-20], можно использовать в технологиях восстановления залежных земель при рыхлении верхнего слоя почвы и отделения корневищ сорных растений от почвы, а также для предпосевной обработки почвы.

Из приведенного ранее анализа стало известно, что одним из действенных технологических приемов борьбы с борщевиком Сосновского является механический способ уничтожения с использованием почвообрабатывающих орудий различного типа. С учетом этого, возникла необходимость проверки эффективности работы УКПА-2,4-4 в качестве технического средства для борьбы с борщевиком Сосновского, кольцевые рабочие органы которого, изготовленные в форме усеченного конуса обладают дополнительной способностью перерезания корневищ сорных растений в процессе обработки почвы.

Общеизвестно, что многократное скашивание как способ механической обработки при борьбе с борщевиком не позволяет уничтожить сорняк, а лишь сдерживает его рост и дает возможность предотвратить цветение, при этом корневая система растения сохраняет свою жизнеспособность, имея на стеблекорне, так называемые почки возобновления (или точки роста), заглубленные ниже уровня почвы на 3–5 или 7–10 см и более в зависимости от их вида и типа почвы.

Важно при этом срезать точки роста (почки) инвазии, к которым относят верхушечную (терминальную), пазушные и боковые [21]. В противном случае оставшиеся спящие почки пойдут в рост и корнестебель борщевика даст новые всходы.

Исходя из этого, нами была сформулирована гипотеза о том, что двух – или трехкратное подрезание растений ниже точек роста на начальном этапе их развития при высоте до 40 см почвообрабатывающим агрегатом УКПА-2,4-4 с кольцевыми рабочими органами может препятствовать дальнейшему прорастанию борщевика. После разрезания корнестебля создаются условия для более глубокой обработки почвы или, при выравнивании и рыхлении поверхности поля появляется возможность произвести посев семян культурных растений.

На рисунке 3 представлен общий вид агрофона – необрабатываемое в течение 6-7 лет поле, где произрастают борщевик Сосновского, одуванчики, пырей и осока.

Обработка агрофона была проведена при углах атаки кольцевых рабочих органов машины 15°, 20° и 25°.

Качество процесса уничтожения сорной растительности на участке оценивалось при различных скоростях движения МТА.

Рис. 3. Общий вид агрофона до обработки (25 мая 2021 года).

На рисунке 4 показан общий вид агрофона при первом контрольном проходе МТА Беларус-82.1+УКПА-2,4-4.

Рис. 4. Первый контрольный проход МТА Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 (25 мая 2021 года).

По результатам визуальной оценки качества процесса подрезания, с учетом высокой влажности почвы, скорости движения и угла установки кольцевых рабочих органов, был выбран рациональный режим работы агрегата, при котором происходило полное подрезание сорной растительности: средняя скорость движения агрегата составила 1,94-2,22 м/с; угол атаки кольцевых рабочих органов 25^0. При других углах атаки рабочих органов 15^0 и 20^0 и той же скорости подрезание борщевика происходило в количестве 17 шт/м^2 (77,3%) и 19 шт/м^2 (86,3%) соответственно (рисунок 5).

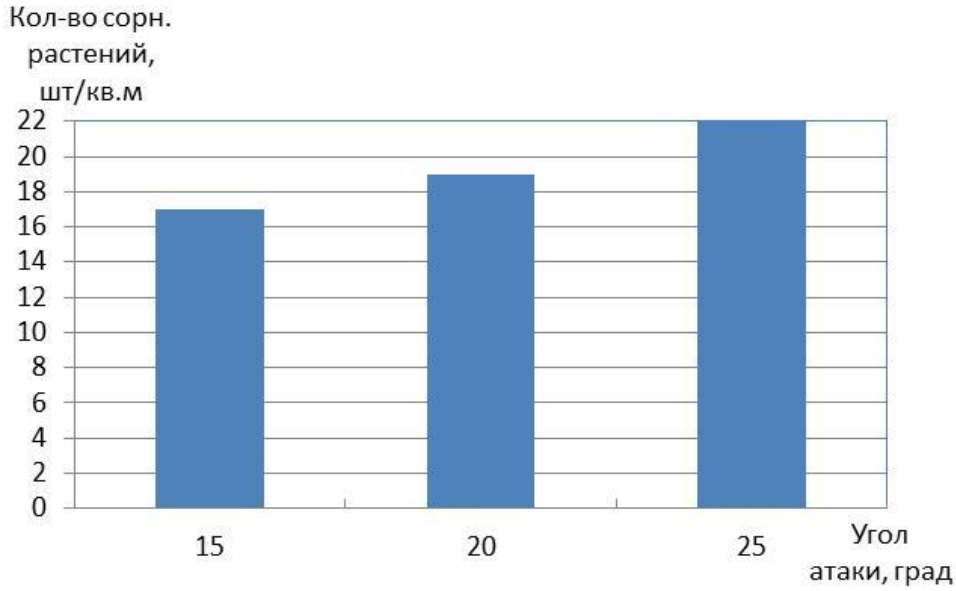


Рис. 5. Степень подрезания сорных растений борщевика Сосновского при установке различных углов атаки рабочих органов УКПА-2,4-4.

На рисунке 6 представлен общий вид МТА Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 при выполнении технологического процесса на выбранном рациональном режиме его функционирования.

Рис. 6. Общий вид МТА Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 при выполнении технологического процесса (25 мая 2021 года).

На рисунке 7 показана схема размещения кольцевых рабочих органов почвообрабатывающего агрегата УКПА-2,4-4.

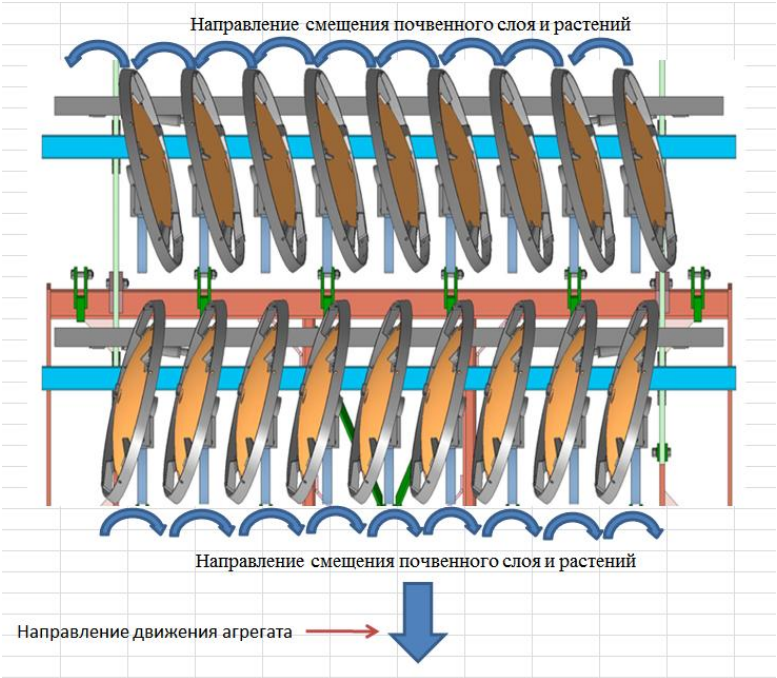


Рис. 7. Схема размещения кольцевых рабочих органов почвообрабатывающего агрегата УКПА-2,4-4.

Из рис. 7 видно, что первый ряд, если смотреть по ходу движения агрегата, кольцевых рабочих органов верхнюю часть почвенного слоя и растения смещает налево, а второй ряд, перекрывая первый, наоборот, направо. При этом обеспечивается двухкратный срез растений и почвы, что повышает степень рыхления почвы и соответственно уничтожения сорных растений. Фактическая глубина обработки, в данном случае среза зависит от угла атаки рабочих органов, влажности и твердости почвы и растений, а также от скорости движения агрегата.

На рисунке 8 показан общий вид агрофона после обработки почвообрабатывающим агрегатом УКПА-2,4-4 в два следа.

Рис. 8. Общий вид агрофона после обработки почвообрабатывающим агрегатом УКПА-2,4-4 (25 мая 2021 года).

При установке угла атаки кольцевых рабочих органов 25° агрегат обеспечивает полное подрезание почвенного пласта на глубину 5-7 см с одновременным перерезанием борщевика Сосновского в его корневой части.

В качестве примера на рисунке 9 представлены фрагменты срезанного борщевика Сосновского и других сорных растений кольцевыми рабочими органами машины.

При обработке поля в два следа удалось срезать только верхушечные (терминальные) и пазушные почки на стеблекорне, при этом боковые почки в большинстве случаев остались с частью корня в почве на глубине порядка 10 см.

Рис. 9. Фрагменты перерезанного корнестебля борщевика Сосновского кольцевыми рабочими органами почвообрабатывающего агрегата УКПА-2,4-4 (25 мая 2021 года).

После двухратной обработки обработанный участок был оставлен в состоянии покоя на 12 дней.

2 июня и 4 июня были проведены наблюдения и дана оценка состояния поля и степени произрастания сорных растений, в том числе и борщевика Сосновского (рис. 10).

2 июня 2021 года 4 июня 2021 года

Рис. 10. Общий вид агрофона после обработки, спустя 7 и 9 дней после обработки.

Оценка состояния наблюдаемого участка после обработки 25 мая показала появление новых всходов борщевика преимущественно из боковых почек. При этом другие виды сорных растений после обработки были уничтожены на 90-95 %.

Спустя 12 дней после первой обработки, 7 июня 2021 года, была проведена повторная обработка участка (рис. 11).

Рис. 11. Повторная обработка участка МТА Беларус-82.1+УКПА-2,4-4 (7 июня 2021 года).

В результате повторной обработки новые всходы борщевика и других сорных растений были полностью уничтожены (рис. 12).

Рис. 12. Агрофон участка после вторичной обработки (7 июня 2021 года).

Необходимо отметить, что после повторной обработки исследуемый участок поля практически был готов к посеву семян растений, которые могут быть использованы как замещающие культуры для возвращения пахотной земли, занятой борщевиком Сосновского, например, быстрорастущие и высокопродуктивные злаки (кострецы) или бобовые (козлятник).

В зависимости от требований агротехники возделывания конкретных сельскохозяйственных культур, на полученном в результате обработки агрофоне (рисунок 12), дополнительно можно провести отвальную или безотвальную обработку почвы с целью возделывания например, пропашных культур, в частности, картофеля.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность использования УКПА-2,4-4 с кольцевыми рабочими органами в агрегате с трактором тягового класса 1.4 в борьбе с борщевиком Сосновского.

Установлено, что почвообрабатывающий агрегат обеспечивает качественную поверхностную обработку почвы с уничтожением сорных растений, в том числе и борщевика Сосновского при двухкратном его использовании с промежутком между обработками 10-12 дней.

Кольцевые рабочие органы агрегата обеспечивают качественное рыхление верхнего слоя почвы и подрезание борщевика Сосновского и других сорных растений при установке угла их атаки 25°.

Предложенный прием уничтожения борщевика следует использовать в комбинации с замещающими посевами на основе быстрорастущих и высокопродуктивных злаковых, бобовых трав, а также масличных и пропашных культур при интенсивном их возделывании с соблюдением агротехнических требований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Регионы СЗФО сформируют программы борьбы с борщевиком Сосновского [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://finance.rambler.ru/other/43235195-regiony-szfo-sformiruyut-programmy-borby-s-borschevikom-sosnovskogo/ (Дата обращения 06.09.2021).

2. Иванов М.Ф., Колосов А.А. Борьба с борщевиком Сосновского в Новгородской области // *Защита и карантин растений*. 2012. № 10. С. 26-27.

3. Андреева Л.В., Ульянова А.А. Борьба с борщевиком Сосновского в Новгородской области и извлечение из него полезных веществ / Глобальные вызовы и региональное развитие в зеркале социологических измерений. Материалы V Международной научно-практической интернет-конференции (Вологда, 23–27 марта 2020 г.). Вологда: ФГБУН ВолНЦ РАН 2020. Ч.2. С. 14-17.

4. Фомин Дм. С., Фомин Д.С. Борщевик Сосновского (Heracleum Sosnowskyi Manden) – инвазивное сорное растение как экологическое бедствие на территории Пермского края / Защита растений от вредных организмов. Материалы X международной научно-практической конференции (Краснодар, 21-25 июня 2021 г.). Краснодар: КубГАУ. 2021. С. 384-386.

5. Руденок В.А., Строт Т.А., Попкова М.Ю. Влияние препаратов для борьбы с борщевиком на плодородие почвы / Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК. Материалы Международной научно-практической конференции (Ижевск, 24- 26 февраля 2021 г.). Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. 2021. С. 151-152.

6. Руденок В.А., Строт Т.А. Метод массовой борьбы с борщевиком / Научные инновации в развитии лесной отрасли. Материалы Национальной научно-практической конференции (Ижевск, 2-3 декабря 2020 г.). Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2021. С. 116-121.

7. Мержвинский Л.М., Высоцкий Ю.И. Анализ эффективности мероприятий по борьбе с инвазивными видами борщевика / Наука – образованию, производству, экономике. Материалы 72-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и

аспирантов (Витебск, 2 февраля 2020 г.). Витебск: ВГУ им. П. М. Машерова. 2020. С. 70-72.

8. Антипина Г.С., Маганов И.А. Борщевик Сосновского: Апробация методов борьбы / Биологические ресурсы: изучение, использование, охрана. Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием (Вологда, 19-22 апреля 2018 г.). Вологда: ВоГУ. 2018. С. 193-198.

9. Строт Т.А., Реденок В.А. О возможных методах борьбы с борщевиком / Современному АПК – эффективные технологии. Материалы Международной научно-практической конференции (Ижевск, 11-14 декабря 2018 г.). Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. 2019. Т. 1. С. 417-420.

10. Антипина Г.С., Маганов И.А. Термическое воздействие как метод борьбы с борщевиком Сосновского // Hortus Botanicus. 2018. Т. 13. С. 67-77.

11 Кудрявцев Н.А., Погорелая Л.Д. Уничтожение борщевика Сосновского с помощью гербицидов Ленок и Анкор-85 // Земледелие. 2010. № 5. С. 44-45.

12. Моренко К.С., Доржиев С.С., Базарова Е.Г. Методика учета растительной массы борщевика Сосновского // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 3 (36). С. 107-111.

13. Далькэ И.В., Захожий И.Г., Чадин И.Ф. Распространение борщевика Сосновского и мероприятия по его ликвидации на территории МО ГО «Сыктывкар» (Республика Коми) // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2018. № 3 (205). С. 2-13.

14. Далькэ И.В., Чадин И.Ф., Малышев Р.В., Захожий И.Г., Тишин Д.В., Харевский А.А., Солод Е.Г., Шайкина М.Н., Попова М.Ю., Полюдченков И.П., Тагунова И.И., Лязев П.А., Беляева А.В. Морозоустойчивость борщевика Сосновского по результатам лабораторных и полевых экспериментов // Российский журнал биологических инвазий. 2019. Т. 12. № 4. С. 12-26.

15. Далькэ И.В., Чадин И.Ф., Захожий И.Г. Анализ мероприятий по ликвидации нежелательных зарослей борщевика Сосновского (Heracleum Sosnowskyi Manden) на территории Российской Федерации //Российский журнал биологических инвазий. 2018. Т 11. № 3. С. 44-61.

16. Добринов А.В., Трифанов А.В., Чугунов С.В. Разработка технологических приёмов по борьбе с борщевиком Сосновского // АгроЭкоИнженерия, 2020. № 4 (105). С. 126-139.

17. Dobrinov A.V., Trifanov A.V., Chugunov S.V. Analysis and estimate of efficiency of technological methods for the destruction of Sosnowsky hogweed in the North-West region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021: 032087 (In English) DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032087.

18. Джабборов Н.И., Добринов А.В. Выбор технологии и технических средств восстановления залежных земель в зависимости от степени засоренности в условиях повышенного увлажнения // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4 (105). С. 30-48.

19. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Sergeev A.V., Shamonin V.I., Perekopsky A.N. Selection of operating modes of tillage implement with ring working tools by criteria of quality and energy inputs. E3S Web of Conferences. DAIC 2020. 2020. Vol. 222: 01019. DOI: 10.1051/e3sconf/202022201019.

20. Шамонин В.И., Джабборов Н.И. Результаты экспериментальных исследований почвообрабатывающего агрегата УКПА-2,4 с кольцевыми рабочими органами // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2020. № 1 (102). С. 55-63.

21. Dalke I., Malyshev R., Maslova S. Growth of Heracleum sosnowskyi Manden plant in indoor conditions after end of vegetation period (Version 0.1). Zenodo. 2018. DOI: 10.5281/zenodo.1244757

REFERENCES

1. Regiony SZFO sformiruyut programmy bor'by s borshchevikom Sosnovskogo [Regions of the North-western Federal District will elaborate programs for the Sosnovsky's hogweed control]. Available at: https://finance.rambler.ru/other/43235195-regiony-szfo-sformiruyut-programmy-borby-s-borschevikom-sosnovskogo/ (accessed 06.09.2021) (In Russian)

2. Ivanov M.F., Kolosov A.A. Bor'ba s borshchevikom Sosnovskogo v Novgorodskoi oblasti [The Sosnovsky's hogweed control in the Novgorod Region]. Zashchita i karantin rastenii. 2012. No. 10: 26-27 (In Russian)

3. Andreeva L.V., Ulyanova A.A. Bor'ba s borshchevikom Sosnovskogo v Novgorodskoi oblasti i izvlechenie iz nego poleznykh veshchestv [The Sosnovsky's hogweed control in the Novgorod Region and extracting useful substances from it]. In: Global'nye vyzovy i regional'noe razvitie v zerkale sotsiologicheskikh izmerenii [Global challenges and regional development in the mirror of sociological dimensions]. Proc. V Int. Sci. Prac. Internet Conf. (Vologda, 23-27 March 2020). Vologda: FGBUN VolNTs RAN. 2020. Part 2: 14-17 (In Russian)

4. Fomin Dm. S., Fomin D.S. Borshchevik Sosnovskogo (Heracleum Sosnovskiy Manden) – invazivnoe sornoe rastenie kak ekologicheskoe bedstvie na territorii Permskogo kraya [Sosnovsky's hogweed (Heracleum sosnowskyi Manden) – invasive weed plant as an ecological disaster in Permskij kraj]. In: Zashchita rastenii ot vrednykh organizmov [Crop protection against hazardous organisms]. Proc. X Int. Sci. Prac. Conf. (Krasnodar, 21-25 June 2021). Krasnodar: KubGAU. 2021: 384-386 (In Russian)

5. Rudenok V.A., Strot T.A., Popkova M.Yu. Vliyanie preparatov dlya bor'by s borshchevikom na plodorodie pochvy [Influence of hogweed control preparations on soil fertility]. In: Tekhnologicheskie trendy ustoichivogo funktsionirovaniya i razvitiya APK [Technological trends in the sustainable functioning and development of the agro-industrial complex]. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Izhevsk, 24-26 February 2021). Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy. 2021: 151-152 (In Russian)

6. Rudenok V.A., Strot T.A. Metod massovoi bor'by s borshchevikom [Method of large-scale control of hogweed]. In: Nauchnye innovatsii v razvitii lesnoi otrasli [Scientific innovations in the development of the forest industry]. Proc. Nat. Sci. Prac. Conf. (Izhevsk, 2-3 December 2020). Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2021: 116-121 (In Russian)

7. Merzhvinskii L.M., Vysotskii Yu.I. Analiz effektivnosti meropriyatii po bor'be s invazivnymi vidami borshchevika [Analysis of the effectiveness of measures for invasive hogweed species control]. In: Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike [Contribution of science to education, production, and economy]. Proc. 72th Reg. Sci. Prac. Conf. (Vitebsk, 2 February 2020). Vitebsk: Vitebsk State Univ. named after P. M. Masherov. 2020: 70-72 (In Russian).

8. Antipina G.S., Maganov I.A. Borshchevik Sosnovskogo: Aprobatsiya metodov bor'by [Sosnovsky's hogweed: Testing of control methods]. In: Biologicheskie resursy: izuchenie, ispol'zovanie, okhrana [Biological resources: study, use, protection]. Proc. IV All-Russian Sci. Conf. with Int. Part. (Vologda, 19-

22 April 2018). Vologda: VoGU. 2018: 193-198 (In Russian)

9. Strot T.A., Redenok V.A. O vozmozhnykh metodakh bor'by s borshchevikom [On potential methods of hogweed control]. In: Sovremennomu APK – effektivnye tekhnologii [Effective technologies to modern agro-industrial complex]. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Izhevsk, 11-14 December 2018). Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy. 2019. Vol. 1: 417-420 (In Russian)

10. Antipina G.S., Maganov I.A. Termicheskoe vozdeistvie kak metod bor'by s borshchevikom Sosnovskogo [Thermal treatment as a method of controlling Heracleum Sosnowskyi]. Hortus Botanicus. 2018. Vol. 13: 67-77 (In Russian)

11. Kudryavtsev N.A., Pogorelaya L.D. Unichtozhenie borshchevika Sosnovskogo s pomoshch'yu gerbitsidov Lenok i Ankor-85 [Ravage of the Sosnovsky Cow-Parsnip with the help of the herbicides Lenok and Ankor-85]. Zemledelie. 2010. No. 5: 44-45 (In Russian)

12. Morenko K.S., Dorzhiev S.S., Bazarova E.G. Metodika ucheta rastitel'noi massy borshchevika Sosnovskogo [Method of accounting of the Heracleum Sosnowskyi plant mass]. Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2019. No. 3 (36): 107-111 (In Russian)

13. Dalke I.V., Zakhozhiy I.G., Chadin I.F. Rasprostranenie borshchevika Sosnovskogo i meropriyatiya po ego likvidatsii na territorii MO GO «Syktyvkar» (Respublika Komi) [Distribution of Heracleum Sosnowskyi on the territory of the Syktyvkar City (Komi Republic, Russia) and management of the invasion by the city administration]. Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN. 2018. No. 3 (205): 2-13 (In Russian)

14. Dalke I.V., Chadin I.F., Malyshev R.V., Zakhozhiy I.G., Tishin D.V., Kharevsky A.A., Solod E.G., Shaikina M.N., Popova M.Yu., Polyudchenkov I.P., Tagunova I.I., Lyazev P.A., Belyaeva A.V. Morozoustoichivost' borshchevika Sosnovskogo po rezul'tatam laboratornykh i polevykh eksperimentov [Heracleum Sosnowsкyi frost-resistance in laboratory and field experiments]. Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii. 2019. Vol. 12. No. 4: 12-26 (In Russian)

15. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhozhiy I.G. Analiz meropriyatii po likvidatsii nezhelatel'nykh zaroslei borshchevika Sosnovskogo (Heracleum Sosnowskyi Manden) na territorii Rossiiskoi Federatsii [Analysis of management activities on control of Sosnovsky’s hogweed (Heracleum Sosnowskyi Manden) invasion on the territory of the Russian Federation]. Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii. 2018. Vol. 11. No. 3: 44-61. (In Russian)

16. Dobrinov A.V., Trifanov A.V., Chugunov S.V. Razrabotka tekhnologicheskikh priemov po bor'be s borshchevikom Sosnovskogo [Development of technological methods for fighting Sosnovsky’s hogweed]. AgroEkoInzheneriya, 2020. No. 4 (105): 126-139 (In Russian)

17. Dobrinov A.V., Trifanov A.V., Chugunov S.V. Analysis and estimate of efficiency of technological methods for the destruction of the Sosnovsky’s hogweed in the North-West region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021: 032087 (In English) DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032087.

18. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Vybor tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv vosstanovleniya zalezhnykh zemel' v zavisimosti ot stepeni zasorennosti v usloviyakh povyshennogo uvlazhneniya [The choice of technology, machines and equipment for rehabilitation of long fallow lands depending on their overgrowing degree with shrubs and weeds in a humid environment]. AgroEkoInzheneriya. 2020. No. 4 (105): 30-48 (In Russian)

19. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Sergeev A.V., Shamonin V.I., Perekopsky A.N. Selection of operating modes of tillage implement with ring working tools by criteria of quality and energy inputs. E3S Web of

Conferences. DAIC 2020. 2020. Vol. 222: 01019. (In English) DOI: 10.1051/e3sconf/202022201019.

20. Shamonin V.I., Dzhabborov N.I. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovanii pochvoobrabatyvayushchego agregata UKPA-2,4 s kol'tsevymi rabochimi organami [Experimental study of the soil cultivating unit UKPA-2.4 with ring-shaped tools]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2020. No. 1 (102): 55-63 (In Russian)

21. Dalke I., Malyshev R., Maslova S. Growth of Heracleum sosnowskyi Manden plant in indoor conditions after end of vegetation period (Version 0.1). Zenodo. 2018. DOI: 10.5281/zenodo.1244757

УДК 631.361 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

А.Ю. Исупов[1], канд. техн. наук;
И.И. Иванов[2];
Ю.А. Плотникова[2], канд. физ-мат. наук;
А.И. Сухопаров[3], канд. техн. наук

[1] ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», г. Киров, Россия

[2] ФГОБУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина», г. Вологда, Россия

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

В статье представлена конструкция измельчающего устройства для зерна роторно-центробежного типа и рассмотрено влияние его конструктивных параметров на выходные параметры, характеризующие его работу. Измельчение зерна на данной установке осуществляется между двумя смежными дисками – верхним (статор) с ножами и нижним (ротор) с кольцевыми выступами для измельчения зерна. Разработанная конструкция требует совершенствования ряда конструктивных и кинематических параметров с целью снижение удельной энергоёмкости процесса измельчения фуражного зерна и повышение однородности гранулометрического состава готового продукта. Для решения поставленной задачи был поставлен многофакторный эксперимент при измельчении ячменя. В качестве варьируемых на двух уровнях факторов принимались подача зернового материала, частота вращения ротора, открытие сепарирующей поверхности, число ножей на внутреннем и внешнем кольце. В качестве выходных параметров, характеризующих работу центробежно-роторного измельчителя, принимались – потребляемая при измельчении зерна электроэнергия, производительность установки и соответствие получаемого продукта зоотехническим требованиям. В результате обработки массива данных получены адекватные и достоверные

математические модели, в результате анализа моделей установлена степень влияния рассматриваемых пяти факторов на выходные показатели. Так выявлено, что увеличению энергопотребления способствует в наибольшей степени увеличение подачи зерна, увеличению производительности – уменьшение числа оборотов нижнего диска, увеличению содержания пылевидной фракции – увеличение подачи и величины открытия сепарирующей поверхности на верхнем диске, увеличению содержания частиц диаметром более 3 мм – увеличение количества ножей на внутреннем кольце верхнего диска.

Ключевые слова: измельчение зерна, ротор, нож, модель, энергозатраты, качество помола

Для цитирования: Исупов А.Ю., Иванов И.И., Плотникова Ю.А., Сухопаров А.И. исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.90-99

INVESTIGATION OF A GRAIN ROTARY CENTRIFUGAL GRINDER PERFORMANCE

A.Yu. Isupov[1], Cand Sc. (Engineering);
I.I. Ivanov[2];
Yu. A. Plotnikova[2],
Cand. Sc (Physics and Mathematics);
A.I. Sukhoparov[3], Cand Sc. (Engineering)

[1]Federal State Budget Scientific Institution “Federal Agricultural Research Centre of the North-East named after N. V. Rudnitsky”, Kirov, Russia
[2]Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, Vologda, Russia
[3]Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

The article presents the design of a rotary centrifugal grain grinding device and considers the influence of its design parameters on the output variables, which characterise its performance. The grain is ground between two adjacent discs of the device – the upper disc (stator) with knives and the lower disc (rotor) with annular protrusions for grain grinding. The developed design requires the improvement of some design and kinematic parameters to reduce the specific energy consumption during feed grain grinding and to increase the uniformity of the granulometric composition of the ready product. To meet the target, a multifactorial experiment was set up on barley grinding. The grain material supply, the rotor speed, the opening of the separating surface, the number of knives on the inner and outer rings were taken as factors varied at two levels. The electrical energy inputs for grain grinding, the throughput of the device and the ready product compliance with the zoo-technical requirements were taken as the output variables characterizing the rotary grinder performance. Adequate and reliable mathematical models were obtained as a result of the data array analysis; the models allowed to establish the effects of the five factors under consideration on the output variables. This way it was revealed that the increase in energy consumption was promoted to the greatest extent by an increase in the grain supply; an increase in the throughput – by a decrease in the number of revolutions of the lower disc; an increase in the dust-like fraction content – by an increase in the grain supply and the opening of the separating surface on the upper disc; an increase in the content of particles with a diameter of above 3 mm – by an increase in the number of knives on the inner ring of the upper disc.

Key words: grain grinding, rotor, knife, model, energy inputs, grinding quality

For citation: Isupov A.Yu., Ivanov I.I., Plotnikova Yu.A., Sukhoparov A.I. Investigation of a grain rotary centrifugal grinder performance. *AgroEkoInzheneriya.* 2021. No. 3(108): 90-99(In Russian)

Введение

В себестоимости продукции животноводства весомая доля приходиться на корма из фуражного зерна. Поэтому, чем меньше затрат приходиться на корма, идущие на корм сельскохозяйственным животным, которые обладают высокой энергетической ценностью и усвояемостью животными, и при этом являются собственного производства, тем выше будет рентабельность отрасли животноводства и, в целом, выше конкурентоспособность сельскохозяйственного предприятия. В связи с этим внедрение в производство новых технико-технологических решений, одним из которых является совершенствование конструктивных параметров машин для приготовления кормов является важной задачей.

Из общего количества фуражного зерна выращенного в сельскохозяйственных предприятиях, убранного в фазу полной спелости, только половина поступает в переработку на комбикорма, остальная же часть скармливается в измельченном виде. Независимо от вида корма, предназначенного для скармливания сельскохозяйственным животным, его необходимо приготавливать в соответствии с зоотехническими требованиями. При механическом способе приготовления кормов из зерна самым распространенным и обязательным является измельчение. При размоле, дроблении и плющении зерна разрушается твердая оболочка, питательные вещества становятся более доступными, что облегчает усвояемость их организмом животного, в результате чего корм имеет более высокий коэффициент отдачи и сопровождается, в результате, более высокой эффективностью вложенных средств.

Измельчение является наиболее энергоемкой и трудоемкой операцией, занимающей более 50% от общих энерго- и трудозатрат в приготовлении комбикормов [1]. Технические решения, направленные на повышение производительности измельчающих машин при одновременном снижении энергозатрат на обмолот, сопровождается получением готового корма со значительным содержанием недоизмельченной фракции. В связи с этим, совершенствование существующих конструкций измельчителей зерна и оптимизацией их режимов работы является актуальной задачей.

Решение поисковых задач относительно более совершенных способов измельчения фуражного зерна и их реализации сопровождается предложением оригинальных конструкторско-технических решений, воплощаемых в новых конструкциях измельчителей зерна [1-4]. Проведенный обзор научно-технической и патентной литературы по исследуемой проблеме показал, что существующие измельчители зерна имеют ряд недостатков, основные из которых: высокая метало- и энергоемкость, получаемый измельчённый продукт обладает существенной неравномерностью гранулометрического состава (большой процент пылевидной фракции или же крупной фракции), ускоренное изнашивание рабочих органов, существенное повышение температуры измельчённого зерна. Для устранения приведённых недостатков предложена конструкция измельчителя зерна

роторно-центробежного типа, где движение зерна при измельчении происходит по осесимметричной вращающейся криволинейной поверхности с вертикальной осью вращения [4-6].

Целью исследований является сокращение энергозатрат на технологический процесс измельчения зерна и повышение качественных показателей готового продукта путём совершенствования конструктивных параметров центробежно-роторного измельчителя.

Материалы и методы

Практический интерес для измельчения зерна, представляют конструкции измельчителей работающие в пограничной области, совмещающие процесс измельчения скалыванием и срезом со своевременным выводом готового продукта [1, 4]. По результатам теоретических исследований предложена конструкция измельчителя зерна центробежно-роторного типа [7-9], принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

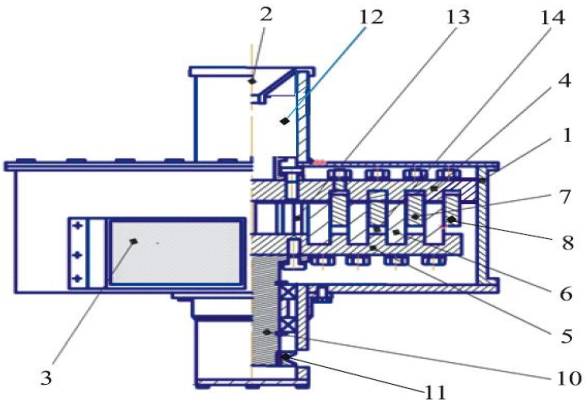


Рис. 1. Схема измельчителя зерна роторно-центробежного типа:
1 - корпус; 2 - загрузочный патрубок; 3 - выходной патрубок; 4 - верхний диск (статор); 5 - нижний диск (ротор); 6 - кольцевые выступы; 7 - ножи; 8 - наружный ряд ножей; 9 - сквозные пазы; 10 - приводной вал; 11 - шкив; 12 - приемная камера; 13 - радиальные окна; 14 - рабочая камера

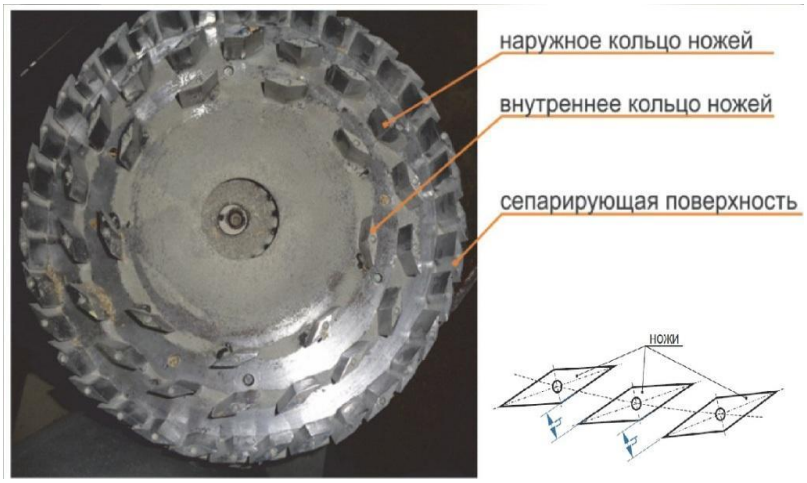


Рис. 2. Общий вид верхнего диска измельчителя с сепарирующей поверхностью и установленными ножами и схема контроля открытия сепарирующей поверхности

В ходе проведения исследования в качестве исходного зернового материала использовался яровой ячмень кондиционной влажности.

Регулировка подачи зерна в устройство x_1 осуществлялась за счет изменения частоты вращения вала электродвигателя лопастного питателя. Частота вращения ротора x_2 регулировалась за счет изменения частоты вращения электродвигателя частотным преобразователем. Открытие сепарирующей поверхности x_3 — за счет выставления соответствующего размера между параллельными плоскостями двух рядом расположенных ножей на внешнем кольце 9 (см. рис. 1 и 2). Число ножей на внутреннем x_4 и наружном кольце x_5 — в результате добавления или удаления таковых.

Планирование эксперимента проводилось с помощью матрицы Бокса-Бенкина. Для сокращения объема, проводимых исследований использовалась матрица дробного факторного эксперимента типа 2^{5-2}. Матрица планирования эксперимента и результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований работы измельчителя роторно-центробежного типа

№ опыта	Факторы					Выходные показатели			
	Подача зерна, q, Гц питателя	Частота вращения ротора, n, с$^{-1}$	Величина открытия сепарирующей поверхности, h, мм	Число ножей на внутреннем кольце, $n_{нв}$	Число ножей на внешнем кольце, $n_{нв}$	Потребляемая мощность, кВт	Пропускная способность, Q, кг/мин	Содержание пылевидной фракции, m_2, %	Остаток на сите – 3мм, m_2, %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3	y_4
1	30	800	3,2	9	9	1,80	0,75	8,78	8,52
2	60	1200	3,2	9	9	3,00	1,51	11,54	6,50
3	60	800	3,2	3	9	5,16	1,16	18,1	6,59
4	30	1200	3,2	3	9	2,43	0,79	14,95	7,65
5	60	800	3,2	9	18	3,33	0,64	12,29	7,38
6	30	1200	3,2	9	18	3,60	1,01	17,04	5,73
7	30	800	2,5	3	9	1,95	0,71	12,34	4,60
8	60	1200	2,5	3	9	4,02	1,59	16,80	4,72
9	60	800	2,5	9	9	2,70	1,46	7,83	20,71
10	30	1200	2,5	9	9	1,83	0,84	8,08	16,63
11	30	800	3,2	3	18	2,49	0,73	12,40	17,58

12	60	1200	3,2	3	18	3,87	1,67	13,65	3,60
13	60	800	2,5	3	18	5,94	1,19	18,88	10,08
14	30	1200	2,5	3	18	2,43	1,08	11,59	4,14
15	30	800	2,5	9	18	3,12	0,67	9,83	8,77
16	60	1200	2,5	9	18	5,07	1,57	14,78	9,44

Для анализа массива данных и построения математических моделей использовался пакет анализа данных в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Анализ зоотехнических требований, предъявляемых к концентрированным кормам для различных групп животных, позволил выделить несколько основных критериев для оценки качества получаемого продукта. Это крупность помола, процентное содержанию в помоле частиц более 3 мм и наличие в помоле целых зерен. Однако результаты рассева на вибросите отобранных проб показали, что наиболее критичным параметром для получаемого продукта является содержание в помоле частиц более 3 мм. При этом наличие целых зерен и модуль помола не рассматривались в виду того что, в рассеве не наблюдалось целых зерен, а значение модуля соответствовало грубому помолу. При этом стоит отметить, что модуль помола в большой степени зависел от содержания частиц более 3 мм, так, например, их содержание варьировалось в диапазоне от 0,4 до 60,8%

Была осуществлена обработка экспериментальных данных из таблицы 1 в Microsoft Excel. Были получены модели в виде уравнений регрессии (1-4) и осуществлён их анализ на достоверность (см табл. 2).

$$y_1 = -12,85 + 0,284x_1 + 4,318x_3 - 0,485x_4 + 0,552x_5 - 0,00006x_1x_2 - 0,04x_1x_3 -$$

$$-0,008x_1x_4 + 0,0005x_2x_4 - 0,2048x_3x_5 + 0,0214x_4x_5 \quad (1)$$

$$y_2 = 0,742 + 0,042x_1 - 0,0029x_2 + 0,1578x_4 - 0,032x_5 - 0,0105x_1x_3 - 0,005x_1x_4 - 0,0009x_1x_5 +$$

$$+0,0005x_2x_3 + 0,0001x_2x_5 - 0,027x_2x_4 - 0,005x_4x_5 . \quad (2)$$

$$y_3 = -7,98 + 0,851x_1 + 8,05x_3 - 4,706x_4 - 0,0002x_1x_2 - 0,167x_1x_3 - 0,0187x_1x_4 +$$

$$+0,0018x_2x_4 + 0,573x_3x_4 - 0,1799x_3x_5 + 0,1123x_4x_5 . \quad (3)$$

$$y_4 = -56,32 + 0,87x_1 + 18,15x_2 + 9,328x_4 - 0,312x_1x_3 - 0,00067x_2x_5 -$$

$$-2,339x_3x_4 + 0,53x_3x_5 - 0,159x_4x_5 . \quad (4)$$

Таблица 2

Показатели достоверности моделей

Вывод итогов	y_1	y_2	y_3	y_4
Множественный R	0,996812151	0,999658	0,995507	0,939077
R-квадрат	0,993634465	0,999316	0,991034	0,881866
Нормированный R-квадрат	0,980903396	0,996582	0,973101	0,746856
Стандартная ошибка	0,172532606	0,021698	0,573001	2,55956
F	78,48	365,5	55,263	6,53
Значимость F	0,0000745	0,00021	0,00017	0,0113

По выведенным итогам сделан вывод, что коэффициенты уравнений регрессии значимы на 5% уровне; математические модели (1-4) обусловлены вариацией выбранных факторов, являются статистически значимыми и не могут описать происходящие процессы лишь на 5%-м уровне. При анализе внимание обращалось на нормированный R-квадрат, результаты теста Фишера, t-статистику, p-значение (значимость) для каждого коэффициента уравнения [10, 11]. Нормированный R-квадрат в отличие от R-квадрат может уменьшаться при введении в модель новых объясняющих переменных, не оказывающих существенное влияние на зависимую переменную, R-квадрат же может увеличиваться при добавлении новых объясняющих переменных, хотя это и не обязательно означает улучшение качества регрессионной модели. Приведем уравнения регрессии (1-4) и таблицу 2 с основными показателями для каждого из результатов y_1, y_2, y_3, y_4 1.

Проведя анализ моделей регрессии потребления электроэнергии (1), производительности (2), а также содержания пылевидной фракции (3) и содержания в готовом продукте частиц более 3 мм (4), через инструментарий «Поиск решения», выявили оптимальные значения факторов при условии минимизации энергопотребления, увеличения пропускной способности, уменьшения содержания пылевой фракции и остатка на сите: x_1=30 Гц питателя, x_2=1200 с$^{-1}$, x_3=2,5 мм, x_4=3 шт., x_5=18 шт. Средние прогнозируемые значения результатов при данных значениях факторов: y_1=2,80 кВт, y_2=0,60 кг/мин, y_3=10,89%, y_4=2,99% на уровне значимости 95%. Достижение отдельных результатов в сравнении с оптимальными значениями для каждого из результатов по отдельности составляет 43%, 70%, 100% и 87%, соответственно, общее достижение результатов равно 75%.

Выводы

1. Наиболее значительное влияние на энергопотребление y_1 оказывает фактор x_1, затем факторы x_3 и x_5. Увеличение подачи зерна x_1 увеличивает расход электроэнергии y_1, увеличение величины открытия x_3 и

уменьшение числа ножей на внешнем кольце x_5 приводит к уменьшению расхода электроэнергии y_1.

2. Наиболее значительное влияние на пропускающую способность y_2 оказывает фактор x_2, затем факторы x_1 и x_4. Увеличение числа оборотов x_2 и числа ножей на внутреннем кольце x_4 приводит к уменьшению пропускной способности y_2, увеличение подачи зерна x_1приводит к увеличению пропускной способности y_2.

3. Наиболее значительное влияние на процент содержания пылевидной фракции y_3 оказывают факторы x_1 и x_4, затем фактор x_3. Увеличение подачи зерна x_1 и величины открытия x_3 увеличивает процент содержания пылевидной фракции y_3, увеличение числа ножей на внутреннем кольце x_4 приводит к уменьшению процента содержания пылевидной фракции y_3.

4. Наиболее значительное влияние на процент содержания частиц диаметром более 3 мм y_4 оказывает фактор x_4, затем факторы x_1 и x_3. Увеличение числа ножей на внутреннем кольце x_4, подачи зерна x_1 и увеличение открытия сепарирующей поверхности x_3 увеличивает содержания частиц диаметром более 3 мм.

5. Фактором значимо влияющим на все результаты, является фактор подачи зерна x_1. Факторов, которые можно было бы исключить из рассмотрения, нет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сергеев Н.С. Разработка и обоснование основных параметров измельчителя фуражного зерна центробежного типа / Автореф. дисс. канд. техн. наук. Челябинск, 1989. 19 с.

2. Шагдыров И.Б. Обоснование параметров многоступенчатой дробилки фуражного зерна / Дисс. канд. техн. наук. Челябинск, 1988. 220 с.

3. Мельников, С.В., Вагин Б.И., Андреев П.А. и др. Механизация животноводческих ферм. М.: «Колос», 1969. 440 с.

4. Савиных П.А., Саитов В.Е., Сухляев В.А., Иванов И.И., Палицын А.В., Кузнецов. Н.Н. Устройство для измельчения сыпучих материалов / Патент на изобретение RU № 2656619, 06.06.2018.

5. Палицын А.В., Иванов И.И. Разработка и поисковые результаты исследований измельчителя роторно-центробежного типа фуражного зерна для крестьянских хозяйств / Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения: материалы Междунар. научно-практ. конф. Йошкар-Ола: МарГУ, 2017. Вып. 19. С. 284-289.

6. Сухопаров А.И., Иванов И.И., Плотникова Ю.А. Определение скорости и траектории движения частиц при проектировании роторно-центробежных измельчителей // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства, 2020. №1 (102). С. 63-72.

7. Иванов И.И., Палицын А.В., Савиных П.А. Теоретические и практические аспекты исследования экспериментального измельчителя фуражного зерна роторно-центробежного типа // Агроэкологические и организационно-экономические аспекты создания и эффективного функционирования экологических стабильных территорий: материалы Всероссийской научно-практ. конф. Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2017. С. 65-71.

8. Савиных П.А., Палицын А.В., Иванов И.И. Исследование измельчителя фуражного зерна роторно-центробежного типа с различными рабочими органами // Молочнохозяйственный вестник, 2017. №2 (26). С.119-129.

9. Сухопаров А.И., Иванов И.И., Плотникова Ю.А. Моделирование движения частицы в рабочей области центробежно-роторного измельчителя // Известия СПбГАУ, 2019. №57. С. 240-249.

10. Плотников М.Г., Плотникова Ю.А. Математика. Часть 2 / Вологда-Молочное: Вологодская государственная молочнохозяйственная академия, 2019. 206 с.

11. Плотников, М.Г. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Вологда-Молочное: Вологодская государственная молочнохозяйственная академия, 2015. 222 с.

REFERENCES

1. Sergeev N.S. Razrabotka i obosnovanie osnovnykh parametrov izmel'chitelya furazhnogo zerna tsentrobezhnogo tipa / Avtoref. diss. kand. tekhn. Nauk [Development and substantiation of the main parameters of a centrifugal feed grain grinder / Author's abstract of Cand. Sc.(Engineering) Thesis]. Chelyabinsk, 1989. 19 p. (In Russian)

2. Shagdyrov I.B. Obosnovanie parametrov mnogostupenchatoi drobilki furazhnogo zerna / Diss. kand. tekhn. Nauk [Substantiation of the parameters of a multistage crusher for feed grain / Cand. Sc. (Engineering) Thesis]. Chelyabinsk, 1988. 220 p. (In Russian)

3. Melnikov, S.V., Vagin B.I., Andreev P.A. et al. Mekhanizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm [Mechanisation of livestock housing facilities]. Moscow: Kolos Publ. 1969. 440 p. (In Russian)

4. Savinykh P.A., Saitov V.E., Sukhlyaev V.A., Ivanov I.I., Palitsyn A.V., Kuznetsov. N.N. Ustroistvo dlya izmel'cheniya sypuchikh materialov [Device for bulk materials crushing]. Patent on invention RU No. 2656619, 06.06.2018. (In Russian)

5. Palitsyn A.V., Ivanov I.I. Razrabotka i poiskovye rezul'taty issledovanii izmel'chitelya rotorno-tsentrobezhnogo tipa furazhnogo zerna dlya krest'yanskikh khozyaistv [Development and prospect-level survey results associated with a feed grain grinder of rotary-centrifugal type for peasant farms]. Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaistva [Actual problems of improving the technology of production and processing of agricultural products]. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. “Mosolovskie Readings”. Ioshkar-Ola: MarGU, 2017. No. 19: 284-289 (In Russian)

6. Sukhoparov A.I., Ivanov I.I., Plotnikova Yu.A. Opredelenie skorosti i traektorii dvizheniya chastits pri proektirovanii rotorno-tsentrobezhnykh izmel'chitelei [Determining velocity and trajectory of particles when designing rotary centrifugal crushers]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva, 2020. No.1 (102): 63-72 (In Russian)

7. Ivanov I.I., Palitsyn A.V., Savinykh P.A. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty issledovaniya eksperimental'nogo izmel'chitelya furazhnogo zerna rotorno-tsentrobezhnogo tipa [Theoretical and practical aspects of the study of an experimental rotary-centrifugal feed grain grinder]. Agroekologicheskie i organizatsionno-ekonomicheskie aspekty sozdaniya i effektivnogo funktsionirovaniya ekologicheskikh stabil'nykh territorii. [Agro-ecological, organizational and economic aspects of creation and effective functioning of ecologically sustainable territories. Proc. All-Russian Sci. Prac. Conf.] Cheboksary: Chuvashskaya State Agricultural Academy, 2017: 65-71(In Russian)

8. Savinykh P.A., Palitsyn A.V., Ivanov I.I. Issledovanie izmel'chitelya furazhnogo zerna rotorno-tsentrobezhnogo tipa s razlichnymi rabochimi organami [Study of a fodder grain grinder of rotary centrifugal type with various working items]. Molochnokhozyaistvennyi vestnik, 2017. №2 (26): 119-129 (In Russian)

9. Sukhoparov A.I., Ivanov I.I., Plotnikova Yu.A. Modelirovanie dvizheniya chastitsy v rabochei oblasti tsentrobezhno-rotornogo izmel'chitelya [Modeling of particle motion in the working area of a centrifugal rotary grinder]. Izvestiya SPbGAU, 2019. No. 57: 240-249 (In Russian)

10. Plotnikov M.G., Plotnikova Yu.A. Matematika. Chast' 2 [Mathematics, Part 2]. Vologda-Molochnoe: Vologodskaya gosudarstvennaya molochnokhozyaistvennaya akademiya, 2019: 206 p. (In Russian)

11. Plotnikov, M.G. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie [Probability theory and mathematical statistics: a tutorial]. Vologda-Molochnoe: Vologodskaya gosudarstvennaya molochnokhozyaistvennaya akademiya, 2015: 222 p. (In Russian)

УДК 631.316.2:633.2-633.4 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-99-110**

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Н.И. Джабборов, д-р техн. наук; В.И. Шамонин, канд. техн. наук
А.В. Добринов, канд. техн. наук;

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

В статье представлены результаты сравнительной оценки качества работы двух почвообрабатывающих машин: серийно выпускаемого культиватора Kombi 3 (UNIA Group, Польша) и агрегата УКПА-2,4-4 с дисково-кольцевыми рабочими органами, разработанного в ИАЭП - филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. При проведении исследований были определены агротехнические показатели качества работы машин при поверхностной обработке почвы под посев свёклы и беспокровный посев трав. Экспериментально установлено, что при агрегатировании машин с трактором тягового класса 1.4 УКПА-2,4-4 превосходит Kombi 3 по основным показателям качества выполнения технологического процесса предпосевной обработки почвы. УКПА-2,4-4 обеспечил полное уничтожение сорных растений, при том, что эффективность уничтожения сорняков Kombi 3 составила 85-90 %. Степень крошения почвы при работе УКПА-2,4-4 составила 90,3 %, а при применении Kombi 3 – не более 84 %.

Ключевые слова: предпосевная обработка почвы, почвообрабатывающий агрегат, дисково-кольцевой рабочий орган, крошение почвы, уничтожение сорняков.

Для цитирования: Джабборов Н.И., Добринов А.В., Шамонин В.И. Сравнительная оценка качества работы почвообрабатывающих агрегатов // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. № 3(108). С. 99-111

WORK QUALITY ASSESSMENT OF TILLAGE IMPLEMENTS

N.I. Dzhabborov, DSc (Engineering), V.I. Shamonin, Cand. Sc. (Engineering)
A.V. Dobrinov, Cand. Sc. (Engineering)

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

The article presents the results of a comparative work quality assessment of two tillage machines: a commercially available Kombi 3 cultivator (UNIA Group, Poland) and a UKPA-2.4-4 implement with disc and ring-shaped tools designed at IEEP - branch of FSAC VIM. The study identified the agro-technical indicators of the work quality of these machines on the surface soil tillage for sowing beets and coverless sowing of grasses. The experiments established that when the machines were teamed with a tractor of 1.4 drawbar category, UKPA-2.4-4 surpassed Kombi 3 in terms of major quality indicators of pre-sowing soil cultivation. UKPA-2.4-4 ensured the 100% destruction of weeds, while the weed control degree of Kombi 3 was 85-90%. UKPA-2.4-4 demonstrated 90.3% soil crumbling degree while Kombi 3 – no more than 84%.

Key words: secondary tillage, tillage implement, disc and ring-shaped tool, soil crushing, weed control

For citation: Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V. Shamonin V.I. Work quality assessment of tillage implements. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. No. 3(108): 99-111 (In Russian)

Введение

Актуальность темы настоящих исследований связана с проблемой повышения эффективности и качества предпосевной обработки почвы.

Качественная предпосевная обработка почвы создает благоприятные условия для посева семян и дружного появления всходов. В зависимости от почвенных условий и зон возделывания сельскохозяйственных культур для повышения эффективности предпосевной обработки почвы учёными продолжаются исследования по созданию новых и совершенствованию применяемых рабочих органов и машин.

Так авторами исследований [1] разработана конструкция комбинированной машины для предпосевной обработки почвы, сочетающая набор однооперационных рабочих органов, активного диска, планировочного ножа, секции кольчато-шпоровых катков. Такая компоновка рабочих органов в комбинированной машине обеспечивает качественную подготовку почвы к посеву за один проход.

В работе [2] приведены основные требования к технологическим процессам и машинам для комбинированной предпосевной обработки почвы.

В исследовании [3] разработан комбинированный агрегат на универсальной раме для основной и предпосевной обработки почвы, который может заменить четыре однооперационные почвообрабатывающие машины.

Авторами работы [4] предложена методика рационального комплектования агрегата для предпосевной обработки почвы. Методика предусматривает использование данных технической характеристики тракторов и физико-механические свойства почвы конкретных условий функционирования

комплектуемого почвообрабатывающего агрегата.

Авторы работы [5] на основе обобщения исследований пришли к выводу, что качество работы агрегатов можно повысить путём совершенствования рабочих органов. При этом, утверждается, что вибрационные машины экономичнее агрегатов с постоянно действующими усилиями.

В исследованиях [6] разработан и предложен почвообрабатывающий ротационный рабочий орган с активным приводом для предпосевной обработки почвы. Данный рабочий орган представляет собой конусовидный кольцевой обод с режущей кромкой, который установлен под определенным углом атаки к направлению движения агрегата. Установлено, что использование такого активного ротационного рабочего органа для поверхностной обработки почвы обеспечивает снижение затрат энергии на 11-14 % по сравнению с бесприводным режимом.

Результаты вероятностно-статистической оценки глубины обработки почвы ротационной почвообрабатывающей машины [7] показали, что с повышением скорости ее движения в два раза, число выбросов процесса за границы допуска увеличивается вдвое. Описанная в работе методика при ее применении в оценке качества обработки почвы позволяет улучшить качество ротационной почвообрабатывающей машины.

Исследованиями [8] установлено, что использование дополнительных функциональных элементов в конструкциях почвообрабатывающих катков с возможностью изменения режимов их работы позволит управлять факторами, влияющими на эффективность процесса за счет варьирования технологических параметров прикатывания почвы. Авторы данной работы пришли к выводу о целесообразности разработки трансформируемого комбинированного почвообрабатывающего катка, позволяющего снизить энергоемкость обработки почвы.

В работе [9] разработан почвообрабатывающий агрегат с кольцевыми рабочими органами. Установлено, что разброс почвы кольцом катка зависит от угла атаки кольца и скорости движения почвообрабатывающего агрегата.

В статье [10] представлена оценка эффективности такого агрегата в борьбе с сорными растениями, а в работе [11] дано математическое описание перемещения почвы почвообрабатывающим агрегатом в зависимости от скорости движения, диаметра кольца и угла атаки катка.

В работе [12] предложен способ совершенствования технологии управления работой почвообрабатывающих агрегатов и других мобильных технических средств для повышения эффективности их использования.

Авторами статьи разработаны научные принципы повышения и методика энергетической энергоэффективности технологических процессов и технических средств, синтеза почвообрабатывающих машин блочно-модульной структуры [13]. Реализация новых принципов позволила разработать ряд энергоэффективных почвообрабатывающих агрегатов для основной и поверхностной обработки почвы и способы повышения их настраиваемости к почвенным условиям и технологиям обработки почвы [14, 15]. Одним из таких технических средств является почвообрабатывающий агрегат с дисково-кольцевыми рабочими органами УКПА-2,4-4. Экспериментальные исследования, проведенные в 2019-2021 годах, показали возможность его

применения не только в технологических операциях восстановления необрабатываемых земель, механического уничтожения борщевика Сосновского в начальных стадиях роста и развития, но и для предпосевной обработки почвы. В этой связи возникла необходимость сравнительной оценки качества работы УКПА-2,4-4 в агрегате с трактором класса 1,4 т с однотипным почвообрабатывающим агрегатом Kombi 3 (UNIA, Польша) предназначенным также для сплошной предпосевной обработки почвы.

Материалы и методы

Объектом исследований являются технологический процесс предпосевной обработки почвыпочвообрабатывающими агрегатами УКПА-2,4-4 и Kombi 3 при агрегатировании с трактором МТЗ-82.1.

Предметом исследований являются агротехнические показатели технологического процесса предпосевной обработки почвы под посев свёклы и беспокровный посев трав для сравнительной оценки качества работы представленных машин.

Сравнительная оценка машин была проведена на территории экспериментально-производственной базы института в начале июня 2021 г. при следующих условиях: тип почвы – дерново-среднеподзолистый; почва среднесуглинистая (легкосуглинистая) на мореном суглинке; рельеф, град – 2; гребнистость поверхности поля, см – 8-10; твердость почвы до обработки в слое 5-10 см: поле, под посев свёклы: 0,91 МПа; поле под посев многолетних трав: 0,77 МПа. Влажность почвы до обработки в слое 5-10 см: поле, под посев свёклы: 12,7 %; поле под посев многолетних трав: 18,4 %.

На рисунке 1 представлен общий вид агрофона до предпосевной обработки почвы под посев свёклы (а) и под беспокровный посев трав (б).

а

б

Рис. 1. Агрофон до предпосевной обработки почвы под посев свёклы (а) и под беспокровный посев трав (б).

На рисунке 2 представлены в процессе выполнения технологической операции предпосевной обработки почвы МТА МТЗ-82.1+Kombi 3 (а) и МТЗ-82.1+УКПА-2,4-4 (б).

а б

Рис. 2. МТА МТЗ 82.1+Kombi 3 (а) и МТА МТЗ 82.1+УКПА-2,4-4 (б) в процессе работы.

Kombi 3 состоит из общей рамы, на которой спереди установлен струнный каток, в центре - пружинные зубья (SU), сзади трубчатый каток. УКПА-2,4-4 состоит из общей рамы, с установленными в 2 ряда дисково-кольцевыми рабочими органами и механизмом регулировки угла их атаки.

В процессе экспериментальных исследований были проведены измерения гребнистости полей до и после выполнения технологических операций машинами, глубины обработки почвы, количества сорных растений на единице площади, скорости движения почвообрабатывающих агрегатов, угла атаки дисково-кольцевых рабочих органов рабочих органов УКПА-2,4-4, степени крошения почвы на обработанных участках в соответствии с требованиями ГОСТов [16, 17].

На рисунке 3 представлен процесс определения степени крошения почвы. Агрегатный состав почвы (степень крошения) определяли на контрольных площадках в четырех точках – две по ходу и две в обратном направлении агрегата. Взятые пробы последовательно разделяли на фракции от 0 до 25 мм, от 25 до 50 мм и выше 50 мм. Фактическая глубина обработки определялась с помощью мерной линейки по всей диагонали участка, число повторностей не менее 30. Твердость, влажность, и агрегатный состав почвы определяется в горизонте 0-10см. Для определения влажности почвы брали навески почвы из каждого горизонта в пяти точках по диагонали выбранного зачетного участка. [16]. Твердость почвы определяли электронным пенетрологером Eijkelkamp 06.15 SA, число повторностей не менее 30. Пробы на твердость почвы брали в зоне мест определения влажности почвы.

Рис. 3. Определение степени крошения почвы весовым методом [17].

Засоренность почвы сорняками определяют на учетных площадках, равномерно расположенных на участке количественным методом [17]. Ко-личество учетных площадок не менее 5 шт. Вычисляется среднее количество сорняков на 1 м2. Степень уничтожения (подрезания) сорных растений определяется сравнением количества уничтоженных (подрезанных) и сохранившихся сорных растений в определенной площади (в рамке 1х1 м).

Экспериментальные данные обрабатывались по методике статистической обработки эмпирических данных [18].

Результаты и обсуждение

При проведении исследований с целью получения достоверных экспериментальных данных до начала выполнения технологических операций рассматриваемые почвообрабатывающие агрегаты были настроены на заданные условия работы, т.е. была произведена регулировка глубины обработки и других параметров машин, обеспечивающих качественную обработку почвы.

Ввиду того, что обрабатываемые участки имели длину гона менее 100 м при которой сложно обеспечить стабильную работу машин на высоких скоростных режимах, были проведены контрольные проходы, которые показали эффективность выполнения операции УКПА-2,4-4 в пределах рабочих скоростей 1,94-2,22 м/с с углом атаки дисково-кольцевых рабочих органов 25^0.

В этой связи, работа обоих почвообрабатывающих машин была исследована при средней скорости их движения $V_w = 2{,}17$ м/с.

На рисунке 4 представлены агрофоны после выполнения операции поверхностной обработки почвы агрегатом Kombi 3 под беспокровный посев трав (а) и под посев свёклы (б).

а б

Рис. 4. Агрофоны после выполнения операции поверхностной обработки почвы агрегатом Kombi 3 под беспокровный посев трав (а) и под посев свёклы (б).

На рисунке 5 представлены агрофоны после выполнения операции поверхностной обработки почвы агрегатом УКПА-2,4-4 под беспокровный посев трав (а) и под посев свёклы (б).

а б

Рис. 5. Агрофоны после выполнения операции поверхностной обработки почвы агрегатом УКПА-2,4-4 под беспокровный посев трав (а) и под посев свёклы (б).

Сравнительная оценка качества полученных агрофонов (рис. 4 и 5) после обработки экспериментальных данных показала, что почвообрабатывающий агрегат Kombi 3 не обеспечивает полное уничтожение сорных растений. Степень уничтожения сорных растений в среднем составляет 85-90 %. После выполнения операции предпосевной обработки почвы агрегатом формируется сплошная гребнистая поверхность от воздействия струнного и трубчатого катков. При этом средняя высота гребней составила 5-6 см.

Более ровную поверхность поля обеспечивает почвообрабатывающий агрегат УКПА-2,4-4, благодаря новой конструкции рабочих органов, выполненных в виде колец в форме усеченного конуса и расположенных под углом к направлению движения и противоположному их расположению в два ряда на раме орудия.

На рисунке 6 приведена диаграмма средних значений степени уничтожения сорных растений С почвообрабатывающими агрегатами УКПА-2,4-4 и Kombi 3 при скорости их движения $V_w = 2{,}17$ м/с.

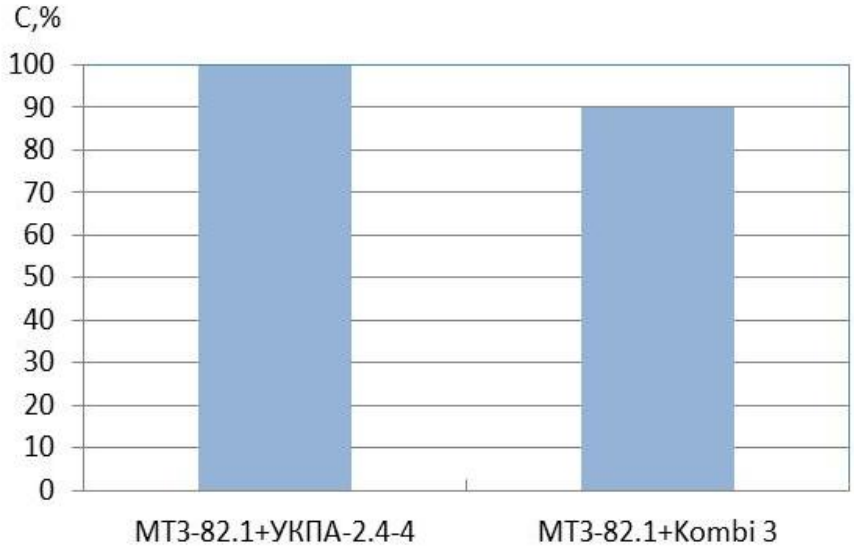


Рис. 6. Диаграмма среднего значения степени уничтожения С сорных растений МТА МТЗ-82.1+УКПА-2,4-4 и МТЗ-82.1+Kombi 3.

На рисунке 7 представлена диаграмма средних значений глубины обработки h почвы почвообрабатывающими агрегатами УКПА-2,4-4 и Kombi 3 при скорости их движения $V_w = 2{,}17$ м/с.

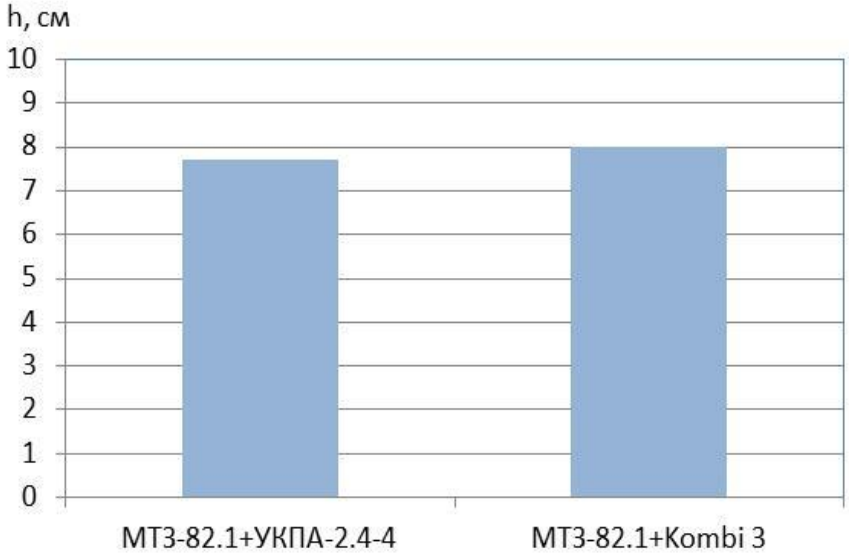


Рис. 7. Диаграмма среднего значения глубины обработки h почвы МТА МТЗ-82.1+УКПА-2,4-4 и МТЗ-82.1+Kombi 3.

На рисунке 8 даны средние значения степени крошения $К_о$ почвы при работе почвообрабатывающих агрегатов УКПА-2,4-4 и Kombi 3 при скорости их движения $V_w = 2{,}17$ м/с.

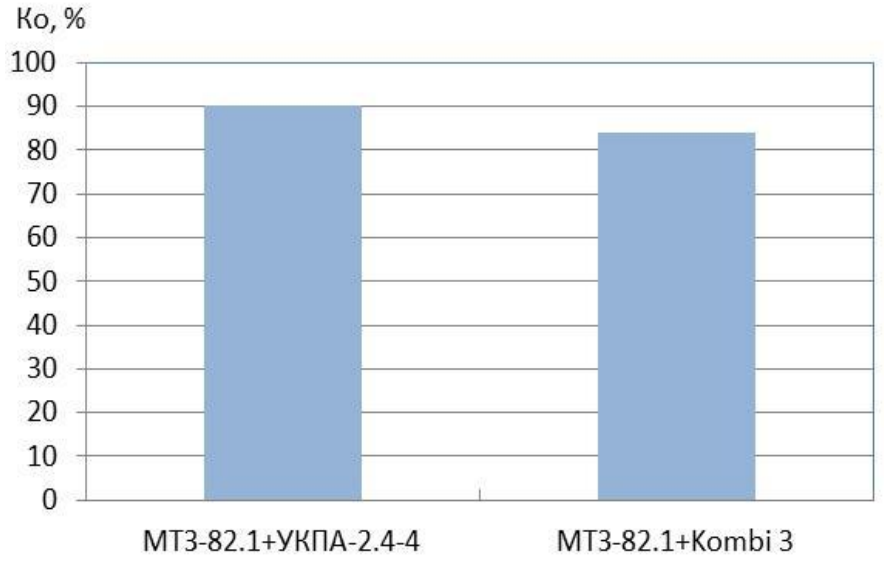


Рис. 8. Диаграмма среднего значения степени крошения $К_о$ почвы при работе МТА-МТЗ-82.1+УКПА-2,4-4 и МТЗ-82.1+Kombi 3.

На основании представленных графиков экспериментальных данных следует, что почвообрабатывающий агрегат УКПА-2,4-4 обеспечивает полное уничтожение сорных растений (рисунок 6).

Средняя глубина обработки почвы почвообрабатывающими агрегатами составила: Kombi 3 – 8,0 см; УКПА-2,4-4 – 7,7 см (рисунок 7).

Для качественного посева семян играет важную роль степень крошения почвы. Обобщение экспериментальных данных свидетельствует о том, что почвообрабатывающий агрегат УКПА-2,4-4 обеспечивает лучшее крошение почвы (90,3 %).

Степень крошения почвы в результате функционирования почвообрабатывающего агрегата Kombi 3 составила 84,0 %, что на 6,3 % ниже, чем при работе УКПА-2,4-4 (рисунок 8).

Выводы

Установленные в результате экспериментальных исследований основные показатели качества предпосевной обработки почвы в соответствии с требованиями агротехники позволили провести сравнительную оценку функционирования почвообрабатывающих машин Kombi 3 и УКПА-2,4-4 в агрегате с трактором МТЗ-82.1.

Выше изложенные результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что почвообрабатывающий агрегат УКПА-2,4-4 обеспечивает высокое качество предпосевной обработки почвы под посев свёклы и беспокровный посев трав, по сравнению с Kombi 3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башняк С.Е., Шаршак В.К., Башняк И.М. Обоснование конструкции комбинированной машины для предпосевной обработки почвы рисовых полей в условиях Ростовской области // Вестник Донского государственного

аграрного университета. 2014. № 4-1 (14). С. 140-147.

2. Жукова О. Современные технологии и техника для предпосевной обработки почвы // Техника и оборудование для села. 2010. № 12. С. 13-15.

3. Мосяков М.А., Зволинский В.Н. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат для основной и предпосевной обработки почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 6. С. 30-35.

4. Припоров Е.В., Больбат А.И. Анализ и выбор рабочих машин для предпосевной обработки почвы под посев зерновых // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 123. С. 1670-1682.

5. Зарипова Н.А., Алгазин Д.Н. Исследование снижения тягового сопротивления сеялки-культиватора // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 1 (21). С. 216-220.

6. Курач А.А., Амантаев М.А. Результаты исследования работы ротационных рабочих органов с активным приводом //Вестник Курганской ГСХА. 2013. № 4 (8). С. 77-79.

7. Панов А.И. Статистическая оценка качества работы ротационной машины для обработки почвы //Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.В. Горячкина». 2015. № 2 (66). С. 14-17.

8. Семенихина Ю.А. Использование дополнительных элементов в ротационных прикатывающих устройствах // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 4 (14). С. 157-162.

9. Яковлев Н.С., Назаров Н.Н., Нестяк В.С., Маркин В.В., Черных В.И. Оценка качества работы бороны с кольцевыми рабочими органами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 12 (158). С. 141-147.

10. Колинко П.В., Кудашкин П.И., Иванов Н.М., Голиков В.Р. Почвообрабатывающие машины для борьбы с сорной растительностью // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 2. С. 24-26.

11. Яковлев Н.С., Колинко П.В. Перемещение почвы кольцом кольчатого катка // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 3. С. 32-34.

12. Джабборов Н.И., Ахмадов Б.Р., Федькин Д.С. Методика разработки карт потока производства технологических процессов // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 2 (36). С. 59-63.

13. Джабборов Н.И., Добринов А.В., Эвиев В.А., Федькин Д.С. Основы повышения энергоэффективности технологических процессов и технических средств обработки почвы. Монография. Элиста: КалмГУ. 2016. 168 с.

14. Добринов А.В., Дементьев А.М., Джабборов Н.И. К вопросу проектирования почвообрабатывающих агрегатов под конкретные условия функционирования // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2009. Т. 2. С. 47.

15. Джабборов Н.И., Федькин Д.С., Михайлов А.С. Обоснование системы технологических процессов восстановления необрабатываемых земель в условиях повышенного увлажнения // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 5 (10). С. 66-68.

16. ГОСТ 20915—2011 Межгосударственный стандарт. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. М.: Стандартинформ. 2013. 28 с.

17. ГОСТ 33687-2015 Межгосударственный стандарт. Машины и орудия для поверхностной обработки почвы.

Методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2016. 42 с.

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: изд-во ИАЭП; Элиста: изд-во КалмГУ, 2015.140 с.

REFERENCES

1. Bashnyak S.E., Sharshak V.K., Bashnyak I.M. Obosnovanie konstruktsii kombinirovannoi mashiny dlya predposevnoi obrabotki pochvy risovykh polei v usloviyakh Rostovskoi oblasti [Rationale for construction of a combined machine for secondary tillage of rice fields in the Rostov Region conditions]. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. No. 4-1 (14): 140-147 (In Russian)

2 .Zhukova O. Sovremennye tekhnologii i tekhnika dlya predposevnoi obrabotki pochvy [Modern technologies and equipment for pre-sowing soil cultivation]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2010. No. 12: 13-15 (In Russian)

3. Mosyakov M.A., Zvolinskiy V.N. Kombinirovannyi pochvoobrabatyvayushchii agregat dlya osnovnoi i predposevnoi obrabotki pochvy [Tilthmaker for once-over soil tillage]. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. 2015. No. 6: 30-35 (In Russian)

4. Priporov E.V., Bolbat A.I. Analiz i vybor rabochikh mashin dlya predposevnoi obrabotki pochvy pod posev zernovykh [Analysis and selection of working machines for pre-treatment of the soil under grain crops]. Politematicheskii setevoi elektronnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. No. 123: 1670-1682 (In Russian)

5. Zaripova N.A., Algazin D.N. Issledovanie snizheniya tyagovogo soprotivleniya seyalki-kul'tivatora [Study of the reduction of traction resistance of the seeder-cultivator]. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. No. 1 (21): 216-220 (In Russian)

6. Kurach A.A., Amantayev M.A. Rezul'taty issledovaniya raboty rotatsionnykh rabochikh organov s aktivnym privodom [Results of research how rotational working bodies with active driver work]. Vestnik Kurganskoi GSKhA. 2013. No. 4 (8): 77-79 (In Russian)

7. Panov A.I. Statisticheskaya otsenka kachestva raboty rotatsionnoi mashiny dlya obrabotki pochvy [Statistical assessment of the quality of the rotary tillage machine]. Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet imeni V.V. Goryachkina». 2015. No. 2 (66): 14-17 (In Russian)

8. Semenikhina Yu.A. Ispol'zovanie dopolnitel'nykh elementov v rotatsionnykh prikatyvayushchikh ustroistvakh [Use of additional elements in rotary soil rollers]. Innovatsii v sel'skom khozyaistve. 2015. No. 4 (14): 157-162 (In Russian)

9. Yakovlev N.S., Nazarov N.N., Nestyak V.S., Markin V.V., Chernykh V.I. Otsenka kachestva raboty borony s kol'tsevymi rabochimi organami [Evaluation of operating quality of harrow with ring working bodies]. Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. No. 12 (158): 141-147 (In Russian)

10. Kolinko P.V., Kudashkin P.I., Ivanov N.M., Golikov V.R.

Pochvoobrabatyvayushchie mashiny dlya bor'by s sornoi rastitel'nost'yu [Tillage machines for weed control]. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. 2013. No. 2: 24-26 (In Russian)

11. Yakovlev N.S., Kolinko P.V. Peremeshchenie pochvy kol'tsom kol'chatogo katka [Moving the soil by a ring of the ribbed roller]. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. 2013. No. 3: 32-34 (In Russian)

12. Dzhabborov N.I., Akhmadov B.R., Fedkin D.S. Metodika razrabotki kart potoka proizvodstva tekhnologicheskikh protsessov [Method of developing the production flow charts in technological processes]. Doklady Tadzhikskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk. 2013. No. 2 (36): 59-63. (In Russian)

13. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Eviev V.A., Fedkin D.S. Osnovy povysheniya energoeffektivnosti tekhnologicheskikh protsessov i tekhnicheskikh sredstv obrabotki pochvy. Monografiya [Fundamentals for enhancing the energy efficiency of soil tillage processes, machines and equipment. Monograph]. Elista: Kalmyk State Univ. Publ. 2016. 168. (In Russian) https://elibrary.ru/item.asp?id=26122501

14. Dobrinov A.V., Dementev A.M., Dzhabborov N.I. K voprosu proektirovaniya pochvoobrabatyvayushchikh agregatov pod konkretnye usloviya funktsionirovaniya [On the issue of designing tillage machines for specific operating conditions]. Molodezh'. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii. 2009. Vol. 2: 47 (In Russian)

15. Dzhabborov N.I., Fedkin D.S., Mihajlov A.S. Obosnovanie sistemy tekhnologicheskih processov vosstanovleniya neobrabatyvaemyh zemel' v usloviyah povyshennogo uvlazhneniya [Substantiation of the technological processes system of recovery of uncultivated land in high humid environment]. Innovacii v sel'skom hozyajstve. 2014. No. 5. 66-68. (In Russian) https://elibrary.ru/download/elibrary_22603743_57066476.pdf

16. GOST 20915—2011 Mezhgosudarstvennyi standart. Ispytaniya sel'skokhozyaistvennoi tekhniki. Metody opredeleniya uslovii ispytanii [Testing of agricultural tractors and machines. Procedure for determination of test conditions]. Moscow: Standartinform. 2013: 28 (In Russian)

17. GOST 33687-2015 Mezhgosudarstvennyi standart. Mashiny i orudiya dlya poverkhnostnoi obrabotki pochvy. Metody ispytanii [Machines and tools for surface treatment of soil. Test methods]. Moscow: Standartinform. 2016: 42 (In Russian)

18. Valge A.M., Dzhabborov N.I., Eviev V.A. Osnovy statisticheskoj obrabotki ehksperimental'nyh dannyh pri provedenii issledovanij po mekhanizacii sel'skohozyajstvennogo proizvodstva s primerami na STATGRAPHICS i EXCEL [Fundamentals of statistical processing of experimental data for research in mechanisation of agricultural production with examples in STATGRAPHICS and EXCEL]. Saint Petersburg; Elista: Kalmyk State Univ. Publ., 2015: 140. (In Russian)

УДК 636.085.7 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-111-116**

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ШТАММА *BACILLUS SUBTILIS* НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛНОГЕНОМНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Г.Ю. Лаптев[1], д-р биол. наук,
Т.П. Дуняшев[1],
Е.А. Йылдырым[1], д-р биол. наук,
Л.А. Ильина[1], канд. биол. наук,
Д.Г. Тюрина[2], канд. экон. наук,
Н.И. Новикова [2], канд. биол. наук,
В.Х. Меликиди [2]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

[2] ООО «БИОТРОФ», Санкт-Петербург, Россия

Целью исследований было секвенирование и функциональная аннотация генома штамма *Bacillus subtilis* для выявления генов, важных для выживания в условиях силоса и рубца, регуляции процессов ферментации кормов и микробиома пищеварительной системы. Нуклеотидные последовательности определяли с использованием прибора MiSeq («Illumina, Inc.», США) совместно с комплектом реактивов MiSeq Reagent Kit v3 (300-cycle) («Illumina, Inc.», США). Функциональную аннотацию генома проводили в программах PROKKA 1.12 (https://github.com/kbaseapps/ProkkaAnnotation http://vicbioinformatics.com/) и RAST 2.0 (https://rast.nmpdr.org). При проведении биоинформатической обработки данных полногеномного секвенирования штамма B. subtilis было идентифицировано несколько кластеров генов, связанных с повышенной устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды. В том числе найдены гены, которые противодействуют пагубным эффектам увеличения осмолярности окружающей среды (гены глицин бетаин-связывающего белка OpuAc), гены, связанные с психротолерантностью (например, cspA) и синтезом молочной кислоты. В связи с этим, штамм является перспективным для его использования в качестве основы силосных заквасок в кормопроизводстве, а также как основы пробиотиков в животноводстве.

Ключевые слова: полногеномное секвенирование, *Bacillus subtilis*, осмопротектор, лактат

Для цитирования: Лаптев Г.Ю., Дуняшев Т.П., Йылдырым Е.А., Ильина Л.А., Тюрина Д.Г., Новикова Н.И., Меликиди В.Х. Биотехнологический потенциал штамма *BACILLUS SUBTILIS* на основе данных полногеномного секвенирования // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.111-117

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF *BACILLUS SUBTILIS* STRAIN BASED ON WHOLE GENOME SEQUENCING DATA

G.Yu. Laptev[1], DSc (Biology),
T.P. Dunyashev[1],
E.A. Yildyrym[1], DSc (Biology), L.A. Ilyina[1], Cand. Sc. (Biology), D.G. Tiurina[2],

Cand. Sc. (Economics), N.I. Novikova[2], Cand. Sc. (Biology), V.Kh. Melikidi[2]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

[2]Biotrof Ltd., Saint Petersburg, Russia

The aim of research was the sequencing and functional annotation of the genome of the *Bacillus subtilis* strain to identify genes important for survival in silage and rumen conditions, to control the feed fermentation and the microbiome of the digestive system. Nucleotide sequences were identified using a MiSeq instrument (Illumina, Inc., USA) together with a MiSeq Reagent Kit v3 (300-cycle) (Illumina, Inc., USA). Functional genome annotation was performed with PROKKA 1.12 (https://github.com/kbaseapps/ProkkaAnnotation http://vicbioinformatics.com/) and RAST 2.0 (https://rast.nmpdr.org) software tools. The bioinformatic analysis of the whole genome sequencing data of the *B. subtilis* strain identified several clusters of genes associated with increased resistance to unfavorable environmental factors, namely the genes that counteracted the pernicious effect of the increase in the osmolarity of the environment (genes of glycine betaine-binding protein OpuAc), genes associated with psychrotolerance (for example, cspA) and lactic acid synthesis. In this regard, the strain shows promise in its use as a basis for silage starter cultures in feed production, as well as the basis for probiotics in animal husbandry.

Key words: whole genome sequencing, *Bacillus subtilis*, osmoprotector, lactate

For citation: Laptev G.Yu., Dunyashev T.P., Yildyrym E.A., Ilyina L.A., Tiurina D.G., Novikova N.I. Melikidi V.Kh. Biotechnological potential of *Bacillus Subtilis* strain based on whole genome sequencing data. *AgroEkoInzheneriya* 2021. No. 3(108): 111-117 (In Russian)

Введение

Генетические детерминанты штаммов бактерий *Bacillus* sp., определяющие возможность биосинтеза разнообразных биологически активных соединений, представляют особый научный интерес, поскольку благодаря им эти микроорганизмы нашли широкое применение в качестве биопестицидов в растениеводческой практике, как основа терапевтических агентов и пробиотиков в животноводстве, а также как основа силосных заквасок в кормопроизводстве. Как было показано рядом ученых (Phillip, Fellner, 1992, Moran et aI., 1993), внесение специфических штаммов бактерий *B. subtilis* и *B. licheniformis* в силос способствовало ингибированию роста плесневых грибов в силосе из многолетних трав и увеличивало аэробную стабильность силоса с высокой влажностью. В результате проведения серии экспериментов исследователями Weinberg с соавт. (Weinberg et al., 2003) было показано, что штаммы бактерий, входящие в состав заквасок, способны выживать и увеличивать численность в рубце жвачных при попадании в организм животных с потребляемым силосом, способствуя стабилизации рубцовой микробиоты, а значит, могут обладать одновременно и пробиотической активностью.

Для силосной экосистемы характерны очень сложные внутренние связи и специфические закономерности динамики. Прежде всего, это среда с высоким уровнем кислотности и осмотическим давлением, порой достигающих экстремальных величин (Мак-Дональд, 1985), выживать и размножаться в которой могут только высококонкурентные штаммы. Поэтому

эффективная селекция микроорганизмов для создания заквасок подразумевает получение штамма бактерий, который не только будет превосходить другие штаммы по таким целевым признакам, как скорость подкисления и антагонистическая активность, но и по способности эффективно конкурировать с эпифитными обитателями по приспособленности к среде обитания.

Целью исследований было секвенирование и функциональная аннотация генома штамма *Bacillus subtilis* для выявления генов, важных для выживания в условиях силоса и рубца, регуляции процессов ферментации кормов и микробиома пищеварительной системы.

Материалы и методы

Материалом для исследования служил штамм *B. subtilis* из коллекции ООО «БИОТРОФ». Выделение ДНК проводили по стандартным методикам с использованием набора Genomic DNA Purification Kit («Fermentas, Inc.», Литва). Библиотеку ДНК для полногеномного секвенирования готовили с помощью набора Nextera XT («Illumina, Inc.», США). Нуклеотидные последовательности определяли с использованием прибора MiSeq («Illumina, Inc.», США) совместно с комплектом реактивов MiSeq Reagent Kit v3 (300-cycle) («Illumina, Inc.», США). Недостоверные последовательности и адаптеры удаляли в программе Trimmomatic-0.38 (https://www.osc.edu/book/ex-port/html/4385). Отфильтрованные по длине не менее чем от 50 до 150 п.н. парноконцевые последовательности собирали de novo с использованием геномного сборщика SPAdes-3.11.1 (http://cab.spbu.ru/software/spades/). Функциональную аннотацию генома проводили в программах PROKKA 1.12 (https://github.com/kbaseapps/ProkkaAnnotation http://vicbioinformatics.com/) и RAST 2.0 (https://rast.nmpdr.org).

Результаты и обсуждение

При проведении биоинформатической обработки данных полногеномного секвенирования штамма *B. subtilis* было идентифицировано несколько кластеров генов, связанных с повышенной устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды (табл. 1).

Таблица 1

Гены *B. subtilis*, связанные с адаптацией к неблагоприятных факторам внешней среды

№	Неблагоприятные внешние воздействия	Количество генов в геном отвечающих за адаптацию
1	Высокое осмотическое давление	14
2	Окислительный стресс	44
3	Токсический стресс	11
4	Холодовой шок	3
5	Тепловой шок	17
6	Углеродное голодание	3
7	Прочие стрессы	14

Расшифровка генома с использованием базы данных RAST предсказала активацию 106 генов отвечающих за адаптацию к неблагоприятным внешним воздействиям, включающим повышенное осмотическое давление, окислительный и токсический стресс, холодовой шок, снижение питательных веществ в среде. Например, присутствие в геноме *B. subtilis* группы генов семейства *cspA*, которые активируются в ответ на понижение температуры (Beno et al., 2014), позволяет клеткам адаптироваться к низким температурам и выживать при подмораживании силосной траншеи в течение зимнего сезона, что очень важно для большинства регионов на территории нашей страны. Одним из путей адаптации у штамма *B. subtilis* к повышенному осмотическому давлению является механизм синтеза глицин бетаин-связывающего белка (OpuAc), являющегося очень эффективным осмопротектором (Smits et al., 2008) (рис. 1).

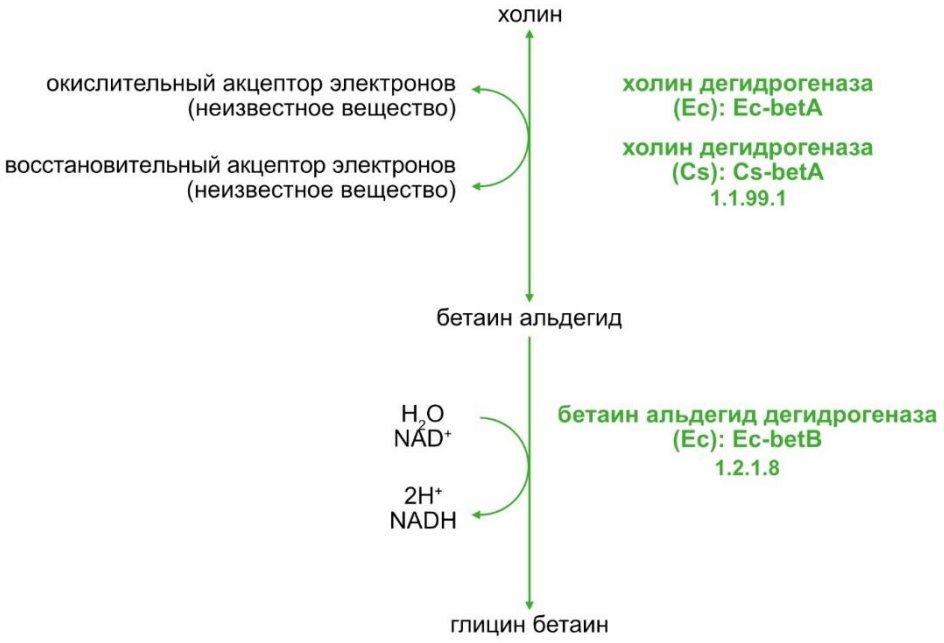


Рис. 1. Путь биосинтеза осмопротектора глицин бетаин-связывающего белка (OpuAc) у B. subtilis

Кроме того, показано что штамм бактерии *B. subtilis* обладает уникальным потенциалом синтеза ферментов L-лактатдегидрогеназ, приводящих к образованию L-молочной кислоты. Это важный вывод, поскольку молочная кислота известна своей антимикробной активностью в отношении многих патогенных микроорганизмов (*Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Salmonella enterica* и др.) (Alakomi et al., 2000). Ранее (Ortiz A., Sansinenea, 2020) было показано, что штамм *Bacillus megaterium* ELI 24, выделенный из почвы в Мексике, секретировал значительные количества янтарной кислоты, которая была идентифицирована спектроскопическими методами.

Выводы

При проведении биоинформатической обработки данных полногеномного секвенирования штамма *B. subtilis* было идентифицировано несколько кластеров генов, связанных с повышенной устойчивостью к неблагоприятных факторам внешней среды. В том числе, найдены гены, которые противодействуют пагубным

эффектам увеличения осмолярности окружающей среды, гены, связанные с психротолерантностью и синтезом молочной кислоты. В связи с этим, штамм является перспективным для его использования в качестве основы силосных заквасок в кормопроизводстве, а также, как основы пробиотиков в животноводстве.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №19-316-90041«Полногеномное секвенирование штаммов бацилл, выделенных из рубцового содержимого различных жвачных животных»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мак-Дональд П. Биохимия силоса. М.: Агропромиздат, 1985. 271 С.

Weinberg Z.G., Muck R.E., Weimer P.J. The survival of silage inoculant lactic acid bacteria in rumen fluid // Journal of Applied Microbiology. 2003. Vol. 94, pp. 1066-1071.

2. Phillip L.E., Fellner Y. Effects of bacterial inoculation of high-moisture ear com on its aerobic stability, digestion, and utilization for growth by beef steers // J. Anim. Sci. 1992. Vol. 70, pp. 3178-3187.

3. Moran J.P., Pullar D., Owen T.R. The development of a novel bacterial inoculant to reduce mould spoilage and improve the silage fermentation in big bale silage. In: P. O'Kiely et al. (ed.) Silage Research 1993. Proc. 10th Int. Conf. Silage Res., Dublin, Ireland (6-8 Sept. 1993). Dublin: Dublin City University. 1993, pp. 85-86.

4. Alakomi H.L., Skyttä E., Saarela M., Mattila-Sandholm T., Latva-Kala K., Helander I.M. Lactic acid permeabilizes gram-negative bacteria by disrupting the outer membrane. Applied and Environmental Microbiology, 2000, No. 66(5): 2001- 2005 DOI: 10.1128/aem.66.5.2001-2005.2000

5. Ortiz A., Sansinenea E. Succinic Acid Production as Secondary Metabolite from Bacillus megaterium ELI24. The Natural Products Journal, 2020, Vol.10, Issue 2: 154-157. DOI: 10.2174/2210315509666190410153811

6. Smits, S. H., Höing, M., Lecher, J., Jebbar, M., Schmitt, L., Bremer, E. The compatible-solute-binding protein OpuAC from Bacillus subtilis: ligand binding, site-directed mutagenesis, and crystallographic studies. Journal of Bacteriology, 2008. Vol. 190 Issue 16, pp. 5663–5671. DOI: 10.1128/JB.00346-08

7. Beno, S. M., Orsi, R. H., Cheng, R. A., Kent, D. J., Kovac, J., Duncan, D. R., Martin, N. H., Wiedmann, M. Genes Associated with Psychrotolerant Bacillus cereus Group Isolates. Frontiers in Microbiology, 2019. Vol.10, p. 662. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00662

REFERENCES

McDonald P. The Biochemistry of Silage. Chichester, England: John Wiley. 1981, 200 p. (Russ. McDonald P. Biokhimiya silosa. Moscow: Agropromizdat, 1985. 271 p.)

Weinberg Z.G., Muck R.E., Weimer P.J. The survival of silage inoculant lactic acid bacteria in rumen fluid // Journal of Applied Microbiology. 2003. Vol. 94: 1066-1071.

Phillip L.E., Fellner Y. Effects of bacterial inoculation of high-moisture ear com on its aerobic stability, digestion, and utilization for growth by beef steers // J. Anim. Sci. 1992. Vol. 70: 3178-3187.

3. Moran J.P., Pullar D., Owen T.R. The development of a novel bacterial inoculant to reduce mould spoilage and improve the silage fermentation in big bale silage. In: P. O'Kiely et

al. (ed.) Silage Research 1993. Proc. 10th Int. Conf. Silage Res., Dublin, Ireland (6-8 Sept. 1993). Dublin: Dublin City University. 1993: 85-86.

4. Alakomi H.L., Skyttä E., Saarela M., Mattila-Sandholm T., Latva-Kala K., Helander I.M. Lactic acid permeabilizes gram-negative bacteria by disrupting the outer membrane. Applied and Environmental Microbiology, 2000, No. 66(5): 2001- 2005 DOI: 10.1128/aem.66.5.2001-2005.2000

5. Ortiz A., Sansinenea E. Succinic Acid Production as Secondary Metabolite from Bacillus megaterium ELI24. The Natural Products Journal, 2020, Vol.10, Issue 2: 154-157. DOI: 10.2174/2210315509666190410153811

6. Smits, S. H., Höing, M., Lecher, J., Jebbar, M., Schmitt, L., Bremer, E. The compatible-solute-binding protein OpuAC from Bacillus subtilis: ligand binding, site-directed mutagenesis, and crystallographic studies. Journal of Bacteriology, 2008. Vol. 190 Issue 16: 5663–5671. DOI: 10.1128/JB.00346-08

7. Beno, S. M., Orsi, R. H., Cheng, R. A., Kent, D. J., Kovac, J., Duncan, D. R., Martin, N. H., Wiedmann, M. Genes associated with psychrotolerant Bacillus Cereus group isolates. Frontiers in Microbiology, 2019. Vol.10: 662. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00662

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА

УДК 631.95 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-117-128**

ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ НАВОЗА В РЕГИОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ: АНАЛИЗ И НАМЕТИВШИЕСЯ ТЕНДЕНЦИИ

Уваров Р.А., канд. техн. наук Васильев Э.В., канд. техн. наук

Шалавина Е.В., канд. техн. наук

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

Комплексное решение экологических проблем возможно только путем эффективного межгосударственного взаимодействия. Регион Балтийского моря является одним из наиболее экономически развитых регионов мира. Обеспечение проживающих на его территории 45 млн. человек достаточным количеством продуктов питания возможно только при высоком уровне развития сельского хозяйства. Природно-климатические условия региона способствуют развитию животноводства. В рамках исследования была подробно рассмотрена данная отрасль сельского хозяйства в странах-участницах Европейского союза, расположенных в регионе Балтийского моря: Дании, Швеции, Финляндии, Эстонии, Латвии, Литве, Польше и Германии. В регионе насчитывается 22589 тысяч голов КРС, в т. ч. 9006,1 тысяч коров; 54879,2 тысяч свиней; 2296,24 млн. голов птицы. Суммарное количество образуемого навоза и помета в регионе составляет 595750,8 тысяч тонн, из которых 335297,1 тысяч тонн (56,3%) приходится на навоз КРС; 168259,6 тысяч тонн (28,2%) – свиной навоз; 92194,0 тысячи тонн (15,5%) – птичий помет. На долю жидкого и полужидкого навоза приходится 434887,4 тысяч тонн (73,0%). Наиболее распространенные технологии утилизации навоза/помета в регионе – это пассивное компостирование твердого навоза и длительное выдерживание жидкого и полужидкого навоза. Активно вводятся в эксплуатацию хранилища и установки закрытого типа: в период 2010 по 2017 год их доля возросла с 9,9% до 18,4% при переработке твердого навоза/помета и с 15,1% до 28,3% при переработке жидкого/полужидкого навоза. В некоторых странах, в частности, Дании, Германии и Финляндии активно внедряется технология производства биогаза методом анаэробного сбраживания.

Ключевые слова: навоз, обращение с навозом, утилизация, экологическая устойчивость, длительное выдерживание, компостирование

Для цитирования: Уваров Р.А., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Технологии утилизациинавоза в регионе Балтийского моря: анализ и наметившиеся тенденции // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С. 117-128

MANURE UTILISATION TECHNOLOGIES IN THE BALTIC SEA REGION: ANALYSIS AND EMERGING TRENDS

R.A. Uvarov, Cand. Sc. (Engineering), E.V. Vasilev, Cand. Sc. (Engineering)
E.V. Shalavina, Cand. Sc. (Engineering),

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

A comprehensive approach to environmental problems is possible only through effective interstate cooperation. The Baltic Sea Region is one of the most economically developed regions in the world. The sufficient amount of food for 45 million people living on its territory can be provided only under a high level of agricultural development. The natural and climatic conditions of the region contribute to the advancement of animal husbandry. The study considered this branch of agriculture in detail in the member states of the European Union located in the Baltic Sea region: Denmark, Sweden, Finland, Estonia, Latvia, Lithuania, Poland and Germany. There are 22,589 thousand head of cattle in the region, including 9006.1 thousand cows, 54,879.2 thousand pigs, and 2296.24 million poultry. The total amount of animal/poultry manure produced in the region is 595,750.8 thousand tons, of which 335297.1 thousand tons (56.3%) are cattle manure; 168,259.6 thousand tons (28.2%) are pig manure; and 92194.0 thousand tons (15.5%) are poultry manure. The share of liquid and semi-liquid manure accounts for 434887.4 thousand tons (73.0%). Passive composting of solid manure and long-term storing (maturing) of slurry and semi-liquid manure are the most common animal/poultry manure processing practices in the region. Covered storage facilities and closed installations are extensively introduced: in the period 2010 to 2017, their share increased from 9.9% to 18.4% in the solid animal/poultry manure processing and from 15.1% to 28.3% in liquid/semi-liquid manure processing. In some countries, in particular Denmark, Germany and Finland, the technology of biogas production by anaerobic digestion is actively promoted.

Key words: manure, manure handling, utilisation, environmental sustainability, long-term maturing, composting

For citation: Uvarov R.A., Shalavina E.V., Vasilev E. V. Manure utilisation technologies in the Baltic Sea Region: analysis and emerging trends. *AgroEcoEngineeriya*. 2021. No. 3(108): 117-128 (In Russian)

Введение

Необходимость обеспечения экологической безопасности является одной из наиболее актуальных проблем человечества. Её решение возможно только посредством комплексных мер, направленных на снижение нагрузки различных отраслей экономики на окружающую среду [1]. Впервые идея необходимости комплексных решений в области экологии на уровне стран и отдельных регионов была озвучена в конце 1970-х на всемирной конференции по проблемам климата. В 1992 году в Рио-де-Жанейро странами-участницами ООН была подписана Рамочная конвенция об охране климата, а в 1997 году – Киотский протокол, вступивший в силу в 2005 году. Данные документы преимущественно были направлены на разработку и внедрение мер по снижению концентрации парниковых газов в атмосфере и сохранению озонового слоя. В 2015 году были разработаны Парижские

соглашения о климате, ужесточившие количество допустимых выбросов парниковых газов и уточнившие механизмы взаимодействия между странами [2].

Россия также идет в русле мировых тенденций: экологическая безопасность является одним из приоритетных направлений обеспечения национальной безопасности [3]. Одним из элементов обеспечения экологической безопасности является тесное взаимодействие с приграничными странами по стратегическим направлениям: снижение диффузной биогенной нагрузки от водных объектов, сниженные нагрузки на водосборные бассейны, сокращение эмиссий в атмосферу [6-10].

Регион Балтийского моря, включающий в свой состав Данию, Швецию, Финляндию, часть Северо-Западного Федерального округа России, Эстонию, Латвию, Литву, а также части Польши и Германии (рис. 1), является одним из наиболее экономически развитых регионов мира.

Рис. 1. Страны региона Балтийского моря

Обладая населением более 45 млн человек[1] [2], Балтика обеспечивает около 30% товарооборота Европы [9, 10]. Для того, что иметь возможность обеспечить такое население достаточным количеством продуктов питания должного качества, в регионе должно быть на

[1] Eurostat. Population, Total (persons), 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/RCI/#?vis=nuts1.population&lang=en. (дата обращения: 06.09.2021).

[2] Демографический ежегодник России, 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://gks.ru/bgd/regl/B19_16/Main.htm. (дата обращения: 06.09.2021).

высоком уровне развито сельское хозяйство. Нахождение данного региона в зоне рискованного земледелия (умеренно-прохладный климат и преобладание небогатых гумусовым слоем почв) предопределило животноводство как основное направление развития сельского хозяйства [11, 12].

Производство животноводческой продукции неизменно связано с образованием такого вида отходов, как навоз, при этом доля общей эмиссии парниковых газов при его утилизации составляет от 20% (CO_2) до 90% (NH_3) [13, 14].

В силу более интенсивного сельского хозяйства, меньших площадей и более жесткого экологического законодательства по сравнению с Россией [15-17], в европейских странах более остро стоит вопрос утилизации образующихся отходов.

Целью исследования является изучение применяемых технологий утилизации навоза и определение тенденций в странах-членах ЕС региона Балтийского моря.

Материалы и методы

В рамках работы использованы метод статистической обработки данных: статистических наблюдений, группировки данных, вариационных анализ, изучение взаимосвязей, обработка данных.

В качестве объекта исследований выбрана отрасль животноводства в странах-членах ЕС региона Балтийского моря: выявлено поголовье КРС, свиней и птицы, определены выходы различных видов навоза, проанализирована динамика внедрения различных технологий утилизации.

Исследуемые страны:

- Дания.
- Швеция.
- Финляндия.
- Эстония.
- Латвия.
- Литва.
- Польша.
- Германия (регионы Бранденбург, Макленбург и Шлезвиг-Гольштейн).

В качестве источника данных использована официальная статистика ЕС (Eurostat), а также данные, полученные в рамках международных научных проектов:

- EU INTERREG Baltic Slurry Acidification.
- EU INTERREG Manure Standarts.
- EcoAgRAS.

Определение годового выхода навоза и помета по странам произведено расчетным методом в соответствии с апробированной методикой [18].

Результаты и обсуждение

Первым этапом работ стало определение общего уровня развития сельского хозяйства в исследуемом регионе: поголовье животных и птицы, площади пахотных земель и расчет количество условных голов животных на единицу площади данных земель (Таблица 1)[3 4 5 6].

Таблица 1

Общая характеристика с/х в странах Европейского союза (Балтийский регион)

Страна	**Поголовье с/х животных и птицы, тыс. гол.**				**Кол-во условных голов животных (у.г.ж.), тыс. гол.**	**Площадь пахотных земель, тыс. га**	**Отношение у.г.ж. к площади пахотных земель**
	Коровы	**КРС всего**	**Свиньи**	**Птица**			
Дания	646,0	1500,0	13391,0	111362,0	6486,1	2614,6	2,48
Швеция	498,6	1391,0	1103,9	н/д	1454,5	3021,3	0,48
Финляндия	316,4	835,4	1383,2	97055,0	2162,3	2194,2	0,99
Эстония	115,4	253,3	316,6	н/д	306,9	995,1	0,31
Латвия	196,0	399,0	306,8	22290,5	675,3	1930,9	0,35
Литва	294,7	629,5	580,4	55228,0	1310,7	2924,6	0,45
Польша	2391,3	6278,9	11727,4	1362190,7	23614,9	14405,6	1,64
Германия	4547,7	11301,9	26069,9	648113,6	24225,9	16715,3	1,45

н/д – отсутствуют данные официальной статистики по стране

Суммарное поголовье с/х животных и птицы в регионе составляет: 22589 тысяч голов КРС, в т.ч. 9006,1 тысяч коров; 54879,2 тысяч свиней и 2296,24 млн голов птицы. В перерасчете на условные головы суммарное поголовье составляет 60236,53 тысячи голов. В целом по региону сельское хозяйство развито крайне неравномерно: в Германии количество условных голов животных на единицу площади пахотных земель приближается к границе экологической устойчивости (1,5 у.г.ж / га пах. зем.) [19, 20], а в Польше и особенно в Дании данный показатель значительно превышен. В это же время в Швеции, Эстонии,

[3] Bovine population – annual data. Eurostas. Statistics Explained. [Электронный ресурс]. URL: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=apro_mt_lscatl&lang=en (дата обращения: 17.08.2021).

[4] Pig population – annual data. Eurostas. Statistics Explained. [Электронный ресурс]. URL: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=apro_mt_lspig&lang=en (дата обращения: 17.08.2021)

[5] Poultry – annual data. Eurostas. Statistics Explained. [Электронный ресурс]. URL: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=apro_ec_poula&lang=en (дата обращения: 18.08.2021).

[6] Main farm land use by NUTS 2 regions. Eurostas. Statistics Explained. [Электронный ресурс]. URL: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do (дата обращения: 08.09.2021).

Латвии и Литве он находится в диапазоне 0,31-0,48, а в Финляндии – 0,99. Это говорит о потенциале к наращиванию объемов производства животноводческой продукции в этих странах без значительного риска для экологии.

С учетом поголовья животных и птицы, применяемых технологий содержания и специфики отдельных стран определена доля образуемого жидкого и полужидкого навоза от общего количества [21]. Расчетные значения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Количество и доля образуемого навоза/помета

Страна	**Навоз КРС**		**Свиной навоз**		**Птичий помет**		**Всего навоза/ помета, тыс. т / год**	**Доля жидкого/ полужидкого навоза, %**
	тыс. т / год	**% от общего**	**тыс. т / год**	**% от общего**	**тыс. т / год**	**% от общего**		
Дания	24050,6	34,6	41056,8	59,0	4471,2	6,4	69578,6	85
Швеция	18562,9	84,6	3384,6	15,4	н/д	н/д	21947,4	82
Финляндия	11779,6	59,1	4240,9	21,3	3896,8	19,6	19917,2	36
Эстония	4296,3	81,6	970,7	18,4	н/д	н/д	5267,0	68
Латвия	7297,1	79,9	940,6	10,3	895,0	9,8	9132,7	н/д
Литва	10971,7	73,3	1779,5	11,9	2217,4	14,8	14968,6	30
Польша	89028,1	49,5	35956,2	20,0	54692,0	30,4	179676,3	50
Германия	169310,9	61,5	79930,3	29,0	26021,8	9,5	275262,9	90

н/д – отсутствуют данные официальной статистики по стране

Суммарное количество образуемого навоза и помета в регионе составляет 595750,8 тысяч тонн, из которых 335297,1 тысячи тонн (56,3%) приходится на навоз КРС, 168259,6 тысяч тонн (28,2%) – свиной навоз и 92194,0 тысячи тонн (15,5%) – птичий помет. На долю жидкого/полужидкого навоза приходится 434887,4 тысячи тонн (73,0%).

Согласно данным европейских исследований [21], наибольшее распространение в исследуемом регионе получили 2 технологии переработки: основная часть твердого навоза перерабатывается пассивным компостированием, а жидкий и полужидкий – длительным выдерживанием. Местные особенности сельского хозяйства существенно варьируют степень распространения той или иной технологии: на рисунке 2 представлена степень

распространения базовой технологии переработки твердого навоза/помета, на рисунке 3 – переработки жидкого навоза[7].

Несмотря на то, что широко распространены те же технологии утилизации, что и в России, основным отличием от применяемых в России вариантов является широкое внедрение закрытых хранилищ, минимизирующих воздействие внешних погодных факторов, что позволяет, с одной стороны, снизить негативную нагрузку на окружающую среду в виде эмиссии при переработке, а с другой – повысить качество конечного продукта [22].

Снижение доли жидкого и полужидкого навоза, перерабатываемого технологией длительного выдерживания, в ряде стран, например, Дании, Германии и Финляндии, связано, в том числе, с ориентацией данных стран на альтернативную энергетику, в частности – технологию производства биогаза – анаэробное сбраживание. Количество биогазовых установок и количество перерабатываемого на них навоза представлено в таблице 3 [21].

Таблица 3

Распространенность технологии аэробного сбраживания (производство биогаза)

Страна	Кол-во биогазовых заводов, шт.	Кол-во перерабатываемого навоза, тыс. т / год
Дания	76	6800
Швеция	14	н/д
Финляндия	40	300
Эстония	5	н/д
Латвия	51	н/д
Литва	8	н/д
Польша	85	1200
Германия	9000	32500

н/д – отсутствуют данные официальной статистики по стране

[7] Manure storage facilities by NUTS 3 regions. Eurostas. Statistics Explained. [Электронный ресурс]. URL: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=aei_fm_ms&lang=en (дата обращения: 08.09.2021).

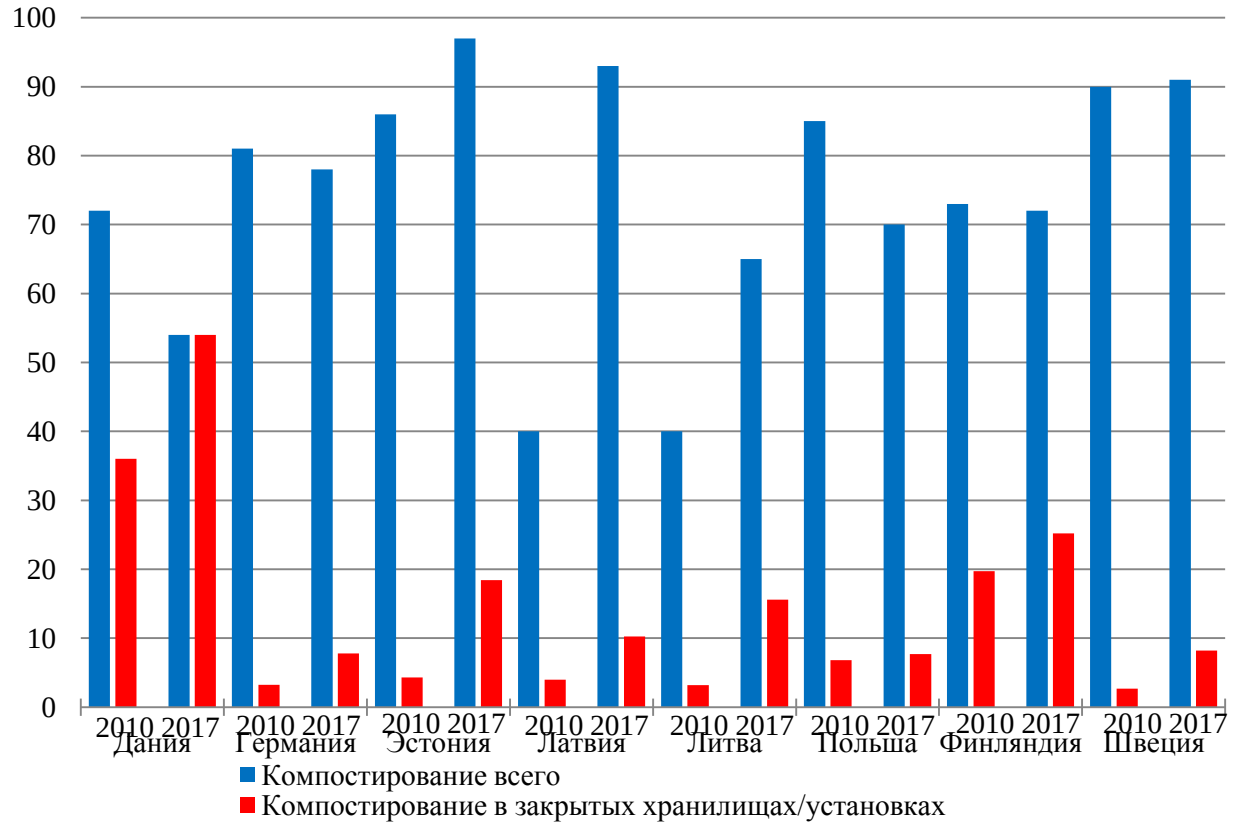


Рис. 2. Распространение технологий переработки твердого навоза/помета в странах Европейского союза (Балтийский регион)

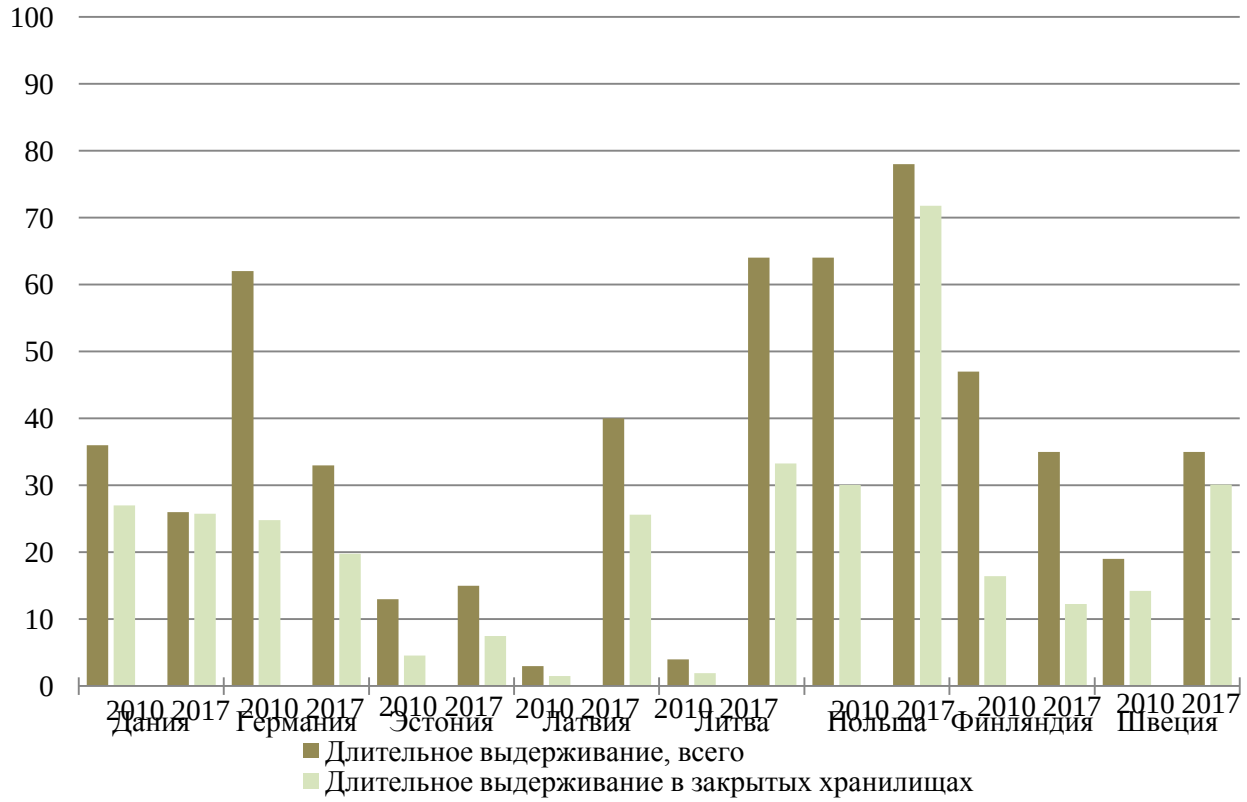


Рис. 3. Распространение технологий переработки жидкого/полужидкого навоза в странах Европейского союза (Балтийский регион)

Выводы

Комплексное решение экологических проблем возможно только путем межгосударственного взаимодействия. Балтийское море, являясь одним из наиболее развитых судоходных регионов мира, вместе с тем является и одной из наиболее загрязненных водных артерий планеты. Расположение и природно-климатические особенности региона способствуют приоритетному развитию животноводческой отрасли сельского хозяйства, что ставит задачу разработки и внедрению эффективных и экологически безопасных технологий утилизации навоза и помета.

Изучение опыта ведущих европейских стран Балтийского региона позволяет выявить наиболее прогрессивные и актуальные для данной территории технологии обращения с навозом и пометом, которые в дальнейшем могут быть использованы в нашей стране.

В изучаемом регионе, представленном Данией, Швецией, Финляндией, Эстонией, Латвией, Литвой, Польшей и Германией, содержится 22589 тысяч голов КРС, в т.ч. 9006,1 тысяч коров; 54879,2 тысяч свиней и 2296,24 млн голов птицы. В перерасчете на условные головы суммарное поголовье составляет 60236,53 тысячи голов. В целом по региону животноводство развито крайне неравномерно – показатель экологической устойчивости территорий, определяемый через соотношение условных голов животных и площади пахотных земель, варьируется от 0,31 (Эстония) до 2,48 (Дания).

Суммарное количество образуемого навоза и помета в регионе составляет 595750,8 тысяч тонн, из которых 335297,1 тысячи тонн (56,3%) приходится на навоз КРС; 168259,6 тысяч тонн (28,2%) – свиной навоз; 92194,0 тысячи тонн (15,5%) – птичий помет. На долю жидкого и полужидкого навоза приходится 434887,4 тысячи тонн (73,0%).

В странах Балтийского региона наибольшее распространение получили 2 технологии переработки навоза/помета: основная часть твердого навоза перерабатывается пассивным компостированием, а жидкий и полужидкий – длительным выдерживанием. Основным отличием от применяемых в России аналогичных технологий является широкое внедрение закрытых хранилищ: в период с 2010 по 2017 годы средняя доля установок и хранилищ закрытого типа выросла практически вдвое: при переработке твердого навоза/помета – с 9,9% до 18,4%, при переработке жидкого/полужидкого навоза – с 15,1% до 28,3%.

В ряде стран, например, в Дании, Германии и Финляндии, идет активная ориентация на альтернативную энергетику, в частности, технологию производства биогаза – анаэробное сбраживание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vasseur P., Cossu-Leguille C. Biomarkers and community indices as complementary tools for environmental safety // Environment International. 2003. Vol. 28. No. 8, pp. 711-717.

2. Дубовик О.Л., Аверина К.Н. Значение Парижского соглашения для охраны климата: крупномасштабные планы и проблемы с их реализацией // Международное право и международные организации. 2018. №4. С. 18-27.

3. Тимофеев Г.А., Орлинская О.М. Экологическая безопасность в системе национальной безопасности Российской Федерации // Власть. 2017. Т.25. №2. С. 69-74.

4. Коровин Л.К., Обломкова Н.С., Воробьева Е.А. Предложения по снижению негативного воздействия на морскую среду Балтийского моря // Экология производства. 2015. № 12. С. 42-47.

5. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Тарбаева В.М. и др. Обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология. География. 2016. № 4. С. 53-65.

6. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N. et al. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 246, pp. 283-288.

7. Popov V.D., Briukhanov A.Y., Subbotin I.A. Influence of agrotechnical factors on diffuse pollution of aquatic ecosystems // Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM), Saint-Petersburg, 24-26 May 2017. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, pp. 655-657.

8. Davuliene L., Jasineviciene D., Garbariene I. et al. Long-term air pollution trend analysis in the South-eastern Baltic region, 1981-2017 // Atmospheric Research. 2021. Vol. 247, ID 105191.

9. Studzieniecki T. The development of cross-border cooperation in an EU macroregion – a case study of the Baltic Sea Region // Procedia Economics and Finance. 2016. Vol. 39, pp. 235-241.

10. Kivikari U., Antola E. Baltic Sea Region – a dynamic third of Europe. Turku: City of Turku, 2004. 35 p.

11. Smol M., Preisner M., Bianchini A. et al. Strategies for sustainable and circular management of phosphorus in the Baltic Sea region: the holistic approach of the InPhos Project // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 6, pp. 2567.

12. Thorsøe M.H., Andersen M.S., Brady M.V. et al. Promise and performance of agricultural nutrient management policy: Lessons from the Baltic Sea // Ambio. 2021, pp. 1-15. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01549-3

13. Bai M., Flesch T., Trouvé R. et al. Gas emissions during cattle manure composting and stockpiling// Journal of Environmental Quality. 2020. Vol. 49. No. 1, pp. 228-235.

14. Zhang N., Bai Z., Winiwarter W. et al. Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China // Environmental Science & Technology. 2019. Vol. 53. No. 20, pp. 11840-11848.

15. Ларина О.И. Сравнение инструментария оценки регулирующего воздействия в РФ и ЕС // Государственный аудит. Право. Экономика. 2017. №. 2. С. 124-128.

16. Kuka K. Lehn F., Leitans L. et al. National nutrient balances in the Baltic Sea Region. Helsinki: Natural Resources Institute Finland. 2019. 66 p.

17. Laakso J., Luostarinen S. Legislation and voluntary actions regulating manure fertilization in the Baltic Sea Region. Helsinki: Natural Resources Institute Finland. 2019. 69 p.

18. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. и др. Методика оценки экологической устойчивости сельских территорий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства 2018. № 96. С. 164-175.

19. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. и др. Методы решения экологических проблем в животноводстве и птицеводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13. № 4. С. 32-37.

20. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Методика укрупненной оценки

суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохозяйственный вестник. 2014. №1 (13). С. 78-85.

21. Neumann S., Zacharias M., Stauss R., Foged H.L. (Eds). Baltic Slurry Acidification: Market potential analysis. Uppsala: RISE - Research Institutes of Sweden, 2017. 140 p.

22. Васильева Н.С., Воробьева Е.А., Минин В.Б. и др. Анализ состояния навозохранилищ Ленинградской области // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. №3 (100). С. 179-187.

REFERENCES

1 Vasseur P., Cossu-Leguille C. Biomarkers and community indices as complementary tools for environmental safety. Environment International. 2003. Vol. 28. No. 8: 711-717.

2 Dubovik O.L., Averina K.N. Znachenie Parizhskogo soglasheniya dlya okhrany klimata: krupnomasshtabnye plany i 127roblem s ikh realizatsiei [Significance of the Paris Agreement for Climate Protection: Large-Scale Plans and Challenges for Implementation]. Mezhdunarodnoe pravo i mezhdunarodnye organizatsii. 2018. No. 4: 18-27 (In Russian)

3 Timofeev G.A., Orlinskaya O.M. Ekologicheskaya bezopasnost' v sisteme natsional'noi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii [Ecological safety in the system of national security of the Russian Federation]. Vlast'. 2017. Vol. 25. No. 2: 69-74 (In Russian)

4 Korovin L.K., Oblomkova N.S., Vorob'eva E.A. Predlozheniya po snizheniyu negativnogo vozdeistviya na morskuyu sredu Baltiiskogo moray [Proposals to reduce the negative impact on the marine environment of the Baltic Sea]. Ekologiya proizvodstva. 2015. No. 12: 42-47 (In Russian)

5 Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Tarbaeva V.M. et al. Obosnovanie vypolneniya rekomendatsii KhELKOM po snizheniyu biogennoi nagruzki na Finskii zaliv so storony Rossii [A scientific substantiation of the recommendations of HELCOM to reduce the nutrient load on the Gulf of Finland from Russia]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7: Geologiya. Geografiya. 2016. No. 4: 53-65 (In Russian)

6 Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N. et al. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia. Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 246: 283-288 (In English)

7 Popov V.D., Briukhanov A.Y., Subbotin I.A. Influence of agrotechnical factors on diffuse pollution of aquatic ecosystems. Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM), Saint-Petersburg, 24-26 May 2017. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017: 655-657 (In English)

8 Davuliene L., Jasineviciene D., Garbariene I. et al. Long-term air pollution trend analysis in the South-eastern Baltic region, 1981-2017. Atmospheric Research. 2021. Vol. 247: 105191.

9 Studzieniecki T. The development of cross-border cooperation in an EU macroregion – a case study of the Baltic Sea Region. Procedia Economics and Finance. 2016. Vol. 39: 235-241.

10 Kivikari U., Antola E. Baltic Sea Region – a dynamic third of Europe. Turku: City of Turku, 2004. 35 p.

11 Smol M., Preisner M., Bianchini A. et al. Strategies for sustainable and circular management of phosphorus in the Baltic Sea region: the holistic approach of the InPhos Project. Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 6: 2567.

12 Thorsøe M.H., Andersen M.S., Brady M.V. et al. Promise and performance of agricultural nutrient management policy: Lessons from the Baltic Sea. Ambio. 2021: 1-15.

13 Bai M., Flesch T., Trouvé R. et al. Gas emissions during cattle manure composting and stockpiling. Journal of Environmental Quality. 2020. Vol. 49. No. 1: 228-235.

14 Zhang N., Bai Z., Winiwarter W. et al. Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China. Environmental Science & Technology. 2019. Vol. 53. No. 20: 11840-11848.

15 Larina O.I. Sravnenie instrumentariya otsenki reguliruyushchego vozdeistviya v RF i ES [Comparing the assessment tools of regulatory impact in Russia and the EU]. Gosudarstvennyi audit. Pravo. Ekonomika. 2017. No. 2: 124-128 (In Russian)

16 Kuka K. Lehn F., Leitans L. et al. National nutrient balances in the Baltic Sea Region. Helsinki: Natural Resources Institute Finland 2019. 66 p.

17 Laakso J., Luostarinen S. Legislation and voluntary actions regulating manure fertilization in the Baltic Sea Region. Helsinki: Natural Resources Institute Finland, 2019. 69 p.

18 Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V. et al. Metodika otsenki ekologicheskoi ustoichivosti sel'skikh territorii [Method to assess environmental sustainability of rural areas]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2018. No. 96: 164-175 (In Russian)

19. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V. et al. Metody resheniya ekologicheskikh problem v zhivotnovodstve i ptitsevodstve [Methods for solving environmental problems in livestock and poultry farming]. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii. 2019. Vol. 13. No. 4: 32-37 (In Russian)

20 Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V. Metodika ukrupnennoj ocenki sutochnogo i godovogo vyhoda navoza/pometa [Methodology of integrated estimation of daily and annual output of animal/poultry manure]. Molochnohozyajstvennyj vestnik. 2014. No 1(13): 78-85 (In Russian)

21 Neumann S., Zacharias M., Stauss R., Foged H.L.: (Eds). Baltic Slurry Acidification: Market potential analysis. Uppsala: RISE - Research Institutes of Sweden, 2017. 140 p.

22 Vasileva N.S., Vorobyeva E.A., Minin V.B. et al. Analiz sostoyaniya navozokhranilishch Leningradskoi oblasti [Survey of manure storages in Leningrad Region]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019. No. 3 (100): 179-187 (In Russian)

УДК 636.2 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-128-140**

МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАВОЗА И ПОМЕТА ФЕРМЕРСКИМИ ХОЗЯЙСТВАМИ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Шалавина Е.В.,канд.техн.наук;
Васильев Э.В.,канд.техн.наук;
Уваров Р.А.,канд.техн.наук

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

Проблемы обращения с органическими отходами агропромышленного комплекса, в частности навоза и помета, особенно остро стоят в Ленинградской области, которая входит в число лидеров Российской Федерации по животноводству и птицеводству, поскольку практически вся территория области расположена на водосборном бассейне Балтийского моря. В последние годы доля мелких частных фермерских хозяйств с поголовьем от 1 до 20 условных голов в Ленинградской области возрастает. Среднее поголовье крупного рогатого скота в фермерских хозяйствах с 2006 года по 2016 год увеличилось в 2,2 раза, среднее поголовье птицы – в 6,3 раза, а поголовье свиней – в 1,8 раз. В фермерских хозяйствах за год образуется более 420000 тонн твердого органического удобрения с содержанием общего азота более 2000 тонн. Целью исследования была разработка научно обоснованных подходов и методов экологически безопасного обращения с навозом в фермерских хозяйствах – от образования навоза до внесения готового органического удобрения. В рамках проведенного исследования проанализированы все основные технологические операции обращения с навозом/пометом: транспортировка, переработка и внесение. В качестве примера приведен расчет для фермерского хозяйства крупного рогатого скота на 100 коров при подстилочном содержании животных, где за год образуется 2190 тонн твердого навоза. Для его экологически безопасной переработки в органическое удобрение методом пассивного компостирования необходима бетонированная площадка площадью не менее 3080 м^2. При применении в фермерском хозяйстве технологии биоферментации понадобится всего 1 биоферментатор барабанного типа объемом 49,23 м^3 и производительностью 6 т/сут. Для внесения готового твердого органического удобрения требуется не менее 62 га земельных угодий сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: навоз, помет, органическое удобрение, технологии обращения с навозом, фермерское хозяйство

Для цитирования: Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Уваров Р.А. Методы экологически безопасного использования навоза и помета фермерскими хозяйствами в Ленинградской области // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С. 128-140

METHODS FOR ENVIRONMENTALLY SAFE USE OF ANIMAL/POULTRY MANURE ON PRIVATE FARMS IN THE LENINGRAD REGION

E.V. Shalavina, Cand. Sc. (Engineering), R.A. Uvarov, Cand. Sc. (Engineering)
E.V. Vasilev, Cand. Sc. (Engineering),

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

The handling of organic waste, particularly animal and poultry manure generated in the agro-industrial complex, is of special concern in the Leningrad Region. On the one hand, this region ranks high in the Russian Federation's livestock and poultry farming. On the other hand, practically the whole of its territory is found within the Baltic Sea catchment area. In recent years, the share of small private farms here has demonstrated steady annual growth. In 2006-2016 such farms increased the average number of cattle by 2.2 times, the average number of poultry – by 6.3 times, and the number of pigs – by 1.8 times. The private farms generally have an animal stock from one to 20 livestock units. Every year such farms produce above 420,000 tons of solid organic fertiliser with a total nitrogen content of above 2,000 tons. The study aimed to develop scientifically grounded approaches and methods for environmentally sound manure handling on private farms along the technological chain from manure production to its application as an organic fertiliser. The study considered the main related operations – processing, transportation, and field application. The calculations concerned a cattle farm for 100 cows with bedding housing producing 2190 tons of solid manure per year. To process the manure in an environmentally safe way into an organic fertiliser by passive composting, the farm needs a concrete pad with an area of at least 3080 m^2. If the farm applies bio-fermentation technology, it will need only one drum-type bio-fermenter with a capacity of 49, 23 m^3 and throughput of 6 t/day. The farm requires at least 62 hectares of agricultural land for field application of the resulting solid organic fertilisers.

Key words: animal manure, poultry manure, organic fertiliser, manure handling, private farm

For citation: Shalavina E.V., Vasilev E. V., Uvarov R.A. Methods for environmentally safe use of animal/poultry manure on private farms in the Leningrad Region. *AgroEcoEngineeriya*. 2021. No. 3(108): 128-140 (In Russian)

Введение

Навоз и помет – это концентрированный источник азота, фосфора, калия, кальция, магния и других питательных элементов. Органическое удобрение на основе навоза и помета является ценным и незаменимым ресурсом для поддержания плодородия почв и получения качественного запланированного урожая [1-4].

Однако если навоз и помёт не используются как органическое удобрение, они теряют свои свойства, становятся источником загрязнения окружающей среды [5-7]. При ненадлежащем обращении с навозом и пометом возникает риск загрязнения воздуха, почвы, поверхностных и грунтовых вод [8-12].

Для крупных животноводческих и птицеводческих предприятий, занимающихся интенсивным разведением животных и птицы, существуют разработанные рекомендации и планы управления навозом [13-15]. Однако для фермерских хозяйств, включающих на одной производственной площадке сразу несколько видов животных и птицы, аналогичные рекомендации по экологически безопасному обращению с навозом и пометом отсутствуют. При этом доля фермерских хозяйств в Ленинградской области с каждым годом возрастает, возможное негативное воздействие с данных хозяйств также будет сказываться на состоянии Балтийского моря.

В фермерских хозяйствах содержатся такие животные, как крупный рогатый скот,

свиньи, птица (утки, гуси, индейки, куры), козы, овцы, лошади и кролики (таблица 1) [16].

Таблица 1

Поголовье сельскохозяйственных животных в % к общему поголовью (данные на конец 2019 года)

Вид животных/птицы	Сельскохозяйственные организации, %	Фермерские хозяйства, %
Крупный рогатый скот (КРС)	44.7	55.3
Коровы	41.1	58.9
Свиньи	89.1	10.9
Козы и овцы	15.7	84.3
Лошади	20	80
Птица	83.3	16.7
Кролики	13.6	86.4

Как видно из таблицы 1, больше 50% всего поголовья КРС, коз и овец, лошадей и кроликов в Российской Федерации содержится в фермерских хозяйствах.

Органическое удобрение, образуемое в фермерских хозяйствах, также может бюджетно заменить закупаемые химические и синтетические удобрения. Сколько килограмм химических (минеральных) удобрений можно заменить одной тонной навоза и помета представлено в таблице 2. При этом средний процент усвояемости растениями минеральных удобрений в среднем составляет 40%, а органических удобрений – 70%.

Таблица 2

Удобрительная ценность навоза исходной влажности различных видов животных по сравнению с минеральными удобрениями (Азофоска (нитроаммофоска) Марка NPK (МОР) 25:9:9)

1 тона удобрения на основе навоза крупного рогатого скота соответствует	19,2 кг азофоски
1 тона удобрения на основе свиного навоза соответствует	9,6 кг азофоски
1 тона удобрения на основе куриного помета соответствует	40 кг азофоски
1 тона удобрения на основе навоза лошадей соответствует	23,2 кг азофоски

Целью проводимых исследований является разработка научно обоснованных методов и подходов по экологически безопасному обращению с навозом в

фермерских хозяйствах от образования навоза до внесения органического удобрения.

Материал и методы

В рамках выполнения работы проанализировано животноводство и птицеводство в фермерских хозяйствах Ленинградской области, являющейся водосборной территорией Балтийского моря, к которой предъявляются требования Хелком [17].

За последнее десятилетие среднее поголовье крупного рогатого скота в фермерских хозяйствах с 2006 года по 2016 год увеличилось в 2,2 раза, среднее поголовье птицы в 6,3 раза, а поголовье свиней в 1,8 раз. Общее поголовье крупного рогатого скота в фермерских хозяйствах к 2020 году по Российской Федерации составило 9903 тысяч голов, поголовье свиней – 2538 тысяч голов, поголовье птицы – 87304 тысяч голов голов.

Общее поголовье животных и птицы в фермерских хозяйствах представлено в таблице 3 [16].

Таблица 3

Общее поголовье животных и птицы в фермерских хозяйствах Ленинградской области (данные на конец 2020 года)

Вид животных/птицы	Поголовье животных/птицы, гол
Крупный рогатый скот (данные на конец 2020 года)	16610
Коровы (данные на конец 2020 года)	6758
Свиньи (данные на конец 2020 года)	5368
Козы и овцы (данные на конец 2020 года)	24933
Лошади (данные на конец 2019 года)	594
Птица (данные на конец 2017 года)	491962
Кролики (данные на конец 2017 года)	28854

Наиболее распространенная технология содержания животных и птицы в фермерских хозяйствах – беспривязное содержание на подстилке. В результате данного технологического решения на выходе из животноводческих помещений образуется твердый навоз влажностью менее 75%. Всего с фермерских хозяйств за год образуется более 420000 тонн твердого органического удобрения.

Экологически безопасная работа с навозом/пометом должна осуществляться на каждой из технологических операций. Соблюдение всего технологического процесса в целом обеспечивает сохранность питательных элементов, снижение негативного воздействия на окружающую среду и прибавку урожая сельскохозяйственных культур.

В рамках проведенных исследований проанализированы все основные технологические операции, задействованные при обращении с навозом/пометом. В зависимости от вида животных/птицы и количества применяемого подстилочного материала, рассчитаны массы навоза и помета, необходимые размеры навозохранилищ и площади земельных угодий сельскохозяйственного назначения, необходимые для внесения всего твердого органического удобрения [18-19].

Масса навоза от одного животного в сутки (кг/сут) определялась по формуле 1:

$$\square_1 = \square_2 + \square_3 + \square_4 \quad (1)$$

$\square_1$ – масса навоза от 1 животного в сутки, кг/сутки;
$\square_2$ – масса экскрементов от 1 животного в сутки, кг/сут;
$\square_3$ – масса воды, попадающей в навоз в сутки, в расчете на 1 животное, кг/сут;
$\square_4$ – масса подстилочного материала на 1 животное в сутки, кг/сут;

Влажность навоза с 1 животного (%) определялась по формуле 2:

$$\square_1 = \frac{\square_2 * \square_2 + \square_3 * 100 + \square_4 * \square_4}{\square_2 + \square_3 + \square_4} \quad (2)$$

$\square_1$ – влажность навоза 1 животного, %;
$\square_2$ – влажность экскрементов 1 животного, %;
$\square_4$ – влажность применяемого подстилочного материала, %;

Результаты и обсуждение

В случае содержания в хозяйстве одновременно нескольких видов животных: свиней, крупного рогатого скота, свиней, овец, коз и других животных рекомендуется производственное здание разделить на изолированные помещения по виду животных с отдельными выходами и изолированными выгульными площадками для каждого вида животных (кроме свиней). Птицу (куры, утки, гуси, индейки, перепела) рекомендуется содержать в отдельном здании изолированно от вышеназванных животных.

При соблюдении всех экологических требований в твердом навозе,

При содержании животных на глубокой подстилке, сменяемой не чаще одного раза в месяц, навоз рекомендуется убирать с помощью бульдозера. Помимо бульдозеров в качестве мобильных средств уборки навоза могут быть использованы навозосборные агрегаты с фронтальным погрузочным ковшом или с подборщиком непрерывного действия.

транспортируемом к месту переработки со всех фермерских хозяйств Ленинградской области, может быть сохранено только общего азота более 2000 тонн.

Традиционно в фермерских хозяйствах в основном применяются технологические решения по удалению навоза и помета с минимизацией механических средств, так называемое ручное навозоудаление. Уборка навоза/помета также может осуществляться трактором класса тяги 1,4-2,0, оснащенным бульдозерной навеской или другими мобильными средствами.

Наиболее распространенной технологией переработки твердого навоза является его пассивное компостирование [20].

В зависимости от вида животных/птицы, применяемой технологии их содержания, можно получить следующее количество навоза/помета, отраженное в таблице 4.

Таблица 4

Масса навоза/помета, размеры хранилищ и необходимые площади сельскохозяйственных угодий

Поголовье животных/птицы	Вид навоза/помета	Масса навоза/помета, т/год	Размеры площадки/вместимость хранилища	Необходимо полей, га
КОРОВЫ				
10 коров	твердый	210	230 м^2	6,1
50 коров	твердый	1095	1575 м^2	31
100 коров	твердый	2190	3080 м^2	62
СВИНЬИ				
3 свиньи	жидкий	5,5	6 м^3	0,1
6 свиней	жидкий	11	11,5 м^3	0,2
10 свиней	жидкий	18,3	19 м^3	0,3
КУРЫ				
10 кур	твердый	0,45	2 м^2	0,1
30 кур	твердый	1,4	3 м^2	0,2
50 кур	твердый	2,3	3,5 м^2	0,3
70 кур	твердый	3,2	4 м^2	0,4
ЛОШАДИ				
10 лошадей	твердый	146	132 м^2	4,5
50 лошадей	твердый	730	528 м^2	21,5
100 лошадей	твердый	1460	1122 м^2	43
КОЗЫ				
50 коз	твердый	118	120 м^2	4,2
ОВЦЫ				
50 овец	твердый	70	65 м^2	2,8
УТКИ				
100 уток	твердый	18,4	21 м^2	0,8
ГУСИ				
100 гусей	твердый	19,5	23 м^2	0,9
ИНДЕЙКИ				
100 индеек	твердый	23	28 м^2	1,4

В результате проведенной работы рассчитаны массы навоза в зависимости от поголовья таких животных, как коровы, свиньи, куры, лошади, козы, овцы, утки, гуси и индейки. Для каждого вида животных в соответствии с типом образуемого

навоза/помета определены технологии переработки навоза в органическое удобрение, рассчитаны размеры бетонированных площадок для твердого удобрения и вместимости навозохранилищ для жидкого органического удобрения. Также с учетом возделываемых культур и применяемого севооборота рассчитаны необходимые минимальные площади земельных угодий сельскохозяйственного назначения для внесения всего получаемого органического удобрения.

К примеру, с фермерского хозяйства на 100 коров при подстилочном содержании животных за год образуется 2190 тонн твердого навоза. Для его экологически безопасной переработки в органическое удобрение методом пассивного компостирования необходима бетонированная площадка площадью не менее 3080 м^2. В результате переработки образуется твердое органическое удобрения, для внесения которого требуется не менее 62 га земельных угодий сельскохозяйственного назначения.

Перспективной и энергосберегающей экологической технологией переработки твердого навоза и помета является биоферментация в установках барабанного типа. В зависимости от массы получаемого твердого навоза/помета определена потребность в биоферментационных установках барабанного типа (таблица 5) [21].

Таблица 5

Потребность биоферментационных установок конкретной производительности для определенных категорий хозяйств

Показатель	Сельскохозяйственное предприятие								
	КРС							Свиньи	Птица
Поголовье животных, гол	До 200	200-400	400-600	600-800		800-1000		До 3000	До 1000
Выход навоза, т/сут	20,8	41,6	62,4	83,2		104		25,2	0,13
Объем биоферментатора, м^3	49,23	49,23	73,85	73,85	73,85	73,85	73,85	24,62	0,92
Производительность биоферментатора, т/сут	6	6	9	9	6	9	6	3	0,15
Количество необходимых биоферментаторов, шт	1	2	2	2	1	2	2	1	1

Использование биоферментационных установок барабанного типа позволяет добиться снижения влажности получаемого

органического удобрения при максимальном сохранении в нем питательных веществ. При этом сокращаются сроки переработки и затраты на строительство бетонированных площадок. Для примера, для фермерского хозяйства крупного рогатого скота на 100 коров, для переработки всего образуемого твердого навоза необходим всего 1 биоферментатор барабанного типа.

Получаемые органические удобрения должны соответствовать ГОСТ Р 53117-2008 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия».

Нормы и сроки внесения органических удобрений рассчитываются с учетом количества содержащихся в них питательных веществ и в зависимости от природно-климатических, почвенных условий, принятых в хозяйстве севооборотов, структуры посевов и требуемого уровня урожайности сельскохозяйственных культур. При расчете дозы внесения органического удобрения учтены ограничения в 170 кг азота на 1 га и в 25 кг фосфора на 1 га (таблица 4).

Внесения твердого органического удобрения на поля рекомендуется осуществлять поверхностно под запашку. Внесение может осуществляется специализированными машинами для внесения твердых органических удобрений (например, МТУ, МТТ, Титан, Joskin Tornado и др.).

Твердое органическое удобрение рекомендуется запахивать в почву в течении первых 24 часов с момента внесения, тогда выбросы в атмосферный воздух могут сократиться на 50%.

Внесение органического удобрения обеспечивает поддержание гумуса в почве, который является одним из индикаторов плодородия (таблица 6).

Таблица 6

Потребность в органических удобрениях для поддержания бездефицитного баланса гумуса в дерново-подзолистых почвах (усредненные среднегодовые показатели)

Гранулометрический состав	Потребность в органических удобрениях, т/га			Образуется гумуса из 1 т органических удобрений, кг
	% пропашных культур			
	10	20	30	
Суглинистые	10	11	13	50
Супесчаные на морене	12	12,5	13	45
Супесчаные на песке	13	14	15	40
Песчаные	15	15	18,8	35

Внесение органического удобрения в обоснованных дозах обеспечивает прибавку урожая сельскохозяйственных культур.

Выводы

Проблемы обращения с органическими отходами (навоз и помет) агропромышленного комплекса особенно остро стоят в Ленинградской области (занимающей ведущее место в Российской Федерации именно в животноводстве и птицеводстве), поскольку практически вся территория региона является водосборным бассейном Балтийского моря. В статье описаны методы и подходы по экологически безопасному обращению с навозом в фермерских хозяйствах от образования

навоза до внесения органического удобрения.

В рамках проведенной работы изучены фермерские хозяйства Ленинградской области: определены основные виды животных, проанализировано поголовье животных/птицы, рассчитаны массы навоза для разных видов животных, в соответствии с применяемой технологией содержания животных и навозоудаления определен тип навоза, обоснована технология переработки навоза в органическое удобрение, рассчитаны размеры навозохранилищ для экологически безопасной работы с навозом. Также с учетом возделываемых культур и применяемого севооборота рассчитаны необходимые минимальные площади земельных угодий сельскохозяйственного назначения для внесения всего получаемого органического удобрения.

К примеру, с фермерского хозяйства на 100 коров при подстилочном содержании животных за год образуется 2190 тонн твердого навоза. Для его экологически безопасной переработки в органическое удобрение методом пассивного компостирования необходима бетонированная площадка площадью не менее 3080 м^2. При применении в фермерском хозяйстве технологии биоферментации для переработки твердого навоза в органическое удобрение, понадобится всего 1 биоферментатор барабанного типа. В результате переработки образуется твердое органическое удобрения, для внесения которого требуется не менее 62 га земельных угодий сельскохозяйственного назначения.

В результате применение в фермерском хозяйстве описанных способов, методов и технологий, направленных на обеспечение благоприятного состояния окружающей среды, укрепление здоровья человека, сохранение и восстановление плодородия почв:

1. способствует получению фермерскому хозяйству сертификата на производство органической продукции.
2. вносит вклад в снижение нагрузки на Балтийское море.
3. способствует повышению плодородия почв и продуктивности растениеводческой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Frolova O., Priekulis J., Berzina L., Aboltins A. Trend of ammonia emissions from livestock sector in Latvia. “Engineering for Rural Development”. Proc. 19th Int. Sci. Conf. 2020. Vol.19, pp. 598- 602.

2. Syp A., Osuch D. Dairy farmers' views on environment, results of questionnaire survey from regions of Mazowsze and Podlasie in Poland. “Engineering for Rural Development”. Proc. 18th Int. Sci. Conf. 2019. Vol.18 pp. 751-757.

3. Luostarinen S., Grönroos J., Hellstedt M., Nousiainen J. Modeling Manure Quantity and Quality in Finland. Front. Sustain. Food Syst. 2018. No. 2, p. 60. DOI: 10.3389/fsufs. 2018.00060.

4. Zebartha B.J., Paul J.W., Kleeck R. Van. The effect of nitrogen management in agricultural production on water and air quality: evaluation on a regional scale. Agriculture, Ecosystems & Environment. 1999. Vol. 72, Issue 1, pp. 35- 52

5. Mieldazys R., Jotautiene E., Jasinskas A., Aboltins A. Estimation of GHG emissions from point of view of litter manure management in Lithuanian agriculture. “Engineering for Rural Development”. Proc. 19th Int. Sci. Conf. 2020. Vol.19, pp. 300-305.

6. Aboltins A., Melece L., Priekulis J. Model for ammonia emissions' assessment and comparison of various dairy cattle farming systems and technologies. Agronomy Research, 2019, Vol. 17 (2), pp. 322-332.

7. Sindhöj E., Kaasik A., Kuligowski K., Sipilä I., Tamm K., Tonderski A., Rodhe L. Manure Properties on case-study farms in the Baltic Sea Region. Report 417, Agriculture & Industry, Uppsala, Sweden: JTI, 2013, 80 p.

8. Rotz C. A. Management to reduce nitrogen losses in animal production. Journal of Animal Science, 2004. Vol. 82, Issue suppl. 13, pp. E119-E137

9. Powell J.M., Rotz C.A. Measures of nitrogen use efficiency and nitrogen loss from dairy production systems. Journal of Environmental Quality, 2015. Vol. 44(2), pp. 336-44. DOI: 10.2134/jeq2014.07.0299.

10. Hartung J., Phillips V. R. Control of gaseous emissions from livestock buildings and manure stores. Journal of Agricultural Engineering Research. 1994. Vol. 57, Issue 3, pp. 173-189

11. Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Изменение содержания азота и фосфора в жидкой фракции свиного навоза при биологической очистке // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. №85. С. 146-150.

12. Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Алгоритм принятия решений при выборе машинных технологий биоконверсии отходов животноводства // Вестник АПК Ставрополья. 2015. №1 (17). С. 366-370.

13. Брюханов А.Ю., Максимов Д.А., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Субботин И.А., Оглуздин А.С., Хухта Х., Уваров Р.А. Рекомендации по обоснованию экологически безопасного размещения и функционирования животноводческих и птицеводческих предприятий / Под ред. А.Ю. Брюханова. СПб.: ИАЭП, 2015. 52 с.

14. Manure Management Plan. A Step-by-Step Guide for Minnesota Feedlot Operators. [Электронный ресурс]. URL: https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-f8-09.pdf (дата обращения 16.08.2021)

15. Handbook on good manure management practices. [Электронный ресурс]. URL: https://www.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2019/09/Handbook.pdf (дата обращения 16.08.2021)

16. Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 16.08.2021)

17. Summary report on the development of revised Maximum Allowable Inputs (MAI) and updated Country Allocated Reduction Targets (CART) of the Baltic Sea Action Plan. 2013. [Электронный ресурс]. URL: https://helcom.fi/media/documents/Summary-report-on-MAI-CART-1.pdf (дата обращения 16.08.2021)

18. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохозяйственный вестник. 2014. № 1 (13). С. 78-85.

19. Briukhanov A. Y., Vasilev E. V., Shalavina E. V., Kucheruk O. N. Engineering solutions of environmental problems in organic waste handling. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2017. Vol. 87, ID 042001

20. РД-АПК 1.10.15.02-17 «Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помёта» [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/495876346 (дата обращения 16.08.2021)

21. Уваров Р.А. Обоснование типоразмерного ряда барабанных биоферментаторов. Технологии и технические средства механизированного

производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 94. С. 143-150.

REFERENCES

1 Frolova O., Priekulis J., Berzina L., Aboltins A. Trend of ammonia emissions from livestock sector in Latvia. “Engineering for Rural Development”. Proc. 19th Int. Sci. Conf. 2020. Vol.19: 598- 602.

2 Syp A., Osuch D. Dairy farmers' views on environment, results of questionnaire survey from regions of Mazowsze and Podlasie in Poland. “Engineering for Rural Development”. Proc. 18th Int. Sci. Conf. 2019. Vol.18: 751-757.

3 Luostarinen S., Grönroos J., Hellstedt M., Nousiainen J. Modeling Manure Quantity and Quality in Finland. Front. Sustain. Food Syst. 2018. No. 2: 60. DOI: 10.3389/fsufs. 2018.00060.

4 Zebartha B.J., Paul J.W., Kleeck R. Van. The effect of nitrogen management in agricultural production on water and air quality: evaluation on a regional scale. Agriculture, Ecosystems & Environment. 1999. Vol. 72, Issue 1: 35- 52

5 Mieldazys R., Jotautiene E., Jasinskas A., Aboltins A. Estimation of GHG emissions from point of view of litter manure management in Lithuanian agriculture. “Engineering for Rural Development”. Proc. 19th Int. Sci. Conf. 2020. Vol.19: 300-305.

6 Aboltins A., Melece L., Priekulis J. Model for ammonia emissions’ assessment and comparison of various dairy cattle farming systems and technologies. Agronomy Research, 2019, No. 17 (2): 322-332.

7 Sindhöj E., Kaasik A., Kuligowski K., Sipilä I., Tamm K., Tonderski A., Rodhe L. Manure Properties on case-study farms in the Baltic Sea Region. Report 417, Agriculture & Industry, Uppsala, Sweden: JTI, 2013: 80

8 Rotz C. A. Management to reduce nitrogen losses in animal production. Journal of Animal Science, 2004. Vol. 82, Issue suppl. 13: E119-E137

9 Powell J.M., Rotz C.A. Measures of nitrogen use efficiency and nitrogen loss from dairy production systems. Journal of Environmental Quality, 2015. No. 44(2): 336-44. DOI: 10.2134/jeq2014.07.0299.

10 Hartung J., Phillips V. R. Control of gaseous emissions from livestock buildings and manure stores. Journal of Agricultural Engineering Research. 1994. Vol. 57, Issue 3: 173-189

11 Shalavina E.V., Vasilev E.V. Izmenenie soderzhaniya azota i fosfora v zhidkoi fraktsii svinogo navoza pri biologicheskoi ochistke [Change in nitrogen and phosphorus content during biological treatment of liquid fraction of pig manure]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2014. No. 85: 146-150 (In Russian)

12 Shalavina E.V., Vasilev E.V. Algoritm prinyatiya reshenii pri vybore mashinnykh tekhnologii biokonversii otkhodov zhivotnovodstva [Decision making algorithm to choose machine technologies of livestock waste bioconversion]. Vestnik APK Stavropol'ya. 2015. No.1 (17): 366-370. (In Russian)

13 Bryukhanov A.Yu., Maksimov D.A., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Subbotin I.A., Ogluzdin A.S., Huhta Harry, Uvarov R.A. Rekomendatsii po obosnovaniyu ekologicheski bezopasnogo razmeshcheniya i funktsionirovaniya zhivotnovodcheskikh i ptitsevodcheskikh predpriyatii [Guidelines on substantiation of environmentally sound location and operation of animal and poultry

farms]. Saint Petersburg: IEEP. 2015: 52 (In Russian)

14 Manure Management Plan. A Step-by-Step Guide for Minnesota Feedlot Operators. Available at: https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-f8-09.pdf (accessed 16.08.2021)

15 Handbook on good manure management practices. Available at: https://www.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2019/09/Handbook.pdf (accessed 16.08.2021)

16 Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki [Federal State Statistics Service]. Available at: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (accessed 16.08.2021) (In Russian)

17 Summary report on the development of revised Maximum Allowable Inputs (MAI) and updated Country Allocated Reduction Targets (CART) of the Baltic Sea Action Plan. 2013. Available at: https://helcom.fi/media/documents/Summary-report-on-MAI-CART-1.pdf (accessed 16.08.2021)

18 Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V. Metodika ukrupnennoj ocenki sutochnogo i godovogo vyhoda navoza/pometa [Methodology of integrated estimation of daily and annual output of animal/poultry manure]. Molochnohozyajstvennyj vestnik. 2014. No. 1 (13): 78-85 (In Russian)

19 Briukhanov A. Y., Vasilev E. V., Shalavina E. V., Kucheruk O. N. Engineering solutions of environmental problems in organic waste handling. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2017. Vol. 87: 042001(In English)

20 Metodicheskie rekomendacii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu sistem udaleniya i podgotovki k ispol'zovaniyu navoza i pomyota RD-APK 1.10.15.02-17 [Management Directive for Agro-Industrial Complex “Recommended Practice for Engineering Designing of Systems for Animal and Poultry Manure Removal and Pre-application Treatment”]. Available at: http://docs.cntd.ru/document/495876346 (accessed 16.08.2021) (In Russian)

21 Uvarov R.A. Obosnovanie tiporazmernogo ryada barabannykh biofermentatorov [Substantiation of type and size range of drum bio-fermenters]. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2018. No. 94: 143-150 (In Russian)

УДК 631.22 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-140-154**

ОЦЕНКА НОВОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ И ОТКОРМА СВИНЕЙ

В.И. Базыкин; А.В. Трифанов канд. техн. наук;

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

В настоящее время, в России получает распространение североамериканская технология содержания свиней с комбинированным участком доращивания и откорма.

Она по сути является двухфазной технологией содержания свиней. Многолетние исследования авторов показали, что наиболее эффективными являются бесстрессовые способы содержания свиней. Однако их применение ограничено мощностью свинофермы и габаритами свинарников. Разработана новая технология с элементами бесстрессового содержания свиней для свинофермы по воспроизводству, выращиванию и откорму 12000 свиней в год с комбинированным участком опороса свиноматок и доращивания поросят-отъемышей с целью формирования гнезд поросят на стадиях подсосного периода и доращивания. Установлено, что использование новой технологии целесообразно для промышленных предприятий по производству свинины. Применение данного решения позволяет максимально ограничить влияние стрессов на поросят на самых уязвимых фазах выращивания – подсосном периоде и доращивании. По разработанной авторской методике проведено сравнение новой технологии с типовым проектом, широко распространённым в России. Критериями оценки были использование площади основного назначения и оплата площади производством мяса. Несмотря на то, что товарная масса свиней на ферме с новой технологией выше всего на 3,8%, критерий оплаты площади основного назначения в 1,4 раз выше по сравнению с базовой технологией. Применение новой трехфазной технологии с комбинированным участком опороса свиноматок и доращивания поросят-отъемышей позволит на 9,5 % снизить общую площадь содержания подсосных свиноматок, поросят-отъемышей и откормочных свиней и увеличить продуктивность поросят-отъемышей и откормочных свиней до 10%.

Ключевые слова: сельское хозяйство, свиноводство, технология, комбинированный участок

Для цитирования: Базыкин В.И., Трифанов А.В. Оценка новой трехфазной технологии выращивания и откорма свиней // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.140-154

EVALUATION OF A NEW THREE-PHASE PIG GROWING AND FATTENING TECHNOLOGY

V.I. Bazykin, A.V. Trifanov Cand. Sc. (Engineering)

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

Currently, the North American two-stage pig housing system with a wean-to-finish area is becoming widespread in Russia. The many years' research of the authors found the stress-free methods of pig housing to be the most effective. However, the capacity of pig farms and the size of pig houses limit their usage. A new technology with the elements of stress-free pig housing was developed for a pig farm for reproduction, growing and fattening of 12000 pigs per year. The housing system had a single area for both sow farrowing and completion of growing of weaned piglets to group them at the suckling and growing stages. Such a technology was found suitable for industrial-scale pork producing farms. It allowed lessening the stress on the piglets at the most vulnerable rearing stages – suckling and growing. The new technology was compared by the authors' methodology with a standard pig house design widely used in Russia. The

evaluation criteria were the use of the main-purpose area and the meat production per unit area. The market weight of pigs on the farm with the new housing system was only 3.8% higher. However, the meat production per unit area was 1.4 times bigger than that in the basic housing system. The use of the new three-phase technology with the wean-to-finish area will reduce the total area allocated for lactating sows, weaned piglets and fattening pigs by 9.5 % and increase the productivity of weaned piglets and fattening pigs by 10%.

Key words: agriculture, pig rearing, technology, multifunctional area.

For citation: Trifanov A.V., Bazykin V.I. Evaluation of a new three-phase pig growing and fattening technology *AgroEkoInzheneriya.* 2021. No. 3(108): 140-154 (In Russian)

Введение

Из анализа выполненных научных исследований, а также опыта эксплуатации свиноферм в нашей стране и за рубежом известны следующие технологии воспроизводства, выращивания и откорма свиней [1-3]:

- однофазные семейно-гнездовые;
- 2-х, 3-х и 4-х фазные традиционные;
- 2-х, 3-х, 4-х и 5-ти фазные бесстрессовые;
- успешно реализованная в России (на свинокомплексе на 11,6 тыс. свиноматок ООО «Черкизово») североамериканская технология «Хот-Слэт» с комбинированными участками доращивания и откорма (КУДО) [4, 5]. Wean to finish представляет собой такую схему содержания, при которой поросята сразу после отъема от свиноматок, переводятся в помещения свинарника-откормочника, в котором они будут находиться пока не наберут необходимый товарный вес.

Если в традиционной технологии выращивания, свиней перемещают дважды: из участка опороса на участок доращивания и с участка доращивания на участок откорма, то в технологии WTF – только один раз: из участка опороса на комбинированный участок Wean-to-Finish. Также наряду со снижением трудовых затрат, снижением смертности, увеличением производительности, более эффективным использованием полезной площади по результатам, представленным производителями, применяющими технологию WTF, свиньи достигают товарного весы зачастую до 10 дней ранее, чем при традиционной технологии содержания. Известно, что сопротивляемость организма стрессовым воздействиям сопровождается падением темпов роста живой массы растущего молодняка, повышенным уровнем выбраковки продуктивного поголовья в силу самых разнообразных причин [6].

Похожие результаты были получены на малой свиноферме на 500 свиней в год с пятифазным бесстрессовым способом содержания в фермерском хозяйстве Дмитриковой Н.И. в Тверской области [7, 8].

Двух, трех, четырех и пятифазные бесстрессовые способы содержания свиней заключаются в содержании их на стадиях опороса, доращивания и откорма одинаковую продолжительность в днях с опоросно-подсосной стадией, самоформированию сгруппированных смежных гнезд, причем перевод из секции в секцию осуществляется путем их самостоятельного свободного перехода с использованием рефлекса поиска пищи.

Эти способы обеспечивают более четкое соблюдение технологии и производственного ритма, упорядочивают

кратность использования помещений, полностью гарантируют санитарно-ветеринарное благополучие всех возрастных групп свиней, позволяют наиболее рационально использовать полезную площадь основного назначения за счет применения станочного оборудования, наиболее полно соответствующего размерам животных на каждой стадии их выращивания и откорма [9].

Материалы и методы

В новой технологии, рассматриваемой на стадии концептуального проектирования предусмотрен комбинированный участок опороса свиноматок и доращивания поросят-отъемышей КУОД, состоящий из трех свинарников, в каждом из которых размещена изолированная секция для опороса 48 свиноматок (в центральной части здания) и две изолированные секции с каждой стороны, для доращивания до 600 поросят-отъемышей каждая. Между каждой парой станков для опороса свиноматок предусмотрен межстанковый лаз для перехода и общения поросят из смежных станков. Напротив каждых двух смежных станков в межсекционных стенах секций для опороса свиноматок и доращивания поросят предусмотрены герметически закрываемые лазы, которые используются для самостоятельного непринудительного перехода поросят-отъемышей.

Сигналом к переходу поросят на 28-29 день подсосного периода является: включение освещения в секции для доращивания поросят-отъемышей, открытие межсекционных лазов одной изолированной секции для доращивания поросят, раздача кормов и открытие ограждения станков для опороса свиноматок. Переход может осуществляться в течение 1-2 дней. [10] После закрытия межсекционных лазов свиноматок перегоняют на участок для содержания холостых свиноматок и осеменения, а изолированную секцию для опороса свиноматок в течение 2-3 дней подвергают тщательной мойке, санитарному ремонту и дезинфекции. При новой технологии также, как и при технологии WTF осуществляется только один принудительный перевод поросят-отъемышей сгруппированными гнездами из изолированных секций для доращивания поросят свинарника для опороса свиноматок и доращивания поросят (КУОД) в изолированные секции для откорма свиней свинарника откормочника являющегося продолжением КУОД (через соединительный коридор).

В соответствии с основными технологическими параметрами, приведенными в таблице 1, проведен технологический расчет поголовья и количества станкомест и разработана технологическая (табл. 2) компановка свиноферм с экспликацией постановочных мест свиней, размерами секций, станков и проходов [11].

Таблица 1

Основные технологические параметры рассматриваемых технологий для свиноферм на 12 тыс. свиней в год [12].

N п/п	Наименование показателей	Разрабатываемая технология	Базовая технология Неофорс
1	Производственная программа, гол/год	11500-15000	11500-15000

	В т.ч. расчетная Основных свиноматок, гол	13275 545	13140 545
2	Ритм производства, дней	14	7
3	Количество опоросов в год от одной свиноматки	2,295	2,295
4	Продолжительность периода: - отдыха основных свиноматок, дней - условной супоросности основных свиноматок, дней - супоросности основных свиноматок, дней - акклиматизации основных свиноматок, дней - доращивания ремонтных свинок, дней - стимуляции ремонтных свинок, дней - подсосный период, дней - доращивания поросят-отъемышей, дней - откорма свиней, дней	 18 32 76 7 до 100 до 56 28-30 70 70	 18 32 76 7 до 100 до 56 32 53 95
5	Среднесуточный прирост живой массы: - подсосный период, гр/сутки - период доращивания, гр/сутки - период откорма, гр/сутки	 260 580 860	 240 450 780
6	Прохолост, %	15-25	15-25
7	Выбраковка свиноматок/хряков, %	45/45	45/45
8	Продолжительность санации помещений, дней	2-3	2-3
9	Расчётная сохранность поголовья, %: - подсосный период - период доращивания - период откорма	 94 96 98	 94 95 98
10	Размер группы свиноматок принятым к опоросам, гол	48	24
11	Количество поросят в опоросе	11-13,9	11-13,9

Оценка разрабатываемой трехфазной технологии с элементами бесстрессового содержания (КУОД) проводится в сравнении с широко распространенной в России и Белоруссии трехфазной технологией воспроизводства, выращивания и откорма 12 тыс. свиней в год (табл.2)., разработанной группой компаний «Неофорс» по авторской методике [13, 14].

Данный проект был многократно реализован, постоянно обновляется и учитывает новейшие наработки науки и практики.

Таблица 2

Технологическая компановка свиноферм с экспликацией постановочных мест, размерами секций и станков

Наименование участка	Наименование секций с экспликацией постановочных мест для содержания различных половозрастных групп животных	Количество секций и их вместимость		Размеры секций, м.		Размеры станков, м	
		Свиноферма на 12 тыс. свиней в год с КУОД	Свиноферма на 12 тыс. свиней в год ГК «Неофорс»	Свиноферма на 12 тыс. свиней в год с КУОД	Свиноферма на 12 тыс. свиней в год ГК «Неофорс»	Свиноферма на 12 тыс. свиней в год с КУОД	Свиноферма на 12 тыс. свиней в год ГК «Неофорс»
1ПС	Секция для условно супоросных, холостых, осеменяемых и ремонтных свиноматок на доращивании в индивидуальных станках, хряков пробников в индивидуальных станах и ремонтных свинок на стимуляции	1 секция на 208 мест для холостых, условно-супоросных и ремонтных свиноматок и 2 места для хряков-пробников	1 секция на 208 мест для холостых, условно-супоросных и ремонтных свиноматок и 2 места для хряков-пробников	$L_C = 29,4$ $B_C = 24,3$	$L_C = 29,4$ $B_C = 24,3$	$l_{CC} = 2,2$ $b_{CC} = 0,65$ $l_{CXП} = 2,2$ $b_{CXП} = 3,0$ $l_{PC} = 5,4$ $b_{PC} = 3,2$	$l_{CC} = 2,2$ $b_{CC} = 0,65$ $l_{CXП} = 2,2$ $b_{CXП} = 3,0$ $l_{PC} = 5,4$ $b_{PC} = 3,2$
2ПС	Секция для супоросных свиноматок 2-го периода супоросности	1 секция на 280 супоросных свиноматок	1 секция на 280 супоросных свиноматок	$L_C = 36,0$ $B_C = 24,3$	$L_C = 36,0$ $B_C = 24,3$	$l_C = 5,4$ $b_C = 4,5$	$l_C = 5,4$ $b_C = 4,5$
КУОД	Секция для подсосных свиноматок	3 секции на 48 подсосных	6 секций на 24 подсосных	$L_C = 45,6$	$L_C = 14,4$	$l_C = 2,4$	$l_C = 2,4$

		свиноматок каждая	свиноматок каждая	B_C = 7,36	B_C = 10,8	b_C = 1,8	b_C = 1,8
	Секция для доращивания поросят-отъемышей	6 секций на 600 поросят-отъёмышей каждая	8 секций на 313 поросят-отъёмышей каждая	L_C = 45,6 B_C = 5,4	L_C = 13,1 B_C = 10,8	l_C = 4,4 b_C = 1,8	l_C = 3,7 b_C = 2,7
Откорм свиней	Секция для откорма свиней в групповых станках	6 секций на 600 откормочных свиней каждая	14 секций на 300 откормочных свиней каждая	L_C = 60,0 B_C = 9,08	L_C = 23,8 B_C = 10,8	l_C = 5,0 b_C = 4,0	l_C = 5,4 b_C = 4,1
ПИО	Секция для хряков производителей	1 секция на 12 хряков-производителей	1 секция на 12 хряков-производителей	L_C = 10,8 B_C = 10,5	L_C = 10,8 B_C = 10,5	l_C = 2,7 b_C = 2,6	l_C = 2,7 b_C = 2,6
	Манеж для отбора спермы, помывочная, склад кормов для хряков	1/1/1	1/1/1	L = 10,8 B = 3,5	L = 10,8 B = 3,9	-	-
	Лаборатория	1	1	L = 10,8 B = 4,0	L = 10,8 B = 4,1	-	-
АБК	Административные помещения	1	1	L = 18,5 B = 10,8	L = 18,5 B = 10,8	-	-

В таблице 2 ширина проходов принята в соответствии с РД-АПК 1.10.02.04-12, а длина проходов в соответствии с длиной изолированных секций.

В качестве критерия выбора технологических планировочных решений на начальной стадии концептуального проектирования приняты: $F_{пон}$ - использования площади основного назначения (м^2×дни) и критерий оплаты площади основного назначения производством мяса - $К_м$ (кг/м^2×дни) [15, 16].

Критерий оплаты площади основного назначения производством мяса определяется по формуле:

$$K_M = \frac{M_T}{F_{ПОН}}, \frac{кг}{м^2 \times дни} \quad (1)$$

где $М_т$ – товарная (живая) масса выращенных свиней в год, кг.

Так как содержание взрослого маточного стада (холостых, ремонтных, свиноматок 1-го и 2-го периодов супоросности будет осуществляться в таком-же здании, как и в проекте-аналоге свинофермы на 12 тыс. свиней в год группы компаний «Неофорс», $F_{пон}$ определяется по формуле 2 только в свинарниках для опороса свиноматок, выращивания поросят-сосунок, доращивания поросят-отъемышей и откорма свиней.

$$F_{ПОНЗф} = F_{ОЗф} + F_{ПЗф} + F_{ДЗф}, м^2 \times дни \quad (2)$$

где: $F_{О3ф}$ – показатель использования станковой площади, м^2×дн;

$F_{П3ф}$ – показатель использования площади проходов, м^2×дн;

$F_{Д3ф}$ – показатель использования дополнительной площади, необходимой для чистки, мойки, санитарного ремонта и дезинфекции помещений и станочного оборудования после завершения производственного цикла, м^2×дн.

Для технологических планировочных решений свинарников для опороса свиноматок, выращивания поросят-сосунов, доращивания поросят-отъемышей и откорма свиней, разрабатываемых на стадии концептуального проектирования свинофермы по воспроизводству, выращиванию и откорму 12 тыс. свиней с элементами бесстрессового содержания (КУОД) и сравниваемой свинофермой на 12 тыс. свиней в год группы компаний «Неофорс» $F_{О3ф}$ определяется по формуле:

$$F_{О3ф} = N_{СОП} \times (n_{СОП} \times (l_{СОП} \times h_{СОП})) \times n_{ДОП} + N_{СД} \times (n_{СД} \times (l_{СД} \times h_{СД})) \times n_{ДД} + \\ + N_{СО} \times (n_{СО} \times (l_{СО} \times h_{СО})) \times n_{ДО}, м^2 \times дни \quad (3)$$

где: $N_{соп}$ – количество изолированных секций для опороса свиноматок и выращивания поросят-сосунов;

$n_{соп}$ – количество станков в каждой изолированной секции для опороса свиноматок и выращивания поросят-сосунов;

$l_{соп}$ – длина станка для опороса свиноматок и выращивания поросят-сосунов, м;

$h_{соп}$ – глубина станка для опороса свиноматок и выращивания поросят-сосунов, м;

$n_{доп}$ – продолжительность содержания подсосных свиноматок с поросятами-сосунами, дней;

$N_{сд}$ – количество изолированных секций для доращивания поросят-отъемышей;

$n_{сд}$ – количество станков в каждой изолированной секции для доращивания поросят-отъемышей;

$l_{сд}$ – длина станка для доращивания поросят-отъемышей, м;

$h_{сд}$ – глубина станка для доращивания поросят-отъемышей, м;

$n_{дд}$ – продолжительность доращивания поросят-отъемышей, дней;

$N_{со}$ – количество изолированных секций для откорма свиней;

$n_{со}$ – количество станков в каждой изолированной секции для откорма свиней;

$l_{со}$ – длина станка по фронту кормления для откорма свиней, м;

$h_{со}$ – глубина станка для откорма свиней, м;

$n_{до}$ – продолжительность откорма свиней, дней.

По формуле 3 также определяем показатель использования станковой площади для разрабатываемой трехфазной технологии с элементами бесстрессового содержания – $F_{О3фэб}$ и трехфазной технологии объекта-аналога – свинофермы на 12 тыс. свиней группы компаний Неофорс – $F_{О3фН}$

Коэффициент характеризующий отношение площади проходов технологических планировочных решений для проектируемой и аналогичной технологии определяется по формуле:

$$\delta_{3фэб,3фн} = \frac{\sum f_{П3фэб,3фн}}{\sum f_{С3фэб,3фн}} \quad (4)$$

где: $\sum f_{П3фэб,3фн}$ - суммарная площадь проходов технологических планировочных решений для проектируемой и сравниваемой технологии, м^2;

$\sum f_{С3фэб,3фн}$ - общая площадь секций для содержания всех возрастных групп свиней технологических планировочных решений для проектируемой и сравниваемой технологии, м^2.

Показатель использования площади проходов $F_{П3фэб,3фн}$ для планировочных решений для проектируемой и сравниваемой технологии определяется по формуле:

$$F_{П3фэб,3фн} = \delta_{3фэб,3фн} \times F_{О3фэб,3фн} \quad (5)$$

Суммарная площадь проходов для проектируемого технологического планировочного решения определяется по формуле:

$$\sum f_{П3фэб} = N_{СОП} \times \left[n_{пр} \times \left(l_{ПРСОП} \times b_{ПРСОП} \right) + n_{пп} (l_{ППСОП} \times b_{ППСОП} \right] + N_{СД} \times n_{пр} (l_{ПРСД} \times b_{ПРСД}) + N_{СО} \times n_{пр} (l_{ПРСО} \times b_{ПРСО}), м^2 \quad (6)$$

$n_{пр}$ – количество продольных проходов

$n_{пр}$ – количество поперечных проходов

$l_{прсоп}$, $l_{прсд}$ и $l_{прсо}$ – длина продольного внутрисекционного прохода в изолированных секциях для опороса свиноматок, доращивания поросят-отъемышей и откорма свиней соответственно, м;

$b_{прсоп}$, $b_{прсд}$ и $b_{прсо}$ – ширина продольного внутрисекционного прохода в изолированных секциях для опороса свиноматок, доращивания поросят-отъемышей и откорма свиней соответственно, м;

$l_{ппсоп}$ и $b_{ппсоп}$, - длина и ширина поперечного внутрисекционного прохода в изолированных секциях для опороса свиноматок, м.

Суммарная площадь проходов для сравниваемого технологического планировочного решения определяется по формуле:

$$\sum f_{ПЗфН} = L_{ЦПСОП} \times B_{ЦПСОП} + N_{СОП} \times n_{пр} \times \left(l_{ПРСОП} \times b_{ПРСОП}\right) + \\ + L_{ЦПСД} \times B_{ЦПСД} + N_{СД} \times n_{пр} \times \left(l_{ПРСД} \times b_{ПРСД}\right) + n_{пп}(l_{ППСД} \times b_{ППСД}) + \\ L_{ЦПСО} \times B_{ЦПСО} + N_{СО} \times n_{пр} \times \left(l_{ПРСО} \times b_{ПРСО}\right), м^2 \quad (7)$$

Суммарная станковая площадь секций для содержания подсосных свиноматок, поросят-сосунов, поросят-отъемышей и откорма свиней определяется по формуле:

$$\sum f_{СЗф} = N_{СОП} \times \left(l_{СОП} \times h_{СОП}\right) + + N_{СД} \times \left(l_{СД} \times h_{СД}\right) + N_{СО} \times \left(l_{СО} \times h_{СО}\right), м^2 \quad (8)$$

Показатель использования дополнительной площади $F_д$ на очистку, мойку, санитарный ремонт и дезинфекцию помещений для содержания всех возрастных групп свиней определяется по формуле:

$$F_Д = \frac{F_О + F_П}{T} \times T_Д \times Ф, м^2 \times дни \quad (9)$$

где: Т – продолжительность выращивания свиней от рождения до завершения откорма и достижения товарной массы, дней;

$T_д$ – продолжительность очистки, мойки, санитарного ремонта и дезинфекции секций, дней;

Ф – фазность способа содержания.

Результаты и обсуждение

Результаты определения $F_{пон}$ в свинарниках для опороса свиноматок, выращивания поросят-сосунов, доращивания поросят-отъемышей и откорма свиней в год разрабатываемой трехфазной технологии с элементами бесстрессового содержания (КУОД) в сравнении с трехфазной, разработанной группой компаний «Неофорс» приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели использования площади основного назначения для свинофермы по воспроизводству, выращиванию и откорму 12 тыс. свиней в год с различными технологиями

Разрабатываемая и сравниваемая технологии производства свинины	Показатели использования площади основного назначения за цикл, $F_{пон}$, м^2×дни			
	Всего	В том числе		
	$F_{пон}$	$F_о$	$F_п$	$F_д$
Традиционная трехфазная технология выращивания и откорма 12 тыс. свиней в год разработки группы компаний «Неофорс»	543259,3	424090,06	93299,8	25869,44
Разрабатываемая трехфазная технология выращивания и откорма 12 тыс. свиней в год с элементами бесстрессового содержания	392279,17	302890,77	69664,87	19723,53
Снижение, раз	1,38	1,4	1,34	1,31

Из таблицы 3 видно, что технологические планировочные решения с элементами бесстрессового содержания свиней (КУОД) предпочтительнее, так как по показателю использования площади основного назначения и ее составляющих, она значительно эффективнее – в 1,31 – 1,4 раза.

Результаты оценки технологий содержания свиней по критерию оплаты площади производством мяса представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения критерия оплаты площади производством мяса для разрабатываемой и сравниваемой технологий содержания свиней

Технология содержания	$F_{пон}$, м^2×дни (за год)	Товарная масса свиней в год, $М_т$, кг	$К_м$, кг/м^2×дни	Товарная масса свиней (с учетом выбракованных и ремонтных свиноматок) в год, $М_т$, кг	$К_м$ (с учетом реализации выбракованных и ремонтных свиноматок), кг/м^2×дни
Традиционная трехфазная технология выращивания и	543259,3	1405903	2,58	1481216	2,73

откорма 12 тыс. свиней в год разработки группы компаний «Неофорс»					
Разрабатываемая трехфазная технология выращивания и откорма 12 тыс. свиней в год с элементами бесстрессового содержания	392279,17	1420425	3,62	1497813	3,81

Выводы

Несмотря на то, что товарная масса свиней на проектируемой ферме выше всего на 3,8%, критерий оплаты площади основного назначения для свинофермы на 12 тыс. свиней в год с новой технологией выращивания поросят-отъемышей (КУОД) в 1,4 раза эффективнее в сравнении с базовой технологией.

Применение новой трехфазной технологии с КУОД позволит на 9,5 % снизить общую площадь содержания подсосных свиноматок, поросят-отъемышей и откормочных свиней, и увеличить продуктивность поросят-отъемышей и откормочных свиней до 10%.

Кроме того, значительно снижаются затраты труда за счет самоформирования сгруппированных гнезд и самостоятельного перемещения поросят сгруппированными гнездами.

Преимуществом новой технологии также является наличие, в отличии от базовой технологии, в каждой изолированной секции для доращивания поросят и откорма свиней по 2 санитарных станка на 15 голов для содержания больных и отстающих в росте поросят-отъемышей, и откормочных свиней.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трифанов А.В., Калюга В.В., Базыкин В.И. Состояние и тенденции развития производства свинины в Российской Федерации // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2016. № 90. С. 5-14.

2. Калюга В.В., Трифанов А.В., Базыкин В.И., Привалов М.Н. Стратегия машино-технологического обеспечения производства свинины в крестьянских и фермерских хозяйствах на период до 2020 года // *Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования.* Сб. науч. трудов по материалам научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПбГАУ. (Санкт-Петербург-Пушкин, 28-29.01. 2010 г.) СПб.: СПбГАУ. 2010. С. 232-234.

3. Калюга В.В., Базыкин В.И., Привалов М. Современные энергоресурсосберегающие технологии и

технические средства воспроизводства, выращивания и откорма свиней в крестьянских и фермерских хозяйствах // *Главный зоотехник.* 2010. № 3. С. 39-44.

4. Свинарев И.Ю., Нэер А. Комбинированный участок доращивания и откорма (КУДО) // *Свиноводство*. 2019. № 6. С. 13-16.

5. Свинарев И.Ю., Хирон Б., Бусов А.А. Технологическое проектирование и опыт эксплуатации репродуктора на 11,6 тыс. свиноматок // *Свиноводство*. 2019. № 1. С. 27-30.

6. Водянников В.И., Шкаленко В.В. Профилактика технологических стрессов на заключительном откорме молодняка свиней // *Свиноводство*. 2017. № 2. С. 23-24.

7. Калюга В.В., Базыкин В.И., Тихонов Е.А., Зайцева М.И. Графическое и математическое моделирование пятифазной бесстрессовой технологии воспроизводства, выращивания и откорма свиней // *Resources and Technology*. 2014. Т.11. №1. С. 66-76.

8. Калюга В.В., Базыкин В.И. Результаты исследования пятифазной бесстрессовой технологии воспроизводства, выращивания и откорма свиней // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2014. № 85. С. 100-108.

9. Калюга В.В., Базыкин В.И., Привалов М.Н. Моделирование пятифазной бесстрессовой технологии воспроизводства, выращивания и откорма свиней // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства.* 2013. № 4 (12). С. 16-22.

10. Kaljuga V., Kara I., Nikolaev S., Bazykin V. Stress free technology for low and medium capacity pig farms of peasant and farm husbandries of Russia // *Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry*. Proc. XXXIV CIOSTA CIGR V Conf. 20 June-1 July 2011. Vienna, Austria: University of Natural Resources and Applied Life Sciences. 2011. pp. 337-338.

11. Калюга В.В., Базыкин В.И. Основы технологического расчёта малой свинофермы с бесстрессовым способом содержания свиней и определение её габаритов // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. СПб. 2012. №27. С. 293-300.

12. Комлацкий Г.В. *Индустриализация и интенсификация отрасли свиноводства на юге России.* Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук. Черкесск: СтГАУ. 2014. 48 с.

13. Kalyuga V., Trifanov A., Bazykin V. Justification of choice of stress-free pig housing method on small-scale farms at designing stage. // *Engineering for Rural Development*. Proc. 18th Int. Sci. Conf. May, 22-24, 2019. Jelgava, Latvia: LLU. 2019. pp. 349-354. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N164.

14. Калюга В.В., Трифанов А.В., Базыкин В.И. Обоснование пятифазного бесстрессового способа содержания свиней на малых фермах на стадии проектирования. // *Свиноводство*. 2018. № 8. С. 17-20.

15. Базыкин В.И., Калюга В.В., Трифанов А.В. Критерии оценки и выбора проектно-технологических решений свиноводческих предприятий // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2016. № 90. С. 132-139.

16. Калюга В.В., Базыкин В.И., Трифанов А.В. Методика выбора бесстрессового способа содержания свиней на стадии концептуального проектирования малых свиноферм // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 208-216. DOI: 10.24411/0131-5226-2018-10049.

REFERENCES

1. Trifanov A.V., Kalyuga V.V., Bazykin V.I. Sostoyanie i tendentsii razvitiya proizvodstva svininy v Rossiiskoi Federatsii [Current state and trends of pork production in the Russian Federation]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. No. 90: 5-14 (In Russian)

2. Kalyuga V.V., Trifanov A.V., Bazykin V.I., Privalov M.N. Strategiya mashino-tekhnologicheskogo obespecheniya proizvodstva svininy v krest'yanskikh i fermerskikh khozyaistvakh na period do 2020 goda [Strategy of machine and technological support for pork production in peasant and farm enterprises for the period until 2020]. *Nauchnoe obespechenie razvitiya APK v usloviyakh reformirovaniya* [Scientific support for the development of the agro-industrial complex in the context of reform]. Collection of papers by the materials of the scientific conference (Saint Petersburg-Pushkin, 28-29. 01. 2010) Saint Petersburg: SPbSAU. 2010: 232-234 (In Russian)

3. Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Privalov M. Sovremennye energoresursosberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskie sredstva vosproizvodstva, vyrashchivaniya i otkorma svinei v krest'yanskikh i fermerskikh khozyaistvakh [Modern energy and resource saving technologies, machines and equipment of pig reproduction, growing and fattening in peasant and private farms]. *Glavnyi zootekhnik*. 2010. No. 3: 39-44 (In Russian)

4. Svinarev I.Yu., Neer A. Kombinirovannyi uchastok dorashchivaniya i otkorma (KUDO) [Technology of growing pigs on wean-to-finish farms]. *Svinovodstvo*. 2019. No. 6: 13-16 (In Russian)

5. Svinarev I.Yu., Khiron B., Busov A.A. Tekhnologicheskoe proektirovanie i opyt ekspluatatsii reproduktora na 11,6 tys. svinomatok [Technological design and operation of a sow unit for 11 600 sows]. *Svinovodstvo*. 2019. No. 1: 27-30 (In Russian)

6. Vodyannikov V.I., Shkalenko V.V. Profilaktika tekhnologicheskikh stressov na zaklyuchitel'nom otkorme molodnyaka svinei [Prevention of technological stresses in the final fattening of young pigs]. *Svinovodstvo*. 2017. No. 2: 23-24 (In Russian)

7. Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Tikhonov E.A., Zaitseva M.I. Graficheskoe i matematicheskoe modelirovanie pyatifaznoi besstressovoi tekhnologii vosproizvodstva, vyrashchivaniya i otkorma svinei [Graphic and mathematical modelling of a five-phase stress-free technology for pig reproduction, growing and fattening]. *Resources and Technology*. 2014. Vol.11. No.1: 66-76 (In Russian)

8. Kalyuga V.V., Bazykin V.I. Rezul'taty issledovaniya pyatifaznoi besstressovoi tekhnologii vosproizvodstva, vyrashchivaniya i otkorma svinei [Investigation results of five-phase stress-free technologyof pig reproduction, growing and fattening]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2014. No. 85: 100-108 (In Russian)

9. Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Privalov M.N. Modelirovanie pyatifaznoi besstressovoi tekhnologii vosproizvodstva, vyrashchivaniya i otkorma svinei [Simulation of five-phase stress-free technology of pig reproduction, growing and finishing]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2013. No. 4 (12): 16-22 (In Russian)

10. Kaljuga V., Kara I., Nikolaev S., Bazykin V. Stress free technology for low and medium capacity pig farms of peasant and farm husbandries of Russia // *Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry*. Proc. XXXIV CIOSTA CIGR V Conf. 20 June-1 July 2011. Vienna, Austria:

University of Natural Resources and Applied Life Sciences. 2011: 337-338 (In English)
11. Kalyuga V.V., Bazykin V.I. Osnovy tekhnologicheskogo rascheta maloi svinofermy s besstressovym sposobom soderzhaniya svinei i opredelenie ee gabaritov [Basics of technological calculation of a small pig farm with a stress-free method of pig housing and determining farm dimensions]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. No. 27: 293-300 (In Russian)
12. Komlatskii G.V. Industrializatsiya i intensifikatsiya otrasli svinovodstva na yuge Rossii [Industrialisation and intensification of the pig industry in the south of Russia]. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora sel'skokhozyaistvennykh nauk [Author's Abstract of Doctoral Thesis]. Cherkessk: StGAU. 2014: 48 (In Russian)
13. Kalyuga V., Trifanov A., Bazykin V. Justification of choice of stress-free pig housing method on small-scale farms at designing stage. *Engineering for Rural Development*. Proc. 18th Int. Sci. Conf. May, 22-24, 2019. Jelgava, Latvia: LLU. 2019: 349-354 (In English) DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N164.
14. Kalyuga V.V., Trifanov A.V., Bazykin V.I. Obosnovanie pyatifaznogo besstressovogo sposoba soderzhaniya svinei na malykh fermakh na stadii proektirovaniya [Justification of the five-phase stress-free method of fattening pigs on small farms]. *Svinovodstvo*. 2018. No. 8: 17-20 (In Russian)
15. Bazykin V.I., Kalyuga V.V., Trifanov A.V. Kriterii otsenki i vybora proektno-tekhnologicheskikh reshenii svinovodcheskikh predpriyatii [Assessment and selection criteria of design and technological solutions for pig farms]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016. No. 90: 132-139 (In Russian)
16. Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Trifanov A.V. Metodika vybora besstressovogo sposoba soderzhaniya svinei na stadii kontseptual'nogo proektirovaniya malykh svinoferm [Methodology to select the stress-free method of pig housing at the conceptual designing stage of small-scale pig farms]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018. No. 95: 208-216 (In Russian) DOI: 10.24411/0131-5226-2018-10049.

УДК 631.22 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-154-163**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА КОРОВНИКА ПЕРЕНОСНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

В.Ф. Вторый, д-р техн. наук, Р.М. Ильин
С.В. Вторый, канд. техн. наук,

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

В свете текущих вызовов глобального потепления и роста продуктивности коров проблема теплового стресса животных становится одной из важнейших в животноводстве. Для оценки работы систем вентиляции, выявления проблемных зон в коровниках и снижения

риска возникновения теплового стресса у коров необходим мониторинг состояния воздушной среды. В связи с этим целью исследования была оценка параметров микроклимата в животноводческих помещениях в летний период с помощью переносного измерительного комплекса ПИК-4. Исследование было проведено на двух фермах в Ленинградской области с беспривязным способом содержания животных в коровниках с системой естественной вентиляции, то есть притоком воздуха через светоаэрационный конек, окна и ворота. В каждом исследуемом помещении содержалось по четыре технологические группы дойных коров разного периода лактации. Исследования показали, что переносной измерительный комплекс ПИК-4 позволил проводить измерения четырех основных параметров микроклимата – температуру и относительную влажность воздуха, концентрацию парниковых газов CO_2 и NH_3 в целях оценки микроклимата в помещении на его соответствие зоотехническим требованиям. В летний период при температурах наружного воздуха выше + 28 °С и относительной влажности воздуха до 60% тепературно-влажностный индекс THI был равен 76-81, что свидетельствовало о тепловом стрессе для животных и снижало их продуктивность. В этих условиях применение дополнительной вентиляции с созданием водяного тумана уменьшало тепловую нагрузку на животных, но было недостаточно для обеспечения необходимых комфортных условий для животных и обслуживающего персонала.

Ключевые слова: коровник, микроклимат, тепловой стресс, температурно-влажностный индекс.

Для цитирования: Вторый В.Ф., Вторый С.В., Ильин Р.М. Исследование параметров микроклимата коровника переносным измерительным комплексом // *АгроЭкоИнженерия.* 2021. № 3 (108). С.154-164

STUDY OF THE BARN INSIDE CLIMATE PARAMETERS WITH A PORTABLE MEASURING COMPLEX

V.F. Vtoryi, DSc (Engineering), R.M. Ilyn
S.V. Vtoryi, Cand. Sc. (Engineering),

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

In light of the current challenges of global warming and cow productivity growth, heat stress in animals is becoming a crucial problem in animal husbandry. The monitoring of the inside air environment is required to estimate the ventilation performance, identify the bottlenecks in the barns and reduce the risk of heat stress in cows. In this regard, the study aimed to assess the microclimate parameters in the livestock houses in summer using a PIK-4 portable measuring complex. The study was conducted on two farms in the Leningrad Region in the cow barns with a loose housing system and a natural ventilation system – with the air inflow through a light aeration ridge, windows and gates. Four technological groups of dairy cows of different lactation periods were housed in each cow barn. According to the study results, the PIK-4 portable measuring complex allowed measuring four main parameters of the inside climate – air temperature and relative humidity and the concentration of greenhouse gases – carbon dioxide and ammonia to

assess its compliance with zootechnical requirements. In summer, under the outdoor temperatures above + 28 °C and relative air humidity up to 60%, the temperature-humidity index (THI) was 76-81, which indicated the heat stress for animals and reduced their productivity. Under these conditions, the use of additional ventilation and generation of water mist reduced the heat load on the animals but was not enough to provide the necessary comfortable conditions for the animals and service personnel.

Key words: cow barn, inside climate, heat stress, temperature and humidity index

For citation: Vtoryi V.F., Vtoryi S.V., Ilyn R.M. Study of the barn inside climate parameters with a portable measuring complex. *AgroEkoInzheneriya*. 2021. No. 3(108): 154-164 (In Russian)

Введение

В свете актуальной проблемы глобального потепления и роста продуктивности коров, проблема теплового стресса в настоящее время становится одной из важнейших в животноводстве. Воздействие высоких температур на состояние коров исследовано рядом авторов в разных странах мира [1-5]. Колебания температуры воздуха в коровнике в диапазоне от +5 °С до +20,0 °С при относительной влажности от 40% до 80% считаются термонейтральными значениями, такие параметры воздушной среды не оказывают отрицательного влияния на общее состояние коров. Однако с ростом этих значений, они вызывают физиологические или поведенческие изменения у животных, представляющие собой реакцию на тепловой стресс. Необходимо отметить что, высокопродуктивные коровы в большей степени подвержены тепловому стрессу [6]. Тепловой стресс является фактором, вызывающим снижение потребления кормов животными, одновременно увеличивая потребление воды, что значительно сказывается на их продуктивности [7].

Так же существует проблема с обеспечением оптимального микроклимата в современных коровниках, из-за больших габаритов. Предусмотренные в них системы естественной вентиляции через аэрационный конек, окна и ворота, способны обеспечить оптимальные параметры микроклимата коровника только в узком диапазоне наружных температур. Проблемы с функциональностью таких систем возникают зимой при температурах ниже -15 °С, и летом, когда наружный воздух прогревается выше +30 °С. Устранение этих проблем предполагает использование дополнительных систем вентиляции, которые требуют значительных финансовых и энергозатрат [8].

К контролируемым параметрам в животноводческом помещении относится не только температура и относительная влажность, но и газовый состав воздуха, а именно концентрации углекислого газа и аммиака. Отмечается что, увеличение концентрации аммиака на 1 мг/м^3 и на 2% влаги в воздухе коровника, влечет за собой снижение продуктивности коровы на 1,7% [9].

Для оценки работы систем вентиляции и выявления проблемных зон в коровниках и снижения риска возникновения теплового стресса у коров необходим мониторинг состояния воздушной среды. В связи с этим, целью исследований является оценка параметров микроклимата в животноводческих помещениях в летний период с помощью переносного измерительного комплекса ПИК-4.

Материалы и методы

Проведены исследования параметров микроклимата коровника на двух фермах

Ленинградской области с беспривязным способом содержания. В коровниках естественная система вентиляции, приток воздуха через светоаэрационный конек, окна и ворота. В каждом исследуемом помещении содержится по 4 технологические группы дойных коров разного периода лактации.

Мониторинг проводился с помощью переносного измерительного комплекса ПИК-4, показанного на рисунке 1. Он представляет собой цилиндрический блок, в котором конструктивно совмещены четыре датчика (температуры и влажности 1, концентрации углекислого газа 2 и аммиака 3) с регистрирующим устройством 4 (ОВЕН - МСД 200).

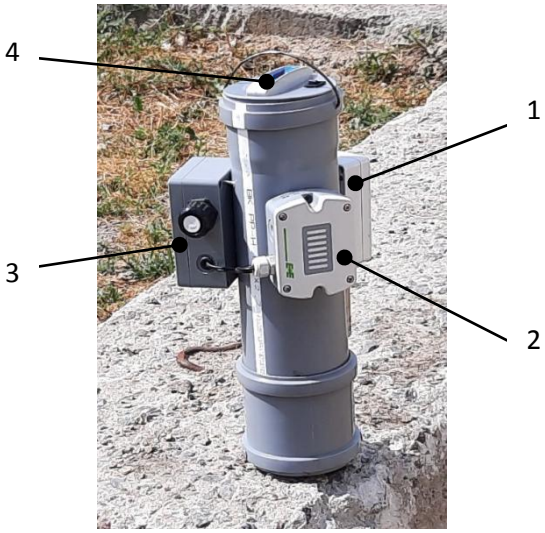


Рис. 1. Переносной измерительный комплекс ПИК-4

Используемые типы датчиков:

- датчик ДВТ-02 температуры и влажности – с пределами измерений от – 40 до +50 ºС и от 0 до 100%, с относительными погрешностями ± 1,0 ºС и ± 3%;

- датчик EE85 концентрации углекислого газа - с пределами измерений от 0 до 5000 ppm, с относительной погрешностью ± (50 ppm + 3% от измеренного значения);

- датчик Астра-Д концентрации аммиака - с пределами измерений от 0 до 60 мг/м^3, с относительной погрешностью не более 25% [9].

Все регистрируемые данные записываются в файл, с интервалом времени 10 секунд, на съемный носитель в формате *.xls.

Измерения проводились на двух уровнях (рисунки 2 и 3): первое – 30 см от пола, что соответствует нахождению животного в положении лежа, и второе 1,5 метра от пола, животное стоит.

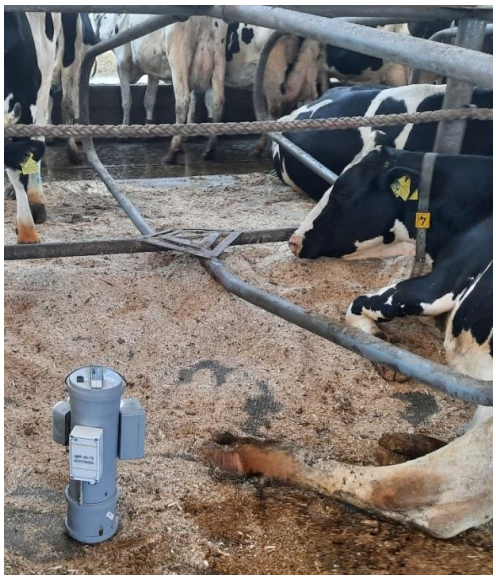


Рис. 2. Замер на уровне 30 см

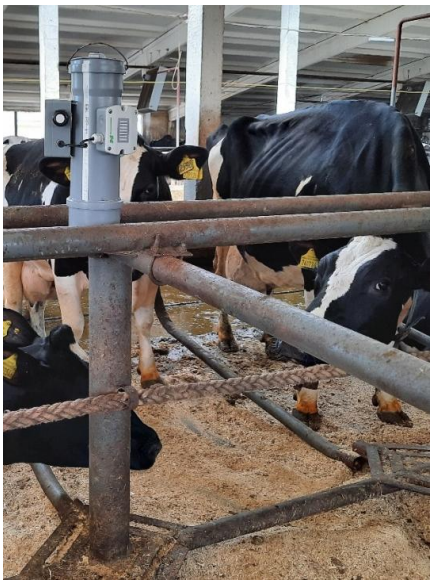


Рис. 3. Замер на уровне 1,5 метра

Измерения параметров воздушной среды (температуры, влажности воздуха, концентрации углекислого газа и аммиака) проведены в соответствии со схемами (рисунок 4): коровник №1 - в 2х точках на улице и 13 точках по длине и ширине коровника; коровник №2 - в 2х точках на улице и 17 точках по длине и ширине коровника.

14 Север

1	2		3	4
5	6	13	7	8
9	10		11	12

15 Юг

Коровник №1

18 Север

1	2		3	4
5	6		7	8
		17		
9	10		11	12
13	14		15	16

19 Юг

Коровник №2

Рис. 4. Схема измерений в коровниках №1 и 2 с указанными точками

В дополнение к естественной системе вентиляции через светоаэрационный конек, окна и ворота, в коровниках установлены вентиляторы (рисунок 5). Так же в коровнике №2 установлена система охлаждения воздуха туманом (рисунок 6). Во время проведения замеров все ворота и окна были открыты, вентиляторы работали.

Рис.5. Вентилятор Рис. 6. Система охлаждения воздуха

Обработка результатов исследований производится известными методами математической статистики с определением средних значений исследуемых величин за установленные временные периоды в программе MS Excel.

Состояние микроклимата в помещениях и комфортность животных определяем расчетом температурно-влажностного индекса (THI) по уравнению [8].

$$THI = 1,8 \times T - (1 - HR / 100) \times (T - 14,3) + 32,$$

где T - температура воздуха, °C, HR - относительная влажность, %.

Значения THI: 68-71 начало теплового стресса; 72-79 легкий тепловой стресс; 80-89 сильный тепловой стресс; 90 и более - жесткий тепловой стресс [1].

Результаты и обсуждение

Значительное влияние на формирование микроклимата коровника оказывают внешние погодные условия.

В период проведения исследований в районе коровника №1:

- 13 июля 2021 года температура воздуха составляла +30,7 ºС при относительной влажности 43%, концентрация CO_2 - 433 ppm, NH_3 - 0,1 мг/м^3;
- 15 июля 2021 года температура воздуха составляла +36,7 ºС при относительной влажности 36%, концентрация CO_2 - 470 ppm, NH_3 - 0,1 мг/м^3.

При мониторинге параметров микроклимата в коровнике №1 в соответствии со схемой (рисунок 4) зафиксированы значения, представленные в таблице 1.

Анализ полученных результатов измерений показал, что температура воздуха в коровнике была на 2-3 °C ниже температуры наружного воздуха при разнице относительной влажности воздуха около 5%. Расчетами температурно-влажностного индекса (THI = 76-80) установлено, что животные находятся в состоянии теплового стресса и вероятно имеется снижение суточных удоев. Концентрации CO_2 в

наружном и внутреннем воздухе отличались не значительно. Концентрация NH_3 в коровнике была существенно выше, но составляла не более 22% от предельно допустимой.

Таблица 1

Средние значения параметров микроклимата в коровнике №1

		13 июля					15 июля				
	T	29,3	29,2		29,4	29,4	32	33,2		31,7	33
	HR	47,8	48,1		44,8	48	46	41,7		42,3	42
	NH_3	2,5	2,5		0,8	2,5	2,7	3		0,13	1,4
	CO_2	542	532		583	507	658	554		610	566
	THI	77	77		77	77	80	81		79	81
	T	29,4	29,4	30,2	29,8	29,3	31	30,8	32,7	30,9	31,3
	HR	47,3	46	46,1	45,1	47,8	50,1	50,3	42,8	49,8	49,5
	NH_3	1,4	2,5	4,4	2,6	3,1	5,5	3	2,7	4,16	2,6
	CO_2	564	759	746	757	552	814	791	654	761	622
	THI	77	77	79	77	77	80	79	80	79	80
T –	T	29,8	31,3		28,9	28,7	31,9	32,1		32,2	32,4
	HR	47	41,3		44,8	45,8	42,4	41,9		44,9	43,5
	NH_3	2,6	1,1		0,3	0,4	1,1	0,76		2,9	1,4
	CO_2	501	468		507	429	557	587		628	665
	THI	78	78		76	76	79	80		80	80

температура, ºС; HR – относительная влажность, %; NH_3 – концентрация аммиака, мг/м^3; CO_2 – концентрация углекислого газа, ppm; THI - индекс теплового стресса коров.

В период проведения исследований в районе коровника №2:

- 13 июля 2021 года температура воздуха составляла +33,7 ºС при относительной влажности 36%, концентрация CO_2 - 621 ppm, NH_3 - 0,1 мг/м^3;
- 15 июля 2021 года температура воздуха составляла +29,8 ºС при относительной влажности 38%, концентрация CO_2 - 715 ppm, NH_3 - 0,1 мг/м^3.

При мониторинге параметров микроклимата в коровнике №2 в соответствии со схемой (рисунок 4) зафиксированы значения, представленные в таблице 2.

Анализ полученных результатов измерений показал, что температура воздуха в коровнике была на 4-6 °С ниже температуры наружного воздуха при разнице относительной влажности воздуха 15-22%. Расчеты температурно-влажностного индекса

(THI = 76-81) показали, что животные находятся в состоянии теплового стресса и вероятно имеется снижение суточных удоев. Разница концентрации CO_2 в наружном и внутреннем воздухе составляла от 100 до 520 ppm . Концентрация NH_3 в коровнике была значительно выше наружной и максимальное значение ее составило 42% от предельно допустимой.

Таблица 2

Средние значения параметров микроклимата в коровнике №2

	13 июля					15 июля				
T	27,7	28		29,3	31,1	30,3	29,5		31,1	30,1
HR	63,3	55,3		54,3	46,8	52,7	60,9		53,5	57,7
NH_3	8,5	5,5		5,6	1,9	4,3	8,4		5,5	7,4
CO_2	1099	926		1142	925	703	1105		808	1005
THI	77	76		78	79	79	79		80	80
T	27,7	27,9		28,6	28,7	29,3	29,4		29,9	29,9
HR	58,6	57,2		55,7	55,8	54,6	62,5		58,3	59,1
NH_3	6,7	4,9		5,1	5,3	5	7,9		6,5	4,5
CO_2	879	1007		1062	1145	1000	1264		1068	1119
THI	76	76	29,6	77	77	78	79	31,2	79	80
T			54,2					58,6		
HR			6,1					6,5		
NH_3			1100					1238		
CO_2			78					81		
THI										
T	30,6	28,9		28,2	27,9	30,5	30,8		29,8	29,3
HR	46,1	51		52,7	52,3	56	61,3		59,7	61,4
NH_3	2,7	4,1		3	3,2	5,2	7,4		5,4	7,4
CO_2	791	1027		908	898	1072	1186		1197	1147
THI	78	77		76	76	80	81		80	79
T	29,1	28,8		28,9	28,7	30,3	30,9		30	29,5
HR	48	48,6		50,6	48,5	48,9	53,3		61,5	62,1
NH_3	3,6	4,4		3,5	1,3	2	6,2		7	7,1

CO_2	832	822		847	783	936	817		1248	1146
THI	77	76		77	76	81	80		80	79

Необходимо отметить, что в летний период в коровниках не обеспечиваются комфортные условия содержания лактирующих коров. В соответствии с индексом THI условия содержания животных в этот период на фермах не обеспечивают получение максимальных удоев. Принимаемых организационно-технологических решений (дополнительная механическая вентиляция помещений, создание водяного тумана) на фермах недостаточно для создания комфортных условий животным и обслуживающему персоналу.

Выводы

Исследования показали, использование переносного измерительного комплекса ПИК-4 позволяет производить измерения четырех основных параметров (температуру и относительную влажность воздуха, концентрацию парниковых газов CO_2 и NH_3) в целях контроля микроклимата в животноводческих помещениях и его соответствия зоотехническим требованиям.

В летний период при высоких температурах наружного воздуха выше +28 °С и относительной влажности воздуха до 60% тепературно-влажностный индекс THI = 76-81, что свидетельствует о тепловом стрессе для животного, снижает их продуктивность. В этих условиях применение дополнительной вентиляции с созданием водяного тумана снижает тепловую нагрузку на животных, но не достаточно для обеспечения необходимых комфортных условий для животных и обслуживающего персонала. Требуются дополнительные организационно-технологические мероприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mylostyvyi R., Vysokos M., Timoshenko V., Muzyka A. et al. Features of the formation and monitoring of the microclimate in non-insulated barns: unresolved issues. *Theoretical and Applied Veterinary Medicine*. 2020. No. 8(2). pp. 73-85. DOI: 10.32819/2020.82011(In English)

2. Levit H., Pinto S., Amon T., et al. Dynamic cooling strategy based on individual animal response mitigated heat stress in dairy cows. *Animal*. 2021. No. 15(2): 100093. DOI: 10.1016/j.animal.2020.100093.

3. Komlosi K.K., Ribacs A. Study on the influence of heat stress on lactating Hungarian Simmental cows. *Research Journal of Agricultural Science*. 2020. No. 52 (2). pp. 63-73. [Электронный ресурс]: URL: https://rjas.ro/download/paper_version.paper_file.a52a5200192c9e0a.392e2d3431204b6f6d6c6f736920726576697365642e706466.pdf (дата обращения 10.09.2021)

4. Nejad J.G., Lohakare J.D., West J.W., Kim W. et al. Effects of water restriction following feeding on nutrient digestibilities, milk yield and composition and blood hormones in lactating Holstein cows under heat stress conditions. *Italian Journal of Animal Science*. 2015. No. 14(3). pp. 479-483. DOI:10.4081/ijas.2015.3952

5. Вторый В.Ф., Вторый С.В., Гордеев В.В. Информационно-прогнозная модель температурно-влажностного режима коровника. *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 2. С. 241-256. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.241-256

6. Herbut P., Hoffmann G., Angrecka S., Godyń D. et al. The effects of heat stress on the behaviour of dairy cows – a review. *Annals of Animal Science*. 2020. No. 21(2), pp. 385-402. DOI: 10.2478/aoas-2020-0116

7. Le Riche E., Vander Zaag A., Burtt S., Lapen D., Gordon R. Water use and conservation on a free-stall dairy farm. *Water*. 2017. No. 9(12), p. 977. DOI:10.3390/w9120977

8. Mylostyvyi R., Izhboldina O. Climate assessment in modern sustainable cattle barns using temperature-humidity index. In: *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2019. pp. 124-144. DOI: 10.30525/978-9934-588-15-0-134.

9. Ильин Р.М., Вторый С.В. Распределение аммиака в коровниках с естественно системой вентиляции // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства.* 2020. № 2 (103). С. 91-98. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10245

REFERENCES

1. Mylostyvyi R., Vysokos M., Timoshenko V., Muzyka A. et al. Features of the formation and monitoring of the microclimate in non-insulated barns: unresolved issues. *Theoretical and Applied Veterinary Medicine*. 2020. No. 8(2): 73-85. DOI: 10.32819/2020.82011(In English)

2. Levit H., Pinto S., Amon T., et al. Dynamic cooling strategy based on individual animal response mitigated heat stress in dairy cows. *Animal*. 2021. No. 15(2): 100093. DOI: 10.1016/j.animal.2020.100093.

3. Komlosi K.K., Ribacs A. Study on the influence of heat stress on lactating Hungarian Simmental cows. *Research Journal of Agricultural Science*. 2020. No. 52 (2): 63-73. Available at: https://rjas.ro/download/paper_version.paper_file.a52a5200192c9e0a.392e2d3431204b6f6d6c6f73692072657669736564 2e706466.pdf (accessed 10.09.2021)

4. Nejad J.G., Lohakare J.D., West J.W., Kim W. et al. Effects of water restriction following feeding on nutrient digestibilities, milk yield and composition and blood hormones in lactating Holstein cows under heat stress conditions. *Italian Journal of Animal Science*. 2015. No. 14(3): 479-483. DOI:10.4081/ijas.2015.3952

5. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V., Gordeev V.V. Informatsionno-prognoznaya model' temperaturno-vlazhnostnogo rezhima korovnika [The information predictive model of creating temperature and humidity conditions in cow barns]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2021. Vol. 31, No. 2: 241-256. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.241-256 (In Russian)

6. Herbut P., Hoffmann G., Angrecka S., Godyń D. et al. The effects of heat stress on the behaviour of dairy cows – a review. *Annals of Animal Science*. 2020. No. 21(2): 385-402. DOI: 10.2478/aoas-2020-0116

7. Le Riche E., Vander Zaag A., Burtt S., Lapen D., Gordon R. Water use and conservation on a free-stall dairy farm. *Water*. 2017. No. 9(12): 977. DOI:10.3390/w9120977

8. Mylostyvyi R., Izhboldina O. Climate assessment in modern sustainable cattle barns using temperature-humidity index. In: *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2019:124-144. DOI: 10.30525/978-9934-588-15-0-134 (In English)

9. Ilin R.M., Vtoryi S.V. Raspredelenie ammiaka v korovnikakh s estestvenno sistemoi ventilyatsii [Ammonia distribution pattern in cow barns with a natural ventilation system]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2020. No. 2 (103): 91-98 (In Russian) DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10245

УДК 639.2 **DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-164-171**

ВЛИЯНИЕ ТИПА КОРМА И КАЧЕСТВА ВОДЫ НА РОСТ И ВЫЖИВАЕМОСТЬ КРЕВЕТОК *MACROBRACHIUM ROSENBERGII* В УСТАНОВКАХ ЗАМКНУТОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Е.А. Тихонов[1], канд. техн. наук; В.И. Базыкин[2];
А.В. Трифанов[2], канд. техн. наук;

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

Цель проведенного исследования заключается в определении влияния типа кормов (корма на основе Daphnia pulex и марки Dajana nano gran) на качество воды (наличие микроорганизмов и взвешенных твердых частиц), на рост и выживание, а также на питательную ценность и химический состав креветок Macrobrachium rosenbergii. План выполнения исследования подразумевал 4 группы креветок, размещенных в одинаковых условиях, которые оценивались в течение 14 недель путем проведения периодических наблюдений и биометрии. Полученные данные зафиксировали достоверные различия между группами, где наилучшие результаты роста и выживания были получены у организмов, получавших корма марки Dajana nano gran, независимо от качества воды. Кроме того, были получены значения белка в мясе креветок до 45% и различное количество жирных кислот. Было определено, что корма на основе Daphnia pulex показывают более низкие результаты по интенсивности роста и выживаемости креветок Macrobrachium rosenbergii.

Ключевые слова: рыбное хозяйство, аквакультура, кормление, качество воды, выживаемость

Для цитирования: Тихонов Е.А., Трифанов А.В., Базыкин В.И. Влияние типа корма и качества воды на рост и выживаемость креветок *MACROBRACHIUM ROSENBERGII* в установках замкнутого водоснабжения // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 3 (108). С.164-171

INFLUENCE OF FEED TYPE AND WATER QUALITY ON THE GROWTH AND SURVIVAL OF SHRIMP (MACROBRACHIUM ROSENBERGII) IN RECIRCULATION SYSTEMS

E.A. Tikhonov, Cand. Sc. (Engineering); V.I. Bazykin
A.V. Trifanov, Cand. Sc. (Engineering);

[1] Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia
[2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

The purpose of the study was to determine the influence of the feed type – based on Daphnia pulex and Dajana nano gran brands, on water quality in terms of microorganisms and suspended solids content and on the growth and survival of Macrobrachium rosenbergii shrimp postlarvae. The study design involved 4 groups of shrimp housed in the same conditions, which were assessed over a period of 14 weeks using periodic observations and biometrics. The study data recorded a significant difference between the groups, with the best results of growth and survival being obtained in organisms that received the Dajana nano gran feed regardless of water quality. In addition, the values of protein in shrimp meat were obtained up to 45% and different quantities of fatty acids. Daphnia pulex based diets were found to show poorer results in terms of growth and survival rate of Macrobrachium rosenbergii shrimp.

Key words: fish industry, aquaculture, feeding, water quality, survival

For citation: Tikhonov E.A., Trifanov A.V., Bazykin V.I. Influence of feed type and water quality on the growth and survival of shrimp *(MACROBRACHIUM ROSENBERGII)* in recirculation systems *AgroEcoEngineeriya*. 2021. No. 3(108): 164-171 (In Russian)

Введение

Незапланированная добыча водных организмов для потребления человеком привела к чрезмерной эксплуатации их естественных источников, которая ежегодно увеличивается из-за роста населения [1]. Однако, объемы вылова гидробионтов не могут увеличиваться бесконечно [2]. В такой ситуации, промышленная аквакультура является отличной альтернативой интенсивной эксплуатации биологических водных ресурсов. В данный момент – это устойчивая отрасль промышленности, обеспечивающая значительную часть спроса на рыбу и другие морепродукты. На сегодняшний день, достаточно хорошо разработаны технологии содержания форели, как в открытых водоемах, так и в системах замкнутого водоснабжения [3]. Однако научно обоснованных методик выращивания гигантской креветки Розенберга нет. Более или менее проработанные методики существуют для выращивания пресноводной креветки Litopenaeus vannamei [4]. При этом, гигантская креветка Розенберга является очень перспективной с точки зрения коммерческого выращивания. Исходя из имеющегося опыта выращивания различных видов креветки, можно сказать, что Macrobrachium rosenbergii способна жить в системах замкнутого водоснабжения с высоким содержанием отложений и микроорганизмов, что имеет важное значение для его промышленного выращивания.

Известно также, что Macrobrachium rosenbergii имеет очень высокое содержание белка в его мясе, которое варьируется в зависимости от условий содержания и кормления [5]. Учитывая вышеизложенное, необходимо провести исследования, направленные на разработку методических рекомендаций в рамках технологии выращивания данного вида креветки как для пищевых целей, так и для получения молодняка для целей сохранения биоразнообразия в соответствующих климатических зонах. Самым важным вопросом в промышленной технологии выращивания является вопрос о том, какой вид корма максимально обеспечивает потребности в питании, необходимые этому виду для увеличения темпов роста и питательной ценности [6]. Питательная ценность мяса креветки напрямую зависит от качества кормов. *Цель настоящего исследования* направлена на изучение

питательной ценности и химического состава креветок Macrobrachium rosenbergii Macrobrachium rosenbergii и комплексной оценки 2 основных параметров промышленной аквакультуры: тип кормов и качество воды, и их влияние на рост и выживание креветки.

Материалы и методы

Исследование выполнялось на базе Инженерного парка Петрозаводского государственного университета, где функционирует модульная установка замкнутого водоснабжения, которая позволяет содержать достаточное количество креветки для статистически значимой выборки. В соответствии с планом эксперимента, есть 2 входных параметра: качество воды и тип корма и 2 выходных параметра: интенсивность роста и выживаемость. Дополнительно оценивалось содержание питательных веществ в мясе. Качество воды является комплексным параметром и определяется количеством взвешенных твердых частиц в сочетании с количеством и типом микроорганизмов. Исследуемые параметры качества воды приведены в таблице 1, согласно ОСТ 15.372-87.

Таблица 1

Показатели качества воды для содержания гидробионтов

Показатели качества воды	Нормативные значения
Взвешенные частицы, мг/л	не более 25
Общее количество микроорганизмов, млн.кл/мл	не более 3

Вода считается низкого качества, если значение обоих параметров, приведенных в таблице 1, превышено на 10%. Разработанный план эксперимента представлен в таблице 2.

Таблица 2

План экспериментального исследования

№ Опыта	Тип корма	Качество воды
X1	Daphnia pulex	высокое
X2	Dajana nano gran	высокое
X3	Daphnia pulex	низкое
X4	Dajana nano gran	низкое

Опыты выполнялись с 3-х кратной повторностью. Начальная плотность посадки составила 30 шт. пост личинок гигантской креветки Розенберга на 120 литров воды. Экспериментальные емкости выполнены из пропилена. На начальном этапе опытов постличинки имели среднюю массу 0,14 г. (±0,002 гр.) и длину 12.1 мм (±0.7 мм). В емкостях были установлены отрезки пластиковых труб, которые функционировали в качестве укрытий во время линьки. Ежедневно отслеживались следующие параметры воды: pH, ионы аммония, кислород, температура. Вода, используемая в опытах X3 и X4, была подготовлена в изолированных емкостях. Полученные данные были статистически обработаны, где были проверены нормальность распределения данных, соответствие по критерию Бартлетта. Затем был применен дисперсионный анализ. В данных, касающихся выживаемости, были рассчитаны

среднее арифметическое и стандартное отклонение.

В исследовании использовались 2 типа кормов: Daphnia pulex – рачки дафнии размером до 4мм, и Dajana nano gran – полнорационный корм для креветки. Кормление осуществлялось 2 раза в сутки (утром и вечером). Норма кормления рассчитывалась в размере 4% от биомассы. Перерасчет нормы кормления осуществлялся еженедельно. Сухой вес определялся с использованием принцип метода постоянной массы [7]. В процессе выполнения эксперимента проводился ежедневный контроль потребления корма и удаление остатков кормов перед следующим кормлением. Сухой вес остатков корма оценивался для определения количества корма, потребленного креветками.

В начале и в конце каждого опыта, партия из 20 постличинок и креветок использовалась для определения живой массы, сухого веса и органического сухого веса. Эти данные использовались для оценки эффективности кормления на основе сухого веса креветок. Рост постличинок оценивался еженедельно путем измерения всех особей. Измерялось расстояние от цефалоторакса до тельсона с применением штангенциркуля точностью 0,05мм и диапазоном измерений от 0 до 150 мм. Живая масса креветок определялся при помощи аналитических весов точностью 0,001г. Кроме того, были определены удельные темпы роста (TEC) в неделю по длине по модифицированной формуле [8], определяемой следующим образом:

$$TECL = \frac{\ln(L_K) - \ln(L_H)}{t} \times 100, \quad (1)$$

где L_K – конечная длина, мм, L_H – начальная длина, мм, t – время, час.

Интенсивность набора массы определялась, следующим образом:

$$TECW = \frac{\ln(W_K) - \ln(W_H)}{t} \times 100, \quad (2)$$

где W_K – конечная масса, W_H – начальная масса, t – время, час.

Выживаемость рассчитывалась еженедельно с использованием ежедневных данных о мертвых и живых организмах в экспериментальных единицах, путем деления окончательного числа организмов в неделю на начальное число организмов, а затем умножения на 100.

Физико-химические параметры воды, рекомендованные для выращивания Macrobrachium rosenbergii, были указаны в оптимальных температурных интервалах между 27 и 29 °C. В связи с этим в настоящем исследовании поддерживалась температура 28±1 °C. Остальные физико-химические параметры контролировали ежедневно, для поддержания их в требуемых диапазонах: pH (7-8), щелочности (<80 мг/л), аммония (<1 мг/л) и кислорода (5 мг/л).

Результаты и обсуждение

Результаты измерений показали высокую стабильность физико-химических параметров, описанных в предыдущем разделе, во всех опытах исследования (см. таблицу 3).

Таблица 3

Средние значения, фиксируемых параметров воды

Показатели	Вода с высоким качеством (опыты Х1 и Х2)	Вода с низким качеством (опыты Х3 и Х4)
Аммоний, мг/л	0±0,00	0,03±0,009
Щелочность, мг/л	40-80	45-80
Кислород, мг/л	5±0,02	5±0,04
Общее количество микроорганизмов, млн.кл/мл	0	24

Как видно из таблицы, высокое содержание микроорганизмов наблюдается в опытах с водой низкого качества (Х3 и Х4). Что касается потребления различных типов кормов, то было отмечено, что креветки потребляли различное количество кормов от рассчитанной нормы кормления. В течение первых 3 недель регистрировалось около 10% не потребленных кормов, а затем этот показатель уменьшился до значения, близкого к 3%. Данные о росте креветок (длина и живая масса), показали значительные различия между опытами. При этом, выявлено, что именно тип кормов оказывает значительное влияние на рост, в независимости от качества используемой воды. Динамика увеличения массы при использовании кормов марки Dajana nano gran (опыты Х2 и Х4) и кормов на основе Daphnia pulex (опыты Х1 и Х3) представлена на рис. 1.

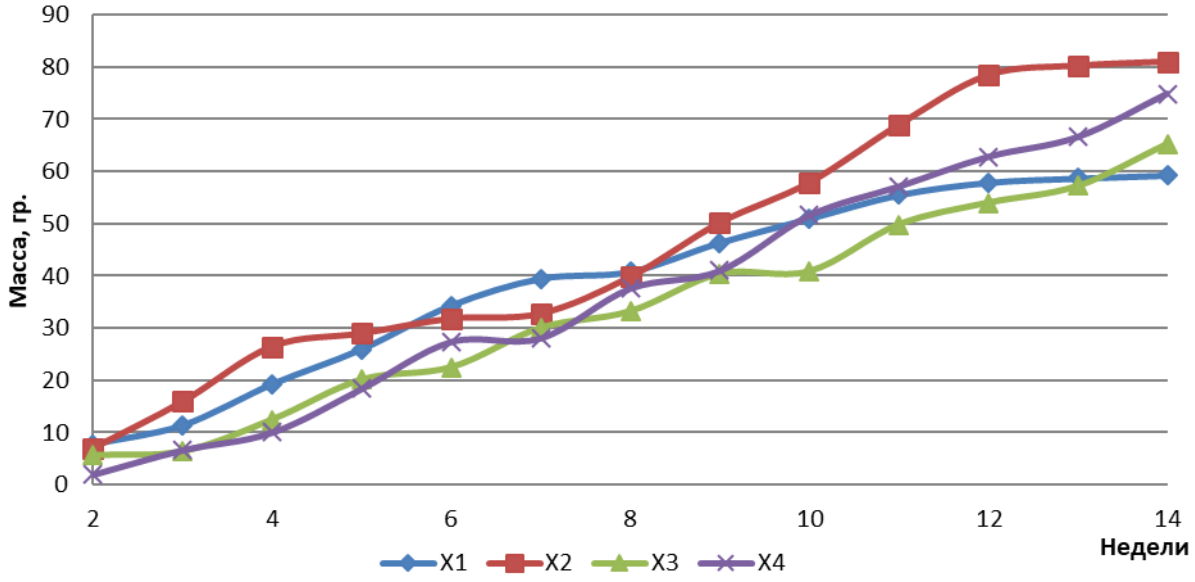


Рис. 1. Динамика роста живой массы

Увеличение живой массы показывает тенденцию к прерывистому или скачковому росту, практически в течение всего периода исследований. Максимальная средняя масса составила 81 гр., в опыте Х2. В опыте Х4 также получены высокие результаты – 76 гр. При этом, в опытах Х1 и Х3 средняя масса креветок значимо меньше и составляет 59 гр.

и 64 гр., соответственно. Аналогичные результаты были получены по увеличению длины креветок (см. рис. 2), которые также показывают тенденцию к скачкообразному росту. Максимальна средняя длина составила 121 мм. – в опыте Х2 и 117мм. – в опыте Х4. Аналогично, в опытах Х1 и Х3 средняя длина креветок значительно меньше и составляет 95 мм. и 77 мм., соответственно.

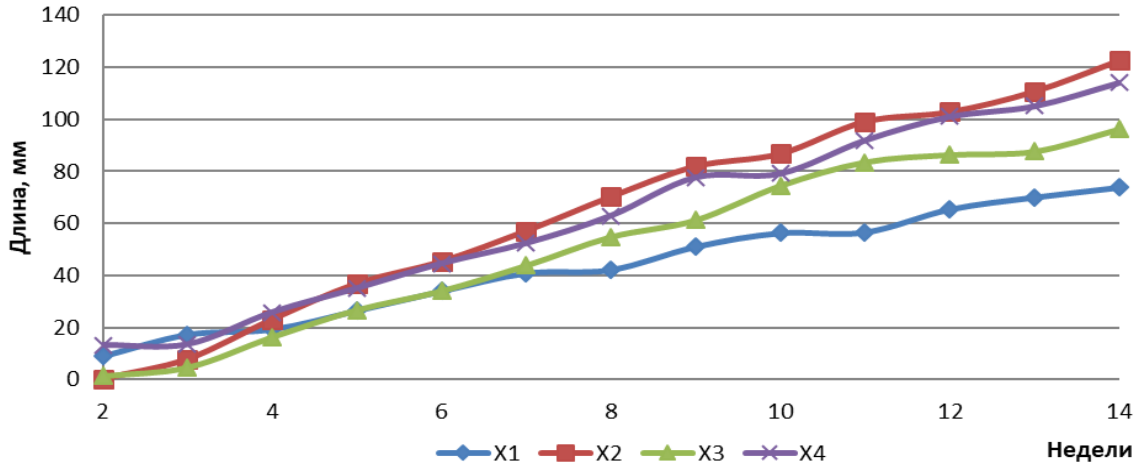


Рис. 2 Динамика увеличения длины креветки

Анализы содержания различных веществ показали следующее. Максимальное содержание белка в креветках было зафиксировано в опытах Х2 и Х4 (см. табл. 4). Обратная ситуация с углеводами: в опытах Х1 и Х3 содержание максимальное, из которых от 0,08 до 0,09% составляют сырую клетчатку. Анализ содержания жиров выявил незначимое различие в опытах Х1, Х3 и Х4, тогда как в опыте Х2 содержание жиров значимо выше.

Таблица 4

Содержание веществ в креветках

Номер опыта	Х1	Х2	Х4	Х4
Белки, %	40±2,1	47±1,8	38±1,9	46±1,4
Углеводы, %	26±1,5	16±0,7	26±2,1	16±1,8
Жиры, %	4,8±0,2	5,8±0,9	4,2±0,6	4,2±0,4

При проведении анализа содержания различных жирных кислот, были зафиксированы значимые различия между опытами (см. таблицу 5). Самые высокие значения общего количества насыщенных жирных кислот были зафиксированы в опыте Х3. Что касается других типов кислот, то разница незначительная.

Таблица 5

Содержание кислот в креветках

Номер опыта	Х1	Х2	Х3	Х4
Насыщенные жирные кислоты, %	37,1±2,7	42,7±0,6	46,6±1,2	41,5±1,1
Мононенасыщенные жирные кислоты, %	31±1,5	34,2±2,1	32±1,3	28,9±0,6
Ненасыщенные жирные кислоты, %	31,9±2,0	23,1±1,3	21,4±1,8	29,6±1,8

В целом, было зарегистрировано 9 типов насыщенных жирных кислот, количество которых варьировалось в зависимости от типа кислоты. В отношении мононенасыщенных жирных кислот было выявлено 7. И наконец, 6 жирных кислот полиненасыщенного типа были идентифицированы.

Анализ выживаемости показал значимые различия между опытами. Самые высокие значения были зарегистрированы в опытах X2 (64%) и X4 (62%). В отличие от X1 (46%) и X3 (41%). В целом наблюдается тенденция к снижению смертности с течением времени. При этом, максимальная смертность зафиксирована между 5 и 6 неделями исследования: от 10 до 15% в X1 и X3 и от 5 до 10% в X2 и X4.

Рост креветок Macrobrachium rosenbergii неравномерен. Это связано с процессом линьки. Успешная линька в период роста напрямую связана с качеством кормов, а также условий содержания [9]. Также, частой причиной смерти креветки является ситуация с невозможностью полинять. Это связано, прежде всего, с балансом кальция в организме.

Выполненные исследования показали, что лучшие показатели роста и выживания постличинок Macrobrachium rosenbergii достигаются при кормлении сбалансированными кормами, марки Dajana nano gran, по сравнению с кормом на основе Daphnia pulex. В этой связи результаты, полученные в контролируемых условиях, позволяют установить, что постличинки массой от 0,14 г и до 12,1 мм в длину лучше потребляют сбалансированный корм, что позволило достичь значений 81 г и 121 мм в конце исследования. Также, имеются различия по распределению кормов в толще воды. Корма марки Dajana nano gran сразу опускаются на дно, что позволяет более легко употребить их постличинками. Тогда как корма на основе Daphnia pulex, долгое время остаются на поверхности и в толще воды. Об этом можно судить по наблюдениям, проведенным в течение первых 15 минут после добавления 2 видов корма и в оставшихся кормах через 12 часов после кормления.

Выводы

Качество кормов имеет прямое отношение к содержанию веществ в мясе креветки. Определено, что при кормлении сбалансированными кормами показатели содержания белка выше по сравнению с использованием кормов на основе Daphnia pulex. Кроме того, для полного понимания причин высокой эффективности того или иного корма необходимо выполнить исследование, нацеленное на выявление типов аминокислот, для того, чтобы определить наличие незаменимых аминокислот и впоследствии установить реальное влияние этих аминокислот на рост и развитие Macrobrachium rosenbergii.

Увеличение живой массы показывает тенденцию к прерывистому или скачковому росту, практически в течение всего периода исследований. Максимальная средняя масса составила 81 гр., в опыте X2. В опыте X4 также получены высокие результаты – 76 гр. При этом, в опытах X1 и X3 средняя масса креветок значимо меньше и составляет 59 гр. и 64 гр., соответственно.

Отмечено влияние типа корма на процент выживаемости. Наилучшие результаты наблюдаются у организмов, питавшихся сбалансированным кормом марки Dajana nano gran. Анализ выживаемости показал значимые различия между опытами. Самые высокие значения были зарегистрированы в опятах X2 (64%) и X4 (62%). В отличие от X1 (46%) и X3 (41%).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Alshubiri F., Elheddad M., Doytch N. The impact of fish production on marine trade balance and foreign direct investment: An empirical study of the GCC economies, *Marine Policy*, 2020. Vol. 116: 103660. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103660.

2. Bohnes F. A., Rodriguez U-P., Nielsen M., Laurent A. Are aquaculture growth policies in high-income countries due diligence or illusionary dreams? Foreseeing policy implications on seafood production in Singapore, *Food Policy*, 2020. Vol. 93: 101885. DOI: 10.1016/j.foodpol.2020.101885.

3. Pulkkinen J. T., Kiuru T., Aalto S. L., Koskela J., Vielma J. Startup and effects of relative water renewal rate on water quality and growth of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) in a unique RAS research platform, *Aquacultural Engineering*, 2018. Vol. 82: 38-45. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2018.06.003.

4. de los Ríos-Pérez L., Campos-Montes G. R., Martínez-Ortega A., Castillo-Juárez H., Montaldo H. H. Inbreeding effects on reproductive traits in a breeding population of Pacific white shrimp Penaeus (Litopenaeus) vannamei, *Aquaculture*, 2017. Vol. 479: 442-446. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2017.06.013.

5. Pengfei Feng, Jinzhao He, Min Lv, Guanghua Huang, Xiuli Chen, Qiong Yang, Jianbo Wang, Dapeng Wang, Huawei Ma, Effect of dietary Tenebrio molitor protein on growth performance and immunological parameters in Macrobrachium rosenbergii, *Aquaculture*, 2019. Vol. 511: 734247. DOI: 10.1016/j.aquaculture. 2019.734247.

6. Kuhn D. D., Lawrence A. L., Boardman G. D., Patnaik S., Marsh L., Flick G. J. Evaluation of two types of bioflocs derived from biological treatment of fish effluent as feed ingredients for Pacific white shrimp, Litopenaeus vannamei, *Aquaculture*, 2010. Vol. 303, Issues 1–4: 28-33. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2010.03.001.

7. Sorokin C. Dry weight, packed cell volume and optical density. In: J. R. Stein (Ed.), *Handbook of phycological methods, culture methods and growth measurement*. Cambridge: Cambridge University Press. 1973: 321-343,

8. Hernández-Vergara M.P., Rouse D. B. et al. Effects of dietary lipid level and source on growth and proximate composition of juvenile redclaw (Cherax quadricarinatus) reared under semi-intensive culture conditions, *Aquaculture*, 2003. Vol. 223, Issues 1–4: 107-115. DOI:10.1016/S0044-8486(03)00135-2.

9. Bardera G., Owen M. A.G., Pountney D., Alexander M. E., Sloman K. A., The effect of short-term feed-deprivation and moult status on feeding behaviour of the Pacific white shrimp (Litopenaeus vannamei), *Aquaculture*, 2019. Vol. 511: 734222. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2019.734222.